

Studies on Erosion Mechanism and Accelerated Erosion Test of Concrete Irrigation Canal

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2019-03-22 キーワード (Ja): キーワード (En): concrete irrigation canal, erosion mechanism, accelerated erosion test, cementitious materials, calcium leaching 作成者: 渡嘉敷, 勝 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.24514/00002249

農業用コンクリート水路における 摩耗機構および促進摩耗試験に関する研究

渡嘉敷 勝*

* 施設工学研究領域施設機能担当

キーワード：農業用コンクリート水路，摩耗機構，促進摩耗試験，セメント系材料，カルシウム溶脱

I 緒言

1 研究の背景

国民への食料の安定供給はどの国においても最重要課題の一つである。しかしながら、Fig. 1 に示すように 1960 年代以降供給熱量ベースの我が国の食料自給率は一貫して下降し、2003 年には 40%まで低下し、主要先進国内においても最低の水準となっている。その後、2008 年においても 41%に留まっており深刻な状況が続いている。このような状況は、食生活の高度化・多様化が進む中で、我が国農業の基幹的な作物である米の消費が減退し、畜産物、油脂のように大量の輸入農産物を必要とする食料の消費が増加したことが原因とされ、1999 年に食料・農業・農村基本法（以下「基本法」）が制定された。また、この基本法の理念を具体化するために食料・農業・農村基本計画（以下「基本計画」）が 5 年ごとに策定され、これに基づき、食料・農業・農村政策が推進されてきた。基本計画が対象とする施策は多岐に渡っているが、その一つとして農業水利施設の整備がある。2000 年 3 月の基本計画では、土地改良施設等の管理及び保全と題して、「管理体制の整備等を通じて、土地改良施設の適切な管理及び保全を推進するとともに、老朽化したため池等についての防災対策を計画的に推進する」としている。また、2005 年 3 月の基本計画においては、農業水利施設等の適切な更新・保全管理と題して、「農業用水を適切に供給するため、基幹から末端まで一貫した用水供給機能・排水条件を確保する。また、既存ストックの有効活用の観点から農業水利施設等の長寿命化を図り、これらのライフサイクルコスト（建設・維持管理等にかかる全てのコスト）を低減することを通じ、効率的な更新整備や保全管理を充実する。その際、これらの施設の円滑な管理がなされるよう、土地改良区に係る体制や制度を整備する」としている（農林水産省、2005）。さらに、2010 年 3 月に閣議決定された基本計画では、国民の食料を支える基本インフラの戦略的な保全管理と題して、「基幹的水利施設は、我が国の食料生産に不可欠な基本インフラであるが、国や地方公共団体、管理者の財政のひっ迫等により、これらの機能の将来にわたる安定的な発揮に不安が生じている。このため、リスク管理を行いつつ、施設のライフサイクルコストを低減し、施設機能の監視・診断、補修、更新等を機動的かつ確実にを行う新しい戦略的な

保全管理を推進する」としている（農林水産省、2010）。これら三つの基本計画の記述を比較すると、近年になるほど農業水利施設が果たしている役割の重要性が認識されていることがわかる。特に 2010 年の基本計画では、「施設機能の監視・診断、補修、更新等を機動的かつ確実にを行う新しい戦略的な保全管理」の文言が入り、より具体的な保全管理のあり方が求められていることが示されている。

a 農業水利施設のストックマネジメント

保全管理の対象となる農業水利施設は、我が国には 2002 年度時点における再建設費ベースで約 25 兆円とも推定される膨大な量が存在しており、長期間供用された施設における機能低下と施設機能の維持が社会的課題となっている。このような状況の中で、「更新・管理の時代」の施設の維持管理の展開方向として、ライフサイクルコスト概念の導入、事後保全から予防保全への移行、既存構造物に対する管理技術の充実を基礎とした計画的な維持管理の必要性の指摘（宮元、2002）、また、ストックマネジメントの導入による既存の農業水利施設の効率的な維持管理、的確な保全、そして機動的な更新を図ることが今後の行政の課題であるとの指摘（勝山、2002）がなされた。このような課題を解決すべく、農林水産省では 2002 年度に農業水利施設保全対策事業、2003 年度に国営造成水利施設保全対策事業を創設し、ストックマネジメント施策を推進してきた。そして、2007 年度より、基幹水利施設ストックマネジメント事業を創設し、国営、県営事業で造成された施設の機能診断、予防保全計画作成、計画に基づく対策工事を一

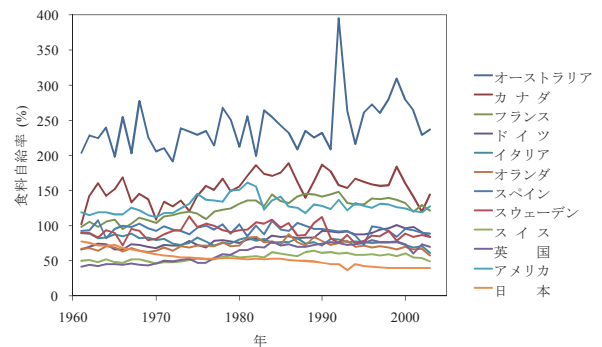


Fig. 1 主要先進国の供給熱量ベースの食料自給率
Food self-sufficiency ratio of the major industrial countries based on calories

貫して実施できる制度を整備した。しかしながら、ストックマネジメント事業は緒に就いたばかりであり、必要とされる各種技術は未だ発展途上にあることが指摘(森, 2005)されており、ストックマネジメントのフレームワークの構築および機能診断技術の開発は今後の重要課題である。

b 農業水利施設の性能管理

ストックマネジメントにおいては、施設の発揮する性能の維持を目的として掲げているが、施設が主であり、性能が従であるとする立場である。今後は、農業水利施設の性能を管理することにより視点を置いた戦略が不可欠であると考えられる。つまり、性能が主であり、施設が従であるとする立場である。農業水利施設が有する性能としては、水利用性能、水理性能、構造性能が挙げられる(中ら, 2003)。これらの性能および施設と管理の関係を図示すると、Fig. 2 のようになる。本論ではこの関係を水利用性能マネジメントとし、その定義を「食料・農業・農村基本計画に基づく施策推進への寄与を最大にすることを目的として、予算等の制約条件の下に、農業用水の水利用性能を効果的、効率的、経済的に管理・運営するために実施する農業水利施設に係わる技術体系およびその活動」とする。

定義に基づき、水利用性能マネジメントの最終的な目的は、食料・農業・農村基本計画に基づく施策推進への寄与の最大化にある。そのためには、水利用性能を要求水準以上に維持しなければならない。その前提条件として、水理性能および構造性能も要求水準以上に維持する必要がある。そして、それらの性能を発揮させるための実体物としての農業水利施設が必要となる。なお、同図では、水利用性能を上位に位置づけ、水理性能および構造性能は下位に位置づけている。これは、農業水利施設が整備されてきた直接の目的が、水利用性能の発揮にあり、水理性能および構造性能は水利用性能を発揮させる手段と考えるからである。

管理者の役割は、水利用性能を維持することにある。しかし、管理者が水利用性能を直接管理することは出来ないため、実体物としての農業水利施設を管理することにより、構造性能および水理性能を適切に発揮させ、水利用性能の維持を図ることとなる。管理者は、農業水利施設を介してこれら性能を間接的に管理しているのである。

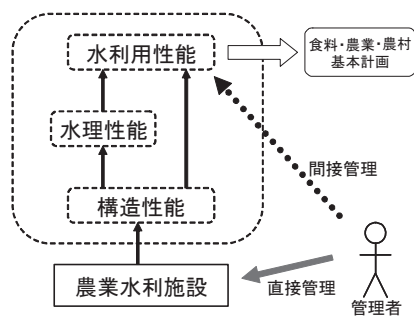


Fig. 2 性能および施設と管理の関係
Concept of management for the performance of facilities

水利用性能をマネジメント対象とすることで得られる利点としては、マネジメントの一貫性が挙げられる。農業水利施設が担う役割は、時代によってその要求性能は変化するものの、食料・農業・農村への寄与という大枠の役割は、今後も比較的長期に渡って変化しないと考えられる。つまり、過去から現在まで継承され、そして、未来へと継承されていくものは、施設ではなく、水利用性能である。そのため、マネジメント対象を水利用性能とすることでマネジメント活動に長期的な視点に立った一貫性が生じると考えられる。

例えば、施設の更新は、既存施設の性能を管理水準以上に維持できる対策が無い場合(物理的寿命)、対策があっても経済的でない場合(経済的寿命)、あるいは、要求性能の変化により既存施設では対応できなくなった場合(機能的寿命)、などに実施される。強度低下により安全性に問題が生じた施設の建て替え、また、開水路の暗渠化やパイプライン化、などがこれらに相当する。この場合、施設の形態は変わるものの、水の輸送などの基本的な性能およびそれによって発揮される水利用性能は大きく変化しない。つまり、施設自体には継続性は無いが、水利用性能は継続性を有しているのである。このように継続性のある水利用性能を対象とすれば、マネジメントの個々の活動において、その活動を実施する目標が明確となり、マネジメント全体の見通しも良くなると考えられる。

ところで、コンクリート構造物の一般的な維持管理の手順は、コンクリート標準示方書[維持管理編](土木学会コンクリート委員会, 2001)によれば、Fig. 3 のようになる(以下、一般的維持管理手順)。この手順を性能に視点を移せば、実体としての構造物と性能とが区分でき、Fig. 4 のように表せる(以下、性能維持管理手順)。両手順とも点検、劣化予測から評価および判定、対策、そして、点検に戻るサイクルが機能診断のフレームとなる。両手順の主な相違点は、①スタート地点が何であるか、②手順中に構造物自体の更新が存在するか、などである。

スタートが一般的維持管理手順では、構造物から始まるのに対して、性能維持管理手順では、要求性能の設定から始まる。水利用性能マネジメントにおいては、始めに「性能ありき」であり、性能を得る手段として農業水利施設が存在するという立場である。そして、農業水利施設に要求される性能は、比較的長期に渡って求められること、また、時代によってその要求性能が変化すること、などを考慮すれば、スタート地点に要求性能の設定が位置するのは妥当と考える。

性能維持管理手順においては、評価および判定により、対策不可(物理的に、または、経済的に、性能を維持する対策が無い状況)の場合には、要求性能を再設定し直すこととなる。要求性能の再設定では、当初の要求性能を見直し、不要となった要求性能を省くこと、または、要求性能の管理水準を下げるなど、などが可能であれば、現行の構造物の現況性能で許容できるかを再判定する。しかし、許容できない場合には、構造物を更新することとなる。性能

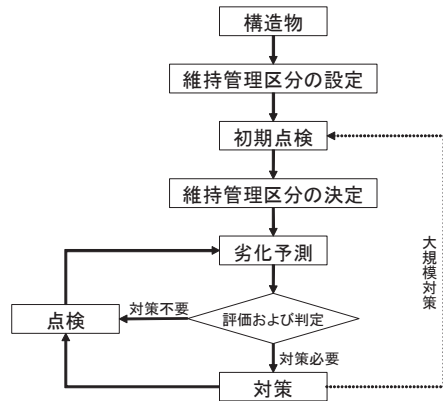


Fig. 3 一般的な維持管理の手順
(土木学会コンクリート委員会, 2001)
General maintenance procedures

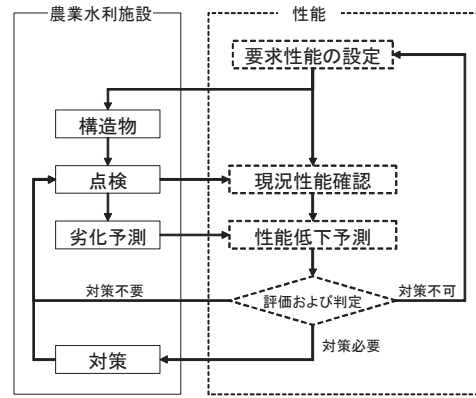


Fig. 4 性能を視点とした維持管理の手順
Performance based maintenance procedures

維持管理手順は、手順中に更新を含んでいるため、継続的なサイクルとなる。

ところで、維持管理においては性能の経時変化、つまり性能低下を把握することが重要となる。しかし、宮川(2004)は、Table 1に示されるように、その精度は現在必ずしも高くないとし、結論を先延ばしすることが出来ない維持管理においては、その代替として、劣化機構の基本を押さえた点検結果を維持管理に反映させる必要性を指摘している。また、河野(2007)は、アセットマネジメントの効果を示すために用いられる「性能低下曲線」について、多くの文献で劣化による性能低下曲線は上に凸の曲線で表されているが、その曲線が適切なのは塩害などによる構造物の耐荷性能低下などであり、多くの場合、曲線形状は異なるのではないかと問題提起している。農業水利施設に関する分野においても、劣化の進行予測として、ワイブル分布モデルを用いた方法(渡嘉敷ら, 2003)やマルコフ連鎖モデルを用いた方法(森ら, 2009)が試みられているものの十分な状況にはない。これは、手法自体の問題ではなく、手法を適用するデータが精度良く蓄積されていないことも大きな要因と考えられる。このように現状では、性能低下予測は不十分な状況にあるため、今後は、これら性能低下に関するデータの蓄積と研究の進展により、的確な診

断が可能となることが期待されている。

対策工法選定に際しては、構造物に生じている劣化のメカニズムを正確に把握した上で、劣化状況と性能回復水準に適切な工法を選定する必要がある。土木学会メンテナンス工学連合小委員会(2004)は、性能照査型の補修・補強設計手順をFig. 5のように表し、以下のような作業となることを示した。

- ① 構造物の点検結果や設計図書などのデータを用いて、供用期間中における構造物の性能低下程度を予測する。
- ② 供用期間中における構造物の性能を照査し、常に要求性能を上回れば対策は不要とし、下回る場合には補修・補強工法の選定プロセスに入る。
- ③ 対策として適当であると思われる工法を仮定し、補修・補強後の構造物について供用期間中の性能低下程度を予測する。
- ④ 補修・補強後の構造物の供用期間中における性能を照査し、常に要求性能を上回れば仮定した工法を仮選定する。下回る場合には工法変更やパラメータ変更により、要求性能を上回るまで調整を行う。
- ⑤ 仮選定された工法と補修・補強材料に関して、想定された性能を有することを各種性能試験等で確認

Table 1 コンクリート構造物の性能の一覧と評価の現状(宮川, 2004)
Present state of verification for the performance of concrete structures

性能の種類	具体的な内容	性能低下の主な要因	定量評価の可否の現状	定量評価に対する課題	検証試験の可否の現状
安全性能	耐荷性能(含耐震性能) その他の安全性能(転倒や滑動等)	鉄筋腐食 ひび割れ 表面劣化 疲労 地盤変動等	可	精度向上と安全係数の設定	否
使用性能	使用性(変形, 振動, 防水性等) 機能性(供用における満足度)		可	精度向上と安全係数の設定	可
第三者影響度に関する性能	コンクリート片落下の防止等		一部可	評価方法構築と安全係数の設定	一部可
美観・景観	ひび割れ, 錆汁, エフロッセンス等による汚れの防止等		一部可	主観的要因の考慮の方法	否
耐久性能	供用期間中, 要求性能を満足する性能		一部可	劣化予測する精度の向上と安全係数の設定	一部可

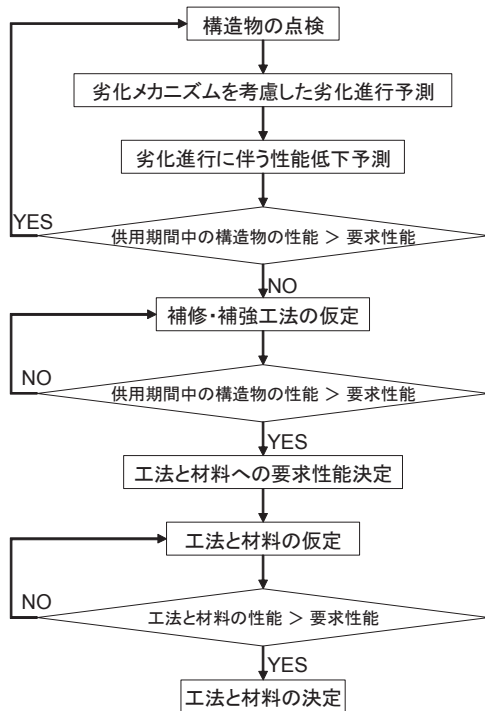


Fig. 5 性能照査型の補修・補強設計手順
(土木学会メンテナンス工学連合小委員会, 2004)
Repair and reinforcement design procedures based on the performance verification

し、工法、材料を決定する。確認できない場合は、他の材料等で再度試験等を行う。

しかしながら、同委員会は、また、この手順が含む劣化による構造物の性能低下程度や、補修・補強が適用された構造物の性能回復程度について、現状では精度の良い推定は困難であること、また、補修・補強後の構造物の延命効果に関する定量的な評価が困難であること、を指摘している。

構造物の延命効果の評価が困難である理由としては、現行の性能照査（性能評価試験）の対象の大部分が Fig. 6 の A および F であるためと考える。現時点においては、補修・補強材料自体の強度や耐候性を照査することのみで、その工法の耐久性を照査したことと見なす状況にある。しかし、補修・補強の対象となる構造物は、竣工後、既に 30～40 年経過しているため、工法適用後は、新旧複合材料で構成された構造物となり、その挙動については未知の部分が多い。現在も、種々の対策工法により農業水利施設の長寿命化が図られているが、補修材料の浮きやひび割れなどの再損傷が早期に発生しているケースも見受けられる。これらの現象の解明も含めて、今後は、Fig. 6 の G 領域、つまり、補修・補強材料、既設構造物、環境の相互作用の条件下にある工法の耐久性などを適切に評価できる試験の開発が求められている。

c 農業水利施設における摩耗現象

農業水利施設の多くを占めるのはコンクリート構造物であり、ストックマネジメントが対象とする代表的な構造物である。コンクリート構造物は、農業分野以外にも土木

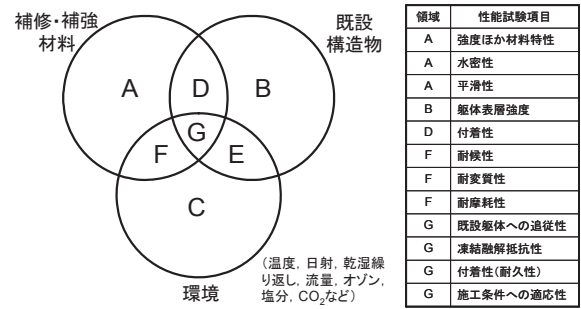


Fig. 6 補修・補強工法の性能照査の領域
Performance verification regions of repair and reinforcement methods



Fig. 7 農業用水路の摩耗状況
Erosion state of concrete irrigation canal

分野で非常に多く存在する。そのため、土木分野においてもコンクリート構造物のマネジメント（アセットマネジメントと称す）が重要課題となっている。2007 年制定コンクリート標準示方書〔維持管理編〕（土木学会コンクリート委員会, 2008a）では、コンクリート構造物の維持管理に関する考え方が示されているが、農業水利施設に特有な劣化である摩耗については未だ十分には記述されていない。農業水利施設においては、流水にさらされる部位で摩耗劣化が進行する（Fig. 7）。農業水利施設の摩耗進行は、構造物の断面を減少させ、安全性能および耐久性能を低下させるとともに、構造物の通水表面の平滑性を著しく損ね、粗度係数を大きくし、水理性能を低下させる原因となる。このような状況の中、長束ら（2002）は農業水利施設の摩耗に対する調査・評価法および更新法の開発の必要性を指摘している。また、加藤ら（2009）も摩耗に対する調査手法を提案している。農業水利施設の性能を今後も維持していくためには、構造物の各部位で生じている摩耗機構を解明するとともに、劣化進行予測および性能低下予測手法の開発、さらに、補修材料などの耐摩耗性能を照査するための促進摩耗試験を確立することが求められている。

2 既往の研究

a 摩耗に関する研究

摩耗を分類する方法には主に、①摩耗機構による分類、②相対運動による分類、③対象とする構造物による分類、④摩耗のレベルによる分類の 4 種類あるとされている（堀口, 1993）。このうち、農業用コンクリート水路の摩耗を考える上で役立つと考えられるのは、摩耗機構による分類

と相対運動による分類の2種である。摩耗機構による分類では、凝着摩耗、アブレシブ（切削）摩耗、表面疲労摩耗の三つに分類される。凝着摩耗は、二つの固体の接触面において“くっついた”ジャンクションが“千切れる”ときに起こる摩耗現象であり、アブレシブ摩耗は固い表面突起あるいは表面間に介在する砥粒が表面を“削る”ことによって起こる現象であり、表面疲労は、1回の固体の接触・摩擦によっては表面に何らの変化も残さないが、接触が繰り返された後に表面剥離を起こして減量する現象である（三科，2010）。相対運動による分類は、固体と固体との相対運動（すべり，転がり，衝撃，振動）と，固体と液体との相対運動（エロージョン，キャビテーション）に分類される（堀口，1993）。これらの分類を農業用コンクリート水路の摩耗に当てはめてみると，摩耗機構としてはアブレシブ摩耗および表面疲労摩耗，相対運動としてはエロージョン摩耗に分類できると考えられる。しかし，摩耗現象の多くは，単一の摩耗機構によるものではなく，複数の摩耗機構が複合的に作用しており複雑であることが指摘されている（堀口，1993）。

b 水利コンクリート構造物の摩耗に関する研究

水利コンクリート構造物の摩耗に関する研究としては，奥田（1979），ACI Committee 210（1993），Momber・Kovacevic（1994），Horszczaruk（2009）などがあるが，その多くは，高流速や礫による衝撃摩耗を対象としており，農業用コンクリート水路で生じる低流速環境下における摩耗現象に関する研究は少ない。ACI Committee 210（1993）は，水利構造物のコンクリートのエロージョンをキャビテーション，アブレーション，化学的作用による固体の進行性破壊と定義している。農業水利施設における摩耗現象は，頭首工エプロンや水路などのコンクリート部で多く見られる。頭首工エプロン部に見られる摩耗は，コンクリートの骨材および骨材周辺のモルタル分がほぼ一様に摩耗進行する現象である。もう一方は，用水路側壁部および底板部で見られるコンクリートの骨材がほとんど摩耗せず，骨材周辺のモルタル分だけが摩耗し，摩耗表面が凹凸の状況を形成する現象である。この両者の摩耗現象の相違は，摩耗機構の相違および材料の相違に起因していると考えられる。野中（2001）は，砂礫混じりの水が流下するコンクリート構造物では，水路面に平行な，すり磨き作用，水路の屈曲部やシュートに沿う面での転がり摩擦，エプロン部での面に直角に作用する衝撃力などによって摩耗が生じるとしている。また，すり磨き作用はコンクリート面を一様に摩滅し，転がり摩擦はモルタルを剥離して粗骨材を露出し，コンクリート面が凸凹となり，ここに衝撃力が加わることで露出した粗骨材が破壊され，または抜け出し，摩耗による損食が一層進行するとしている。

コンクリート構造物のエロージョン摩耗モデルに関する研究は，ほとんど見受けられない。他分野においては，多くの研究事例が存在する。例えば，FEMを用いた解析では，金属やセラミックス材料などへの固体粒子の衝突変形

（Li and Liu，1999；Shimizu et al.，1999；Aquaro，2006；Wang and Yang，2009），ウォータージェットによる材料の弾塑性解析（Hassan and Kosmol，2001）などがある。また，セルオートマトン（Cellular Automata，以下CA）を用いた解析では，3次元CAを用いた降雨による土壌浸食過程（Valette et al.，2006），水流による河床の変形過程（Chopard and Dupuis，2002），ウォータージェットによる切断過程（Orbanic and Junkar，2004），水による土壌浸食モデル（D'Ambrosio et al.，2001）などである。FEMとCAを比較した場合，対象物の形状が複雑，対象物が複合的な材料，確率的な過程，ある期間の進展過程などの条件がある場合には，CAによるモデル化が図られているようである。コンクリートの摩耗過程においても，セメント，細骨材，粗骨材の複合材料であること，また，ある一定期間における形状の進行過程を模擬する場合には，CAによるモデル化が適切であると考えられる。

c 水利コンクリート構造物のカルシウム溶脱に関する研究

石神ら（2005）および森ら（2009）は，コンクリート水路から採取したコアのEPMA分析より，水と接するコンクリート表層部分でカルシウム（以下Ca）が溶脱していることを指摘し，Ca溶脱によるコンクリート表層部分の脆弱化と水流などによる摩耗作用の複合劣化の可能性を提起している。コンクリート構造物からのCa溶脱については，ダム（安田ら，2001；内田ら，2004），導水路（出口ら，2000），水道施設（眞嶋ら，1991）などの水と接触する構造物を主として多数の研究（土木学会コンクリート委員会化学的侵食・溶脱研究小委員会，2003）およびモデル化（例えば，Bentz・Garboczi，1992）がなされているが，Ca溶脱が力学的特性に与える影響に関する研究は少ない（Carde et al.，1996）。また，これまで力学的特性として研究されてきたのはビッカース硬さ（大脇ら，2000；大即ら，2001；横関ら，2002）に関するものが大部分であり，耐摩耗性の評価はなされていない。そのため，農業用水路特有の流水に接触している構造物において進行すると考えられるCa溶脱と摩耗の複合劣化の現象については未だ解明されていない。

d 促進摩耗試験に関する研究

摩耗現象の多くは複数の摩耗機構が作用して複雑であるため，種々の試験方法が提案されている一方，規格化された試験方法が少ない状況にある（石田，2007）。現在，セメント系材料の摩耗試験に用いられているJIS規格としては，JIS A 1453「建築材料及び建築構成部分の摩耗試験方法（研摩紙法）」，JIS K 7204「プラスチック—摩耗輪による摩耗試験方法」などがある。また，米国ASTM規格としては，ASTM C 418「サンドブラストを用いたコンクリートの耐摩耗性標準試験方法」，ASTM C 1138「コンクリートの耐摩耗性標準試験方法（水中法）」などがある。規格以外では，「ロッド式すりへり試験機」（奥田，1984），「掃

流式摩耗試験機」(杉田ら, 1986), 「衝撃摩耗試験機」(豊福・豊福, 1999) などを用いた試験方法が提案されている。頭首工エプロン部における転がり・衝撃摩耗を模擬する試験としては, ロッド式すりへり試験, 衝撃摩耗試験, JIS K 7204 試験が適切であると考えられる。一方, 農業用水路におけるエロージョン摩耗を模擬する試験としては, ASTM C 418, ASTM C 1138, 掃流式摩耗試験が考えられる。しかし, ASTM C 418 は試験機の構造が複雑で経済性に劣り, ASTM C 1138 および掃流式摩耗試験は, 試験体形状の制約があり, 実構造物採取コアによる試験が困難であるという課題がある。近年では, コンクリートのエロージョン摩耗の促進試験として, 噴砂を用いた試験 (Goretta et al., 1999; Momber, 2000) や水噴流を用いた試験も研究されてきている (Momber and Kovacevic, 1994; Hu et al., 2002; 石神ら, 2005; Liu et al., 2006)。また, 長束ら (2010) は, 水噴流に珪砂を混入して摩耗試験を実施する水砂噴流摩耗試験機を開発し, テーパー式摩耗試験機および水噴流摩耗試験機との性能比較を実施している。また, 上野ら (2010) も水砂噴流摩耗試験機を用いて実水路から採取したコアを用いて試験を実施し, 試験時間と実供用年数との促進倍率を求めている。さらに, 石神ら (2006) は, 断面修復材に対して複数の促進摩耗試験法を適用し, 水セメント比, 細骨材量およびポリマー含有量が耐摩耗性に与える影響を明らかにした。今後は, スtockマネジメント事業による補修・補強工法の採用が増加することから, 補修・補強工法で使用される材料のエロージョン摩耗に対する耐摩耗性の評価手法の確立が必要とされている。

3 研究の目的と論文の構成

本研究では, まず, 農業用コンクリート水路に多く見られる劣化現象の一つである摩耗現象の状況・促進摩耗試験・摩耗機構について検討し, 農業水利施設の性能管理の一手法としての耐摩耗性評価試験の確立を目的とする。

本論文は全 6 章から構成され, 各章の関係は Fig. 8 のとおりである。

第 II 章では, 長期供用された農業用コンクリート水路に対して, コンクリート表面のレーザー変位計を用いた粗さ計測および採取コアによる EPMA を用いた元素分析を実施し, その結果を基に農業用コンクリート水路の摩耗状況について把握する。

第 III 章では, コンクリート水路に生じる摩耗現象を模擬するために開発された水噴流摩耗試験機をセメント系材料に適用し, 水噴流の吐出圧力が材料の摩耗特性に与える影響, セメント系材料の骨材が摩耗特性に与える影響, さらに, Ca 溶脱させた試験体の耐摩耗性変化について検討する。

第 IV 章では, 第 II 章および第 III 章の結果を基に農業用コンクリート水路で生じている摩耗機構について推定する。

第 V 章では, 第 II 章から第 IV 章までの結果を基に水路構造物材料の促進摩耗試験の標準試験条件案を提示するとともに摩耗特性の評価指標について論じる。

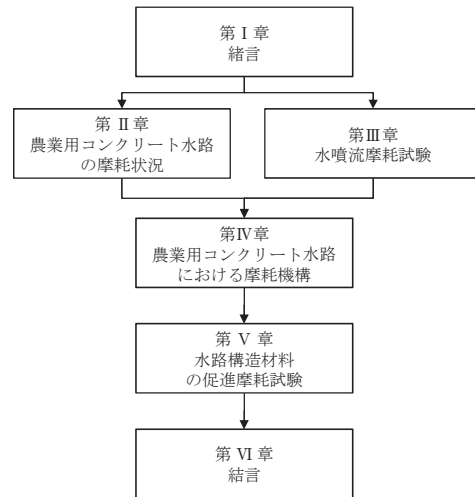


Fig. 8 本論文の構成
Structure of this paper

第 VI 章では, 第 II 章から第 V 章までの結果を総括し, 本論文の結論を述べる。

なお, 本論文は鳥取大学大学院連合農学研究科審査学位論文であることを付記する。

4 本論文における用語の定義

本論文では, コンクリート標準示方書 (土木学会コンクリート委員会, 2001), 機能保全の手引き (農林水産省農村振興局整備部水利整備課施設管理室, 2007), 農業水利施設のコンクリート構造物調査・評価・対策工法選定マニュアル (農林水産省農村振興局整備部設計課施工企画調整室, 2007), コンクリートの化学的侵食・溶脱に関する研究の現状 (土木学会コンクリート委員会化学的侵食・溶脱研究小委員会, 2003)などを参考に, 論文中で用いる用語を以下のように定義する。

変状: 構造物に生じた新設時と異なる, または, 設計時に想定していない状態

劣化: 時間の経過に伴って進行する構造物や部材の異常

構造物の機能: 目的または要求に応じて構造物が果たす役割

構造物の性能: 目的または要求に応じて構造物が発揮する能力

使用性能: 構造物の使用性および機能性に関する性能

耐久性: 想定される作用のもとで, 構造物中の材料の劣化により生じる性能の経時的な低下に対して構造物が有する抵抗性

水利用性能: 管理者が用水を送配水し, 農家はその用水を利用できるための性能

水理性能: 用水を輸送する水理学的性能

構造性能: 水理性能および水利用性能を実体化するための水利構造物の形態を保持する性能

要求性能: 目的および機能に応じて構造物に求められる性能

補修: 主に構造物の耐久性を回復または向上させること

補強: 主に構造物の構造的耐力を回復または向上させること

- 更新：施設全体または設備全体を新しい施設で置き換えること
- 摩耗：表面の相対運動に伴って生じる固体表面部分の逐次減量
- エロージョン摩耗：表面が流体と接する場合に生じる固体表面部分の逐次減量
- 摩耗フロント：セメントペーストが摩耗している領域の最先端部
- 平均摩耗深さ：対象領域における摩耗深さの計測値の算術平均値
- パーセント点摩耗深さ：対象領域における摩耗深さの計測値を小さな値から順に並べたときに、小さな値の割合が指定されたパーセントになる摩耗深さの計測値
- Ca 溶脱：コンクリート中のカルシウム水和物が接触している水分中に溶解する現象
- Ca 溶脱フロント：コンクリート中の Ca が溶脱している領域の最先端部
- 水噴流：ノズルの小孔から空間に噴出する速度を持った水流

II 農業用コンクリート水路の摩耗状況

1 結論

建設後、数十年を経過している農業用コンクリート水路においては、コンクリート表層の摩耗や材料の変質が進行している（石神ら，2005；久田，2008；森ら，2009）。摩耗進行は、構造物の断面を減少させ、安全性および耐久性を低下させるとともに、構造物の通水表面の平滑性を著しく損ね、粗度係数を大きくし、水理性能を低下させる原因となる。農業用コンクリート水路の機能を適切に保全するためには、生じている摩耗状況を把握し、摩耗機構を解明する必要がある。

本章では、農業用コンクリート水路の現地調査結果を基にその摩耗状況について論じる。

2 調査地区および方法

a 調査地区

調査地区は、Table 2 に示す A~E の 5 地区の現場打ちコンクリート水路である。また、比較のために頭首工（F）

およびポリマーセメントモルタルによる補修水路（G）も調査の対象とした。全地区において摩耗形状計測を実施した。また、5 地区の水路のうち、3 地区においてコア採取を実施し、そのうち 2 地区のコアについて EPMA 分析を実施した。

b 摩耗形状計測

摩耗が農業用コンクリート水路の性能に及ぼす影響として、凹凸による粗度係数の増大がある。農村工学研究所で開発した携帯型の摩耗形状計測装置（Fig. 9）を用いて、現地水路の摩耗形状を把握した（森ら，2008）。本装置は、レーザー変位計によってコンクリートの凹凸の振幅を 0.01 mm の精度で ±100 mm、平面方向に 0.5 または 1 mm 間隔で 1000 または 500 点測定（平面距離 500 mm）することが可能である。測定データは、測定装置から携帯型パソコンに転送され保存される。

摩耗形状計測データを用いて、表面粗さを算定する。表面粗さの指標としては、算術平均粗さ Ra と最大高さ Rz を検討する。 Ra は、Fig. 10 に示すように粗さ曲線からその平均線の方向に基準長さ l を抜き取り、この抜き取り部分の平均線の方向に x 軸を、縦倍率の方向に y 軸をとり、粗さ曲線を $y = f(x)$ と表した時に次式で求められる。

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |f(x)| dx \tag{1}$$

最大高さ Rz は、基準長さ l の区間内における最大山高さ と最大谷深さとの差で求められる。 Ra 、 Rz とも値が大きいほど表面の凹凸が大きく、粗いことを示す指標である。



Fig. 9 摩耗形状計測装置
Measuring device for eroded surface profile

Table 2 調査概要
Summary of field investigations

記号	地区	工種	対象材料	調査時 経過年	推定 Gmax (mm)	摩耗 形状 計測	コア 採取	EPMA 分析	水噴流 摩耗試験
A	東北	水路	現場打ちコンクリート	40	20	○	○		
B	東北	水路	現場打ちコンクリート	51	40	○			
C	関東	水路	現場打ちコンクリート	35	40	○			
D	東海	水路	現場打ちコンクリート	38	25	○	○	○	○
E	中国	水路	現場打ちコンクリート	38	20	○	○	○	○
F	関東	頭首工	現場打ちコンクリート	30	40	○			
G	東海	水路	ポリマーセメントモルタル	2~5	-	○			

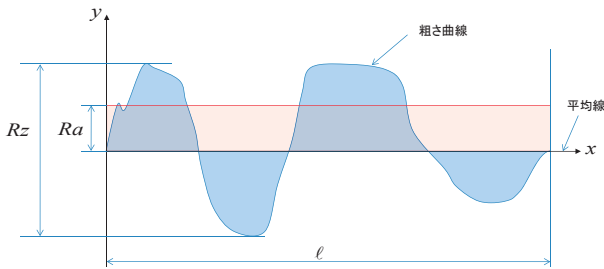


Fig. 10 算術平均粗さ R_a および最大高さ R_z

(R_a は、図中の粗さ曲線と平均線で囲まれる面積 (青色部) の総和を基準長で除した時の値 (桃色部の高さ) である。)

Concepts of arithmetic average roughness R_a and maximum height R_z

c 粗度係数推定

表面粗さを用いて粗度係数を推定する。粗度係数は、中矢ら (2008) の以下の式より推定する。

$$n = 0.042ks^{1/6} \quad (2)$$

$$ks = 2 \times Ra \quad (3)$$

$$ks = 0.26 \times Rz \quad (4)$$

ここに、 n : マニングの粗度係数、 ks : 相当粗度、 R_a : 算術平均粗さ、 R_z : 最大高さを表す。式(2)の相当粗度 ks の求め方には、式(3)および(4)に示すように 2 種の表面粗さ指標 R_a 、 R_z が適用可能であることが示されている。

d 元素分析

現地水路より採取したコンクリートコアの元素分析には、EPMA (Electron Probe Micro Analyzer, (株) 島津製作所 EPMA-1600) を用いた面分析を実施した。D、E 両地区の採取コア各 3 本 (水路側壁気中部、水路側壁水中部、底版) の計 6 本から試験体を切り出した。試験体は、Fig. 11 に示すコアの位置より切り出し、分析面を研磨した後、炭素蒸着して分析を行った。EPMA の分析条件を Table 3 に示す。

EPMA による面分析の数値データを用いて、表面からの深さ方向の Ca の質量濃度分布を求めた。土木学会 (2006) の方法を用いて数値データからセメントペースト部のデータを識別して抽出し、表面からの深さ方向に平均値を算定した。セメントペースト部の識別には、Si と Al の 2 つの元素の組み合わせを利用した。

3 結果と考察

a 摩耗状況

(1) A 地区

A 地区の状況を Fig. 12 に、また、水路底版からの高さ別に求めた算術平均粗さ R_a を Fig. 13 に示す。高さ 60 および 70 cm が水中部であり、100 および 110 cm が気中部となっている。この結果より、気中部より水中部において、表面が粗くなっており、同じ気中部および水中部においても水路底版に近くなるほど表面が粗くなる傾向にあることがわかる。この理由としては、底版に近づくほど水に接触して摩耗作用を受ける時間が増加することが考えられる。

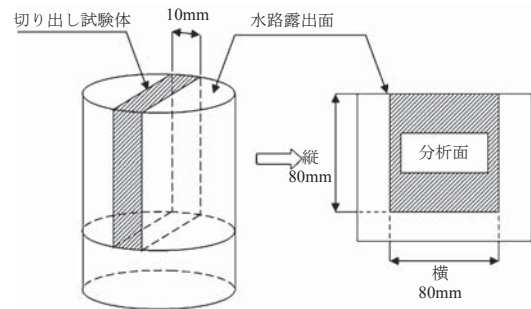


Fig. 11 試験体の EPMA 分析面
EPMA analysis section of the specimen

Table 3 EPMA 分析条件
EPMA analysis conditions

項目	条件
加速電圧	15 kV
照射電流	300 nA
ビーム径	100 μ m
ステップサイズ	100 μ m
サンプリングタイム	30 msec
データポイント	800 \times 800
エリアサイズ	80.0 mm \times 80.0 mm
蒸着材料	炭素
測定元素	Ca, Si, S, Al

(2) B 地区

B 地区の状況を Fig. 14 に、また、水路底版からの高さ別に求めた算術平均粗さ R_a を Fig. 15 に示す。B 地区においては、この水路に多く見られる表層状況の通常面、Fig. 14 右写真に見られるように粗骨材の露出が顕著であり凹凸状況の大きな粗面、また、水路を横断する橋の下面で算術平均粗さを求めた。粗面においては、ばらつきはあるものの他の面に比較して算術平均粗さが大きく、また、水路底版に近づくほど大きくなる傾向を示した。通常面および橋の下については、ほぼ同程度であり、また、水路高さ方向の相違は顕著ではなかった。ただし、B 地区の算術平均粗さは、先の A 地区に比較して、全体的にかなり大きな値となっており、表面の凹凸が大きな状況にあることが示された。

(3) C 地区

C 地区の状況を Fig. 16 に、また、水路底版からの高さ別に求めた算術平均粗さ R_a を Fig. 17 に示す。調査地点の C1、C6、C7 は、同一水路にあり、C6 は C1 の 1,500 m 下流、C7 は C6 の 300 m 下流地点となっている。C1 と C6 については、多少のばらつきはあるものの水路底版に近づくほど表面が粗くなる傾向を示している。C7 については、高さ 60 cm 付近の算術平均粗さが突出して大きくなっているが、これは、この地点における骨材の露出が大きかったことによる。また、C7 地点における底版の算術平均粗さは C1 および C6 と比較して小さな傾向を示した。



Fig. 12 A 地区の水路状況
Canal state in the A district



Fig. 14 B 地区の状況
Canal state in the B district

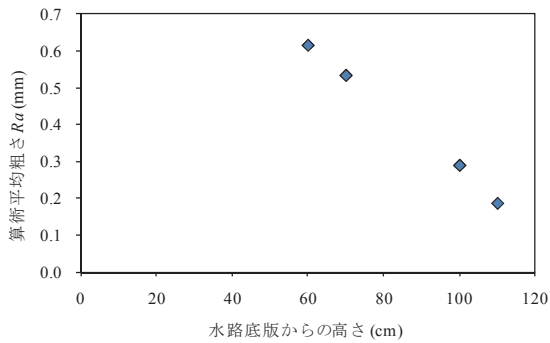


Fig. 13 A 地区の算術平均粗さ Ra
Arithmetic average roughness Ra versus the height of the canal sidewall from the bottom in the A district

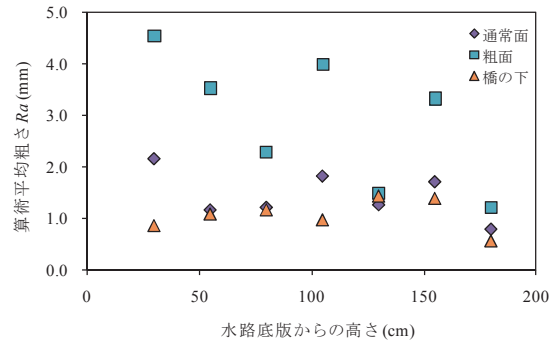


Fig. 15 B 地区の算術平均粗さ Ra
Arithmetic average roughness Ra versus the height of the canal sidewall from the bottom in the B district

(4) D 地区

D 地区の状況を Fig. 18 に、また、水路底版からの高さ別に求めた算術平均粗さ Ra を Fig. 19 に示す。ここでは、左右岸の側壁について計測した。ただし、水路底版から高さ 20 cm の位置は、泥の付着が認められ、完全なコンクリートの表面でない状況での計測であったため、この高さにおけるデータは参考とする。Fig. 19 より、左右岸における算術平均粗さには相違があり、右岸の方がより表面が粗い状況であった。しかしながら、現地における目視では、その相違は認知できなかった。このような差異が生じた理由としては、材料、施工において何らかの差が生じ、そのために右岸側において耐摩耗性に劣るコンクリートとなったことが考えられる。また、本水路が北東から南西に向かっ

ていることから右岸側がどちらかと言えば南面している。そのため、環境条件の相違が耐摩耗性に影響を及ぼしたことも考えられる。

(5) E 地区

E 地区の状況を Fig. 20 に、また、水路底版からの高さ別に求めた算術平均粗さ Ra を Fig. 21 に示す。底版からの高さ 30 および 40 cm においては、コンクリート表面に泥が付着していたため参考値である。水中部 (60, 70, 80 cm) の方が気中部 (100, 120 cm) よりも表面が粗い傾向を示した。

(6) 地区間の比較

上述の 5 地区について から推定した粗度係数を Fig. 22 に示す。最小値は A 地区の 0.0113, 最大値は B 地区の 0.0192

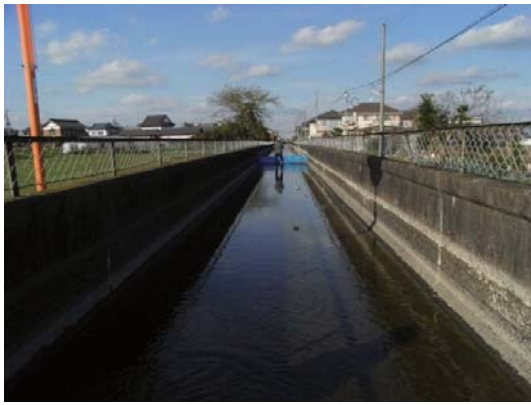


Fig. 16 C 地区の水路状況
Canal state in the C district



Fig. 18 D 地区の状況
Canal state in the D district

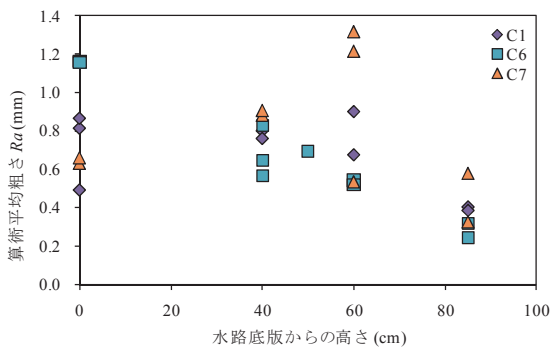


Fig. 17 C 地区の算術平均粗さ Ra
Arithmetic average roughness Ra versus the height of the canal
sidewall from the bottom in the C district

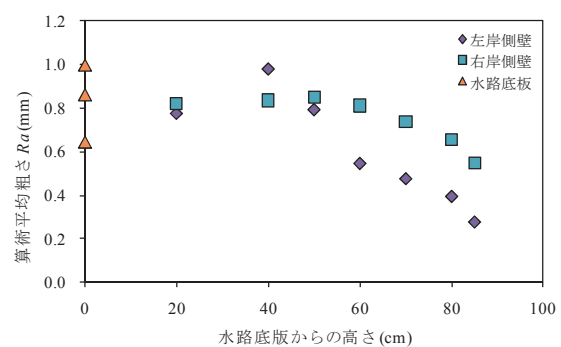


Fig. 19 D 地区の算術平均粗さ Ra
Arithmetic average roughness Ra versus the height of the canal
sidewall from the bottom in the D district

となった。表面が粗かった B 地区において粗度係数が大きくなっている。B 地区を除く地区においては、推定粗度係数が 0.0113~0.0156 となっており、土地改良事業計画設計基準・設計「水路工」(農林水産省農村振興局, 2001) に現場打ちコンクリートの粗度係数として記載されている最小値 0.012 および最大値 0.016 に概ね合っている。B 地区においては、最小値 0.0136 および最大値 0.0192 とかなり大きな値となっている。この原因としては、B 地区の供用年数が 50 年を超えており、粗骨材周辺部のモルタル分の脱離が多く、そのために、凹凸面の高低差が大きくなったもの考えられる。

Fig. 23 に算術平均粗さ Ra と最大高さ Rz との関係を示す。B 地区において最大の粗度係数を示したのは、算術平均粗さ最大の点であり、その時の最大高さは 26.4 mm であ

った。また、同図からは次の 2 点が指摘できる。a) 算術平均粗さ Ra と最大高さ Rz との関係は線形の関係の有していること、b) B 地区を除く地区においては最大高さがほぼ 10 mm 程度となっていること、である。a) については、5 地区のデータを統合して最小二乗法による線形近似を求めたところ、決定係数は 0.93 となり、相関が高いことが示された。これは、現場において簡易的に最大高さを求めることができれば、表面粗さの指標としてもある程度信頼のおけるデータを取り得ることを示唆している。具体的には、剛性の高い定規などをコンクリート表面に当て、その定規下面から最大谷深さと思われる地点までの長さをノギスなどで求めれば、最大高さが求まる。このことは、レーザー変位計などが用意できない現場における簡易粗さ指標の算出が期待できることを示唆するものである。また、b)



Fig. 20 E 地区の状況
Canal state in the E district

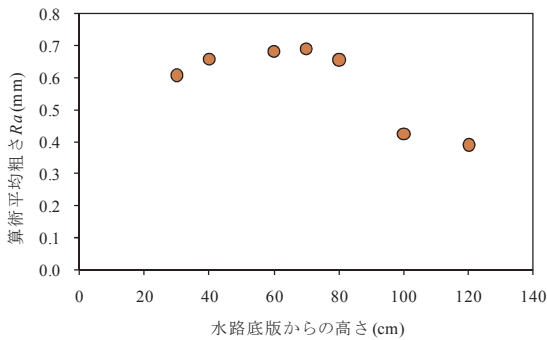


Fig. 21 E 地区の算術平均粗さ R_a
Arithmetic average roughness R_a versus the height of the canal sidewall from the bottom in the E district

については、佐藤ら (2008) がコンクリートにおける表面から粗骨材の頂部までの距離が概ね 6 mm 以下であることを示していることから、供用 40 年程度の多くの水路では、最大高さ 10 mm + 6 mm = 16 mm 程度が竣工時からの摩耗した深さであると推定できる。これは、今後の摩耗予測を行う上での重要な知見と考えられる。

Fig. 24 に算術平均粗さ R_a と最大高さ R_z とから求めた推定粗度係数の関係を 1:1 直線とともに示す。この図より、粗度係数 0.015 を中心としてそれより大きな粗度係数においては、から求めた推定粗度係数の値がから求めた値よりも大きく、粗度係数 0.015 より小さな領域では、逆にから求めた値の方が大きくなる傾向が見られる。

(7) 水路における摩耗状況と頭首工における摩耗状況との比較

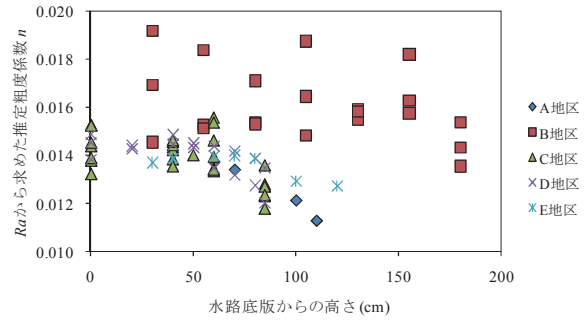


Fig. 22 推定粗度係数
Estimated roughness coefficient from arithmetic average roughness R_a versus the height of the canal wall from the bottom

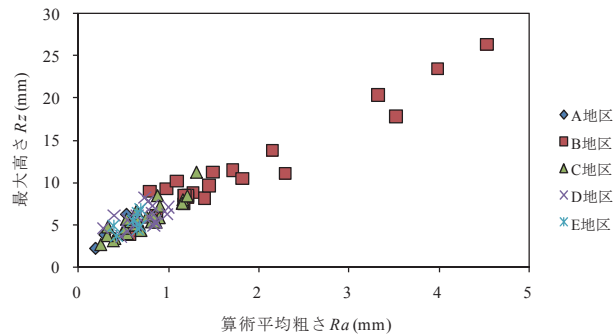


Fig. 23 算術平均粗さ R_a と最大高さ R_z との関係
Maximum height R_z versus arithmetic average roughness R_a

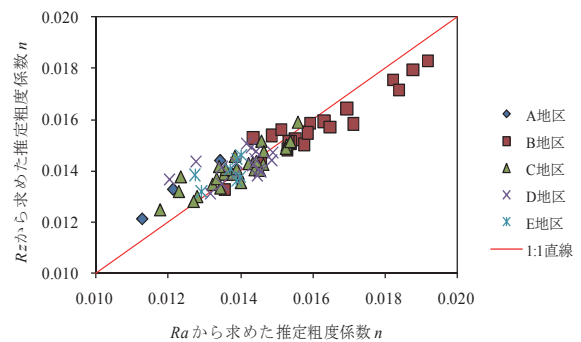


Fig. 24 R_a および R_z から求めた推定粗度係数の関係
Estimated roughness coefficient from R_z versus that from R_a

Fig. 25 に F 地区の状況を示す。左写真は頭首工のエプロン部を下流側から撮影したもの、また、右写真はエプロン部の摩耗状況を接写したものである。左写真からは、水みち部分が存在すること、つまり、局所的に摩耗深さが大きなところが生じていることが読み取れる。このような通路が生じる原因としては、エプロン部に到達した礫や岩が水みち部分に落ち込み、その部分を転がることで、摩耗進行が他の部分よりも速くなったことが考えられる。右写真および Fig. 26 からは、粗骨材とその周辺部のモルタル部とがくんで削れたように一様に摩耗が進行していることが読み取れる。そして、衝撃で損傷したと考えられる骨材も散見される。また、粗骨材はある程度周辺のモルタル部が摩耗すると脱離していることが示されている。

これらの摩耗状況と例えば Fig. 14 の水路の摩耗状況と



Fig. 25 F 地区（頭首工）の状況
Apron state of head works in the F district



Fig. 26 摩耗表面の拡大
(白丸で囲った部分は、粗骨材の脱離した痕)
Macrograph of abraded surface. White circles indicate the desorption pits of coarse aggregate.

を比較すると大きく相違していることがわかる。水路側壁の摩耗では、コンクリートの骨材はほとんど摩耗せず、周りのモルタル部だけが摩耗し、摩耗表面が凹凸の状況を形成している。この両者の摩耗状況の相違は、摩耗機構の相違および材料の相違に起因していると考えられる。頭首工エプロン部においては、流水中に含まれる礫による転がり・衝撃摩耗が主要因と考えられ、一方、用水路側壁部においては、流水および流水中の砂分によるエロージョン摩耗が主要因と考えられる。

また、コンクリート材料の相違では、頭首工エプロン部においては、水セメント比の小さい高強度コンクリートが用いられているため、骨材周りのモルタル部の耐摩耗性能

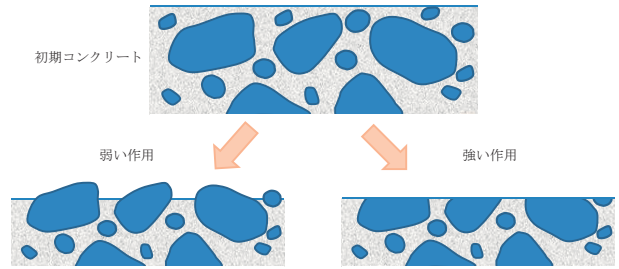


Fig. 27 摩耗作用と摩耗状況
Concepts of weak and strong erosion action, and the results of eroded states by each action



Fig. 28 補修後に摩耗された G 地区の水路状況
Eroded canal state after repair in the G district. The polymer cement paste is lost, the fine aggregate remains at the surface.

が高いのに対し、水路側壁部においては、頭首工エプロン部に比べて水セメント比が大きいコンクリートが用いられているために骨材周りのモルタル部の耐摩耗性能が低くなっている。これらの原因が摩耗表面の形成に差異をもたらしていると考えられる。

なお、両摩耗機構の作用力の比較では、粗骨材の摩耗を進行させる礫による転がり・衝撃摩耗が、粗骨材の摩耗を進行させない流水および砂によるエロージョン摩耗よりも大きいと考えられる。本論文では、前者を強い摩耗作用、後者を弱い摩耗作用と便宜上分類する。これらの摩耗作用と摩耗状況との関係を図示すると **Fig. 27** となる。

(8) ポリマーセメントモルタルの摩耗状況

G 地区の状況を **Fig. 28** に示す。左写真より、ポリマーセメントモルタルを用いた補修工法においても、数年の供用

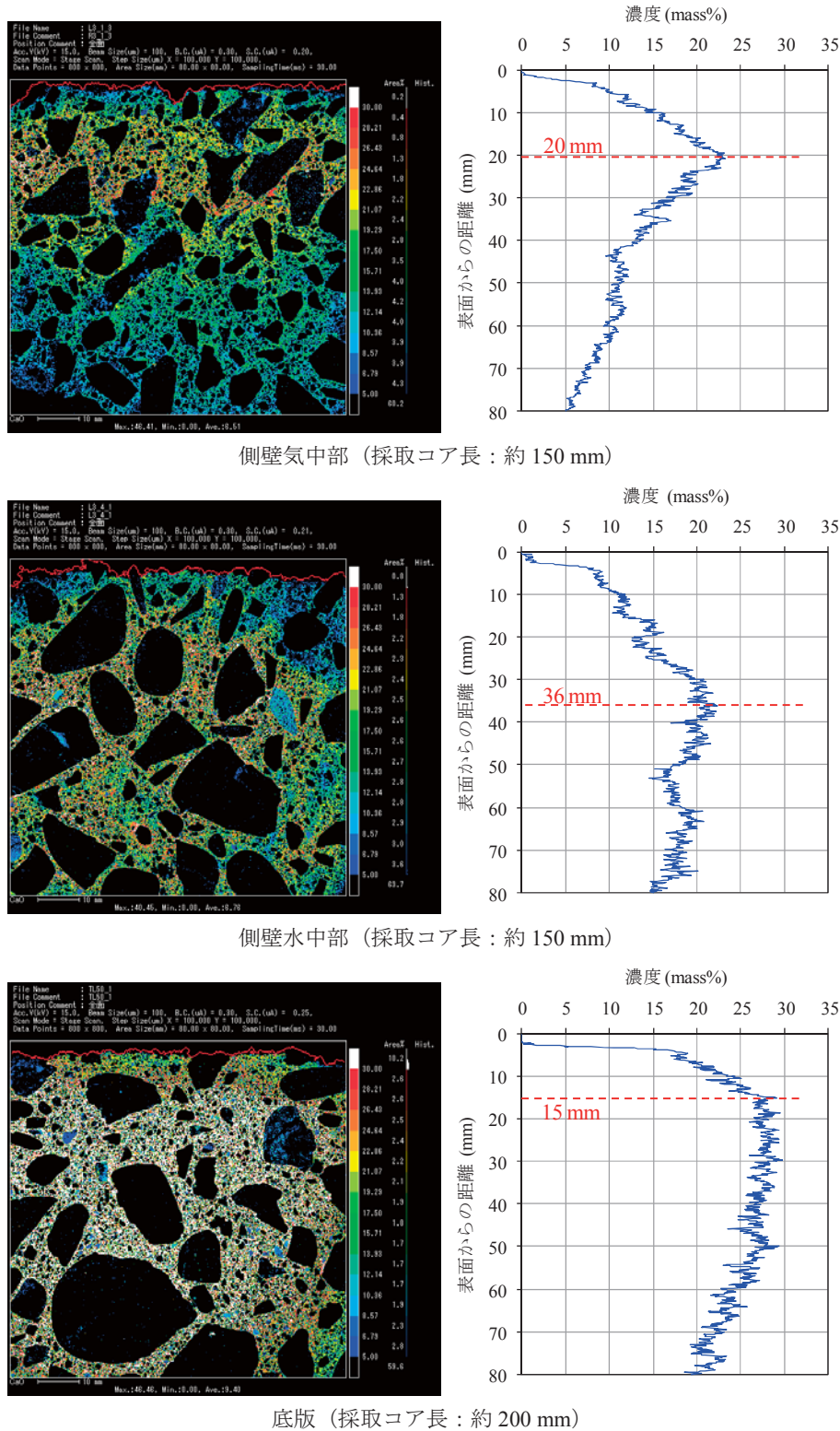


Fig. 29 D地区の側壁気中部、側壁水中部、底版のCa 2次元分布画像およびCa濃度分布 (2次元分布画像上方の赤実線は試験体表面、また、濃度分布の赤破線は溶脱フロントを示す。)

2-dimensional distribution image and concentration profile of Ca in canal concrete specimen in the D district. From the upper: sidewall in the air portion, sidewall in submerged portion, and the bottom.

で表面が若干粗くなっていることがわかる。その状況をマイクロSCOPEにより拡大すると(右写真)、細骨材周りのセメントペースト部が脱離している状況がわかる。この状況より、摩耗進行の過程は、先にセメントペースト部が脱離し、次に細骨材が脱離すると考えられる。ポリマーセ

メントは普通セメントよりも引張り、接着性などに優れることから、結合材としてのポリマーを含まない普通コンクリートにおいても、セメントペースト部の脱離から細骨材の脱離へと摩耗が進行するものと判断される。

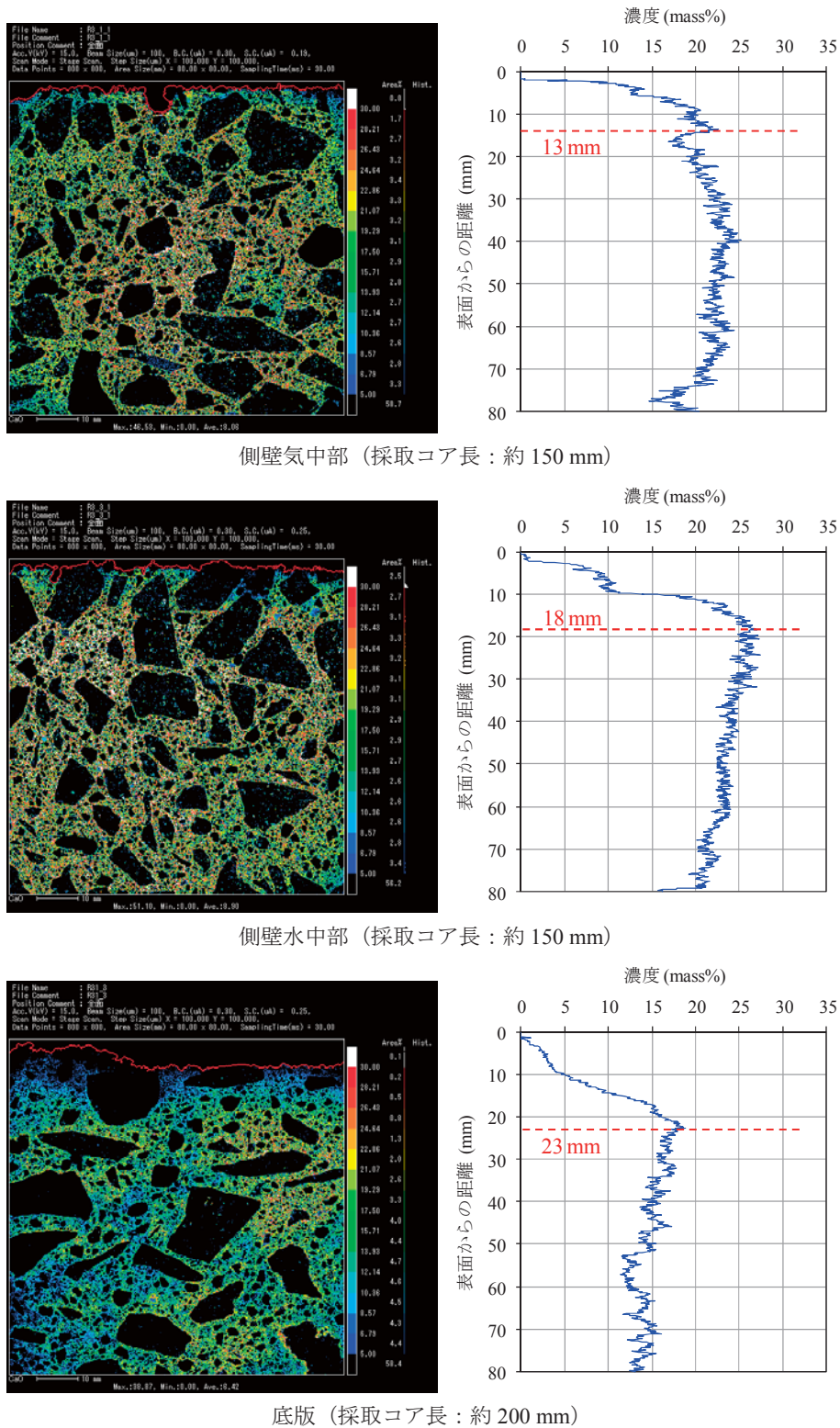


Fig. 30 E 地区の側壁気中部，側壁水中部，底版の Ca 2 次元分布画像および Ca 濃度分布 (2 次元分布画像上方の赤実線は試験体表面，また，濃度分布の赤破線は溶脱フロントを示す。)

2-dimensional distribution image and concentration profile of Ca in canal concrete specimen in the E district. From the upper: sidewall in the air portion, sidewall in submerged portion, and the bottom.

b 元素分析

D 地区および E 地区より採取したコアによる EPMA 分析結果を Fig. 29 および Fig. 30 に示す。各地区とも水路側壁気中部，水路側壁水中部，底版の 3 体である。分析対象元素は，Ca，Si，S，Al の 4 元素としたが，ここでは，Ca

についてのみ検討する。その理由は，水と長期間接触しているコンクリートにおいては，Ca の溶脱が進行し，コンクリート組織の脆弱化がコンクリートの力学的特性に影響を及ぼすことが課題となっているからである (眞嶋ら，1991；古澤，1997；出口ら，2000；大即ら，2001；安田ら，

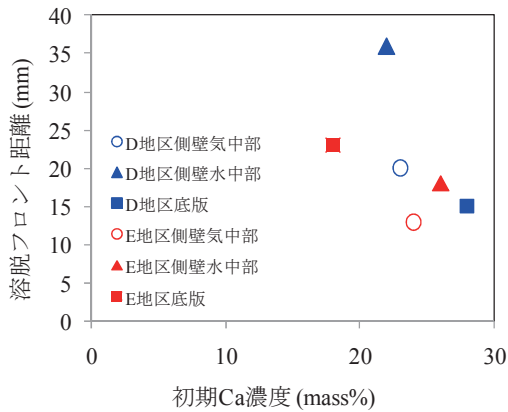


Fig. 31 初期Ca濃度と溶脱フロント距離との関係
Distance from the specimen surface to the Ca leaching front versus the initial Ca concentration

2001；横関ら，2002；土木学会コンクリート委員会化学的侵食・溶脱研究小委員会，2003；内田ら，2004)。また，農業用コンクリート水路におけるCa溶脱状況に関する指摘も近年なされている（石神ら，2005；久田，2008；森ら，2009）。図のCa濃度分布には，溶脱フロントと考えられる位置を破線で示すとともに表層からの距離を記載した。

これらの図より，(1)全てのコアにおいて表層付近はCa濃度が低下していること，(2)表面から溶脱フロントまでの深さは13～36mm程度，(3)溶脱フロント付近のCa濃度は18～30%程度，(4)気中部の表層においてもCa濃度は低下すること，となっていることが判明した。また，コア表面を摩耗フロントとすれば，溶脱フロントの方が深く進行している状況にあることが示された。なお，D地区気中部コアのCa濃度では，水路内面側へのCa濃度低下がある一方，背面側にも急激にCa濃度が低下している傾向が示された。コア採取位置の水路側壁背面は気中に露出しており，地下水に接触できる環境にはなく，このような傾向が示された原因は不明である。

溶脱フロント付近のCa濃度をコンクリート打設初期のCa濃度と想定した場合の初期Ca濃度と溶脱フロント距離との関係をFig. 31に示す。この図より，ばらつきはあるものの，Ca濃度の高い方が溶脱フロント距離は小さくなっていることが示された。つまり，Ca濃度の高いコンクリートでは溶脱進行が遅く，Ca濃度の低いコンクリートでは溶脱進行が速いことを示していると考えられる。

c 実水路における摩耗状況

農業用コンクリート水路においては，摩耗が進行したコンクリート表面で粗骨材が露出し，凹凸の大きな形状が現れている。その摩耗状況から，水流および水流中の砂などによるエロージョン摩耗が進行していると考えられる。しかし，40年程度供用された水路においても初期表面からの最大摩耗深さは16mm程度であると推定された。ただし，骨材露出は水路の粗度係数を大きくし，通水性能を低下させる原因ともなるため，対象水路において通水性能が要求

性能を満たしているかどうかを確認する必要がある。

なお，農業用コンクリート水路からのCa溶脱については，EPMA分析の結果から明らかとなったが，Ca溶脱が農業用コンクリート水路の摩耗特性に与えている影響については，本調査では明らかとなっていない。この影響については，第III章で検討する。

4 結論

本章では，農業用コンクリート水路の実態調査より，供用後数十年が経過したコンクリート表面状況およびCa溶脱状況について明らかにした。得られた結果を以下に示す。

- (1) 水路側壁における算術平均粗さは，気中部より水中部において，表面が粗くなっており，同じ気中部および水中部においても水路底版に近くなるほど表面が粗くなる傾向にある。この理由としては，底版に近づくほど水に接触して摩耗作用を受ける時間が増加することが考えられる。
- (2) D地区における左右岸の算術平均粗さには相違があり，右岸の方がより表面が粗い状況であり，このような差異が生じた理由としては，材料，施工において何らかの差が生じ，そのために右岸側において耐摩耗性に劣るコンクリートとなったこと，また，右岸側が南面しているために環境条件の相違が耐摩耗性に影響を及ぼしたことも考えられる。
- (3) 5地区についてから推定した粗度係数の最小値はA地区の0.0113，最大値はB地区の0.0192となった。
- (4) B地区を除く地区においては，推定粗度係数が0.0113～0.0156となっており，土地改良事業計画設計基準・設計「水路工」に現場打ちコンクリートの粗度係数として記載されている最小値0.012および最大値0.016に概ね合っている。
- (5) 算術平均粗さ R_a と最大高さ R_z との関係は線形の関係を有している。
- (6) B地区を除く地区においては最大高さがほぼ10mm程度となっている。
- (7) 供用40年程度の多くの水路では，最大高さ16mm程度が竣工時からの摩耗した深さである。
- (8) 農業用コンクリート水路においては，その摩耗状況から，水流および水流中の砂などによるエロージョン摩耗が進行しており，セメントペースト部が脱離し，続いて，細骨材，粗骨材の順で脱離過程が進んでいると考えられる。
- (9) EPMA分析した全てのコアにおいて表層付近はCa濃度が低下しており，表面から溶脱フロントまでの深さは13～36mm程度，そして，溶脱フロント付近のCa濃度は18～30%程度であることが判明した。
- (10) コア表面を摩耗フロントとすれば，溶脱フロントの方が深く進行している状況にあることが示され

た。

- (11) 溶脱フロント付近の Ca 濃度をコンクリート打設初期の Ca 濃度と想定した場合、Ca 濃度の高い方が溶脱フロント距離は小さくなっていることが示され、Ca 濃度の高いコンクリートでは溶脱進行が遅く、Ca 濃度の低いコンクリートでは溶脱進行が速いことを示していると考えられた。

Ⅲ 水噴流摩耗試験

1 緒論

農業水利施設においては、流水にさらされる部位で摩耗劣化が進行する。農業水利施設の摩耗進行は、構造物の断面を減少させ、安全性能および耐久性能を低下させるとともに、構造物の通水表面の平滑性を著しく損ね、粗度係数を大きくし、水理性能を低下させる原因となる。農業水利施設の機能を保全するためには、構造物の各部位で生じている摩耗機構を解明するとともに、補修材料などの耐摩耗性能を照査するための促進摩耗試験を確立する必要がある。

第Ⅱ章で述べたように農業水利施設における摩耗現象は大きく2種類に分類される。一つは、頭首工エプロン部に見られるコンクリートの骨材および骨材周辺のセメントペーストがほぼ一様に摩耗進行する現象である。もう一方は、用水路側壁部および底版部で見られるコンクリートの骨材がほとんど摩耗せず、骨材周辺のセメントペーストが摩耗し、摩耗表面が凹凸の状況を形成する現象である。この両者の摩耗現象の相違は、摩耗機構の相違および材料の相違に起因していると考えられる。

摩耗機構は、固体と固体との相対運動（すべり、転がり、衝撃、振動）と、固体と液体との相対運動（エロージョン、キャビテーション）に分類される（堀口，1993）。しかし、摩耗現象の多くは、単一の摩耗機構によるものではなく、複数の摩耗機構が複合的に作用しており複雑である。頭首工エプロン部においては、流水中に含まれる礫による転がり・衝撃摩耗が主要因と考えられ、一方、用水路においては、流水および流水中の砂分によるエロージョン摩耗が主要因と考えられる。また、コンクリート材料の相違では、頭首工エプロン部においては、水セメント比の低い高強度コンクリートが用いられているため、骨材周辺のモルタル分の耐摩耗性能が高いのに対し、水路においては頭首工エプロン部に比べて水セメント比が高いコンクリートが用いられているために骨材周辺のモルタル分の耐摩耗性能が低くなっている。これらの原因が摩耗表面の形状に差異をもたらしていると考えられる。

なお、農業水利施設における両摩耗機構の作用力の比較では、粗骨材の摩耗を進行させる礫による転がり・衝撃摩耗が、粗骨材の摩耗を進行させない流水および砂によるエロージョン摩耗よりも大きい。本論文では、前者を強い摩耗作用、後者を弱い摩耗作用と便宜上分類する。

このように摩耗機構が異なる場合の材料の耐摩耗性能

の評価では、想定する摩耗機構に応じた摩耗試験を選定する必要がある。摩耗現象の多くは複数の摩耗機構が作用して複雑であるため、種々の試験方法が提案されている一方、規格化された試験方法が少ない状況にある（石田，2007）。現在、セメント系材料の摩耗試験に用いられている JIS 規格としては、JIS A 1453「建築材料及び建築構成部分の摩耗試験方法（研摩紙法）」、JIS K 7204「プラスチック摩耗輪による摩耗試験方法」などがある。また、米国 ASTM 規格としては、ASTM C 418「サンドブラストを用いたコンクリートの耐摩耗性標準試験方法」、ASTM C 1138「コンクリートの耐摩耗性標準試験方法（水中法）」などがある。規格以外では、「ロッド式すりへり試験機」（奥田，1984）、「掃流式摩耗試験機」（杉田ら，1986）、「衝撃摩耗試験機」（豊福・豊福，1999）などを用いた試験方法が提案されている。

頭首工エプロン部における転がり・衝撃摩耗を模擬する試験としては、ロッド式すりへり試験、衝撃摩耗試験、JIS K 7204 試験が適切であると考えられる。一方、用水路におけるエロージョン摩耗を模擬する試験としては、ASTM C 418、ASTM C1138、掃流式摩耗試験が考えられる。著者らは、エロージョン摩耗を対象とした試験機として、ASTM C 418 よりも試験機の構造が単純で経済性に優れ、ASTM C 1138 および掃流式摩耗試験よりも試験体形状の自由度が高い（採取コアによる試験も可能な）試験機である水噴流摩耗試験機を開発した（石神ら，2005）。本試験機は、試験体に高圧の水噴流を衝突させることにより、流水によるエロージョン摩耗を促進して模擬する試験機である。近年では、コンクリートのエロージョン摩耗の促進試験として、水噴流を用いた試験も研究されてきている（Momber and Kovacevic，1994；Hu et al.，2002；Liu et al.，2006）。

本章では、農業水利施設で生じるエロージョン摩耗を模擬することを目的として開発した水噴流摩耗試験機をセメント系材料に適用し、セメント系材料のエロージョン摩耗特性について把握するとともに水噴流摩耗試験の有用性について述べる。

2 水噴流摩耗試験の試験方法

a 水噴流摩耗試験機

水噴流摩耗試験機の概要を Fig. 32 に示す。本試験機は、試験体を取り付ける本体と水噴流を発生させる吐出装置により構成される。本体は、試験体（標準試験体 296×142×60 mm、または、小型試験体 70×70×20 mm を専用治具にて）6 個を設置可能な回転ドラムとドラムを回転させる駆動モーターで構成される。駆動モーターの回転を制御することにより、ドラムを一定速度で回転させることが可能である。吐出装置は、プランジャポンプ、耐圧ホース、ノズルより構成される。吐出装置の使用液体は水道水で、プランジャポンプにより加圧された後、耐圧ホースを経て本体の回転ドラム中心部に設置されたノズルより試験体に噴射される。

水噴流は、Fig. 33 に示すように扇形に広がり、試験体表

面に衝突する。吐出圧力は、プランジャポンプとノズルとの間に取り付けられた圧力計により測定する。また、吐出流量は、プランジャポンプの貯水槽に水道水を供給するホースに取り付けた流量計により測定する。

吐出速度は、吐出流量をノズル孔面積で除して求める。ノズル孔形状は楕円形に近いので、孔面積は画像計測により算出する。また、求めた孔面積と同じ面積の円の直径を等価直径とし、スタンドオフ距離（例えば小林ら，1987）は、ノズル試験体間距離をノズル孔等価直径で除した値とする。

b 摩耗量計測

試験体の摩耗量として、摩耗重量（気中重量，水中重量）および摩耗深さを計測する。計測は、摩耗試験前および摩耗試験時間経過後に実施する。各摩耗試験時間経過後に試験体を試験機から外し、水中重量および気中重量を測定した後、レーザー変位計（KEYENCE LK-500，分解能 10 μm）により摩耗深さを計測する。Fig. 34 に示すように試験体の長辺方向にレーザー変位計を移動させながら 1 mm 間隔で摩耗深さのデータを収集する。これを短辺方向に 5 mm 間隔で計 11 本の走査線について計測し、試験体中心部の 50 mm 四方に含まれる深さデータ（51×11=561 点）の平均値を摩耗深さとする。なお、計測対象以外の試験体は、常に水槽中に静置し、乾燥しないように配慮する。これは、試験体内部の乾燥が重量測定結果に及ぼす影響を排除するためである。

3 水噴流摩耗試験における吐出圧力および回転速度の影響

水噴流摩耗試験は、高速の水噴流を試験体に衝突させる試験であるため、水噴流と試験体との衝突状況の変化により、試験体の摩耗性状も相違する。この衝突状況の変化は、主に吐出装置、吐出圧力および回転速度の相違が作用すると推測された。そのため、本項では水噴流摩耗試験の適切な試験条件を設定するための基礎的な性能確認を目的として、吐出圧力および試験体の回転速度の変化がセメントペースト試験体の摩耗性状に及ぼす影響について検討した結果について述べる。

a 試験方法

(1) 試験条件

最大吐出圧力の異なる 2 種類の吐出装置を用いた。吐出装置の仕様を Table 4 に示す。吐出速度は、吐出流量を

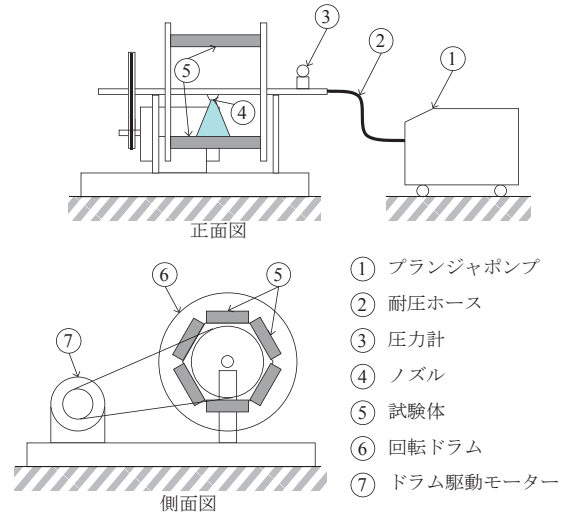


Fig. 32 水噴流摩耗試験機の概要
Overview of the water jet erosion tester

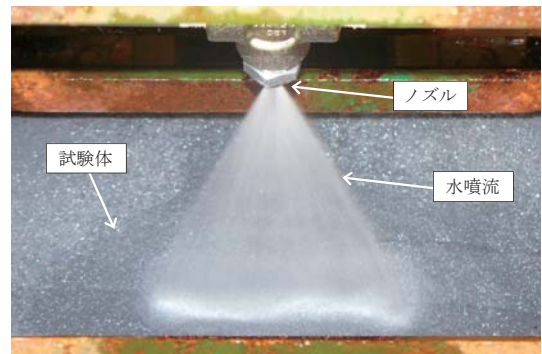


Fig. 33 水噴流の状況
Testing state of water jet

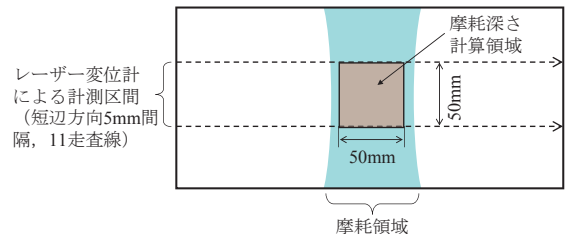


Fig. 34 試験体の摩耗深さ計測
Measurement domain of the erosion depth of specimen

ズル孔面積で除して求めた。ノズル孔形状は楕円形に近いので、孔面積は画像計測により算出した。また、求めた孔面積と同じ面積の円の直径を等価直径として示した。使用した 2 種のノズルは外形寸法が異なるため、ノズルから試験体表面までの距離には 10 mm の差が生じた。

Table 4 吐出装置の仕様
Specifications of two types of water jet tester

吐出装置	最大吐出圧力 (MPa)	実験吐出圧力 (MPa)	実験吐出流量 (L/min)	実験吐出速度 (m/s)	ノズル孔面積 (m ²)	ノズル噴角 (°)	ノズル孔等価直径 d (mm)	ノズル試験体間距離 x (mm)	スタンドオフ距離 x/d (mm/mm)
A	4.9	3.0 - 4.5	19.1 - 23.4	82.7 - 102	3.8×10 ⁻⁶	40	2.2	70	32
B	20	4.5 - 20.0	11.9 - 25.2	79.4 - 168	2.5×10 ⁻⁶	40	1.8	80	44

(2) 試験体

試験体は、早強ポルトランドセメントを使用したセメントペースト硬化体とし、水セメント比は、JIS R 5201 の曲げ試験・圧縮試験用のモルタル試験体の水セメント比である W/C=50%、そして、より圧縮強度の高い試験体の摩耗傾向を把握するために W/C=40%の2種の配合とした。試験体は、内寸法 296×142×60 mm の型枠に打設し、材齢1日で脱型した後に 20 °C で水中養生し、材齢 14 日で試験開始とした。配合と各材齢における圧縮強度を **Table 5** に示す。

(3) 試験ケース

試験は **Table 6** に示す 9 ケースを実施した。吐出装置 A を用いて 3.0~4.5 MPa、また、吐出装置 B を用いて 4.5~20.0 MPa の吐出圧力の範囲を試験した。吐出装置 A の試験においては W/C=50%および 40%の試験体を各 2 個、吐出装置 B の試験においては各 3 個を使用した。また、標準の回転速度は 30 rpm とし、A04560 および B20060 のケースについては 60 rpm とした。なお、B20060 については、試験機の都合により、試験時間 1~5 時間までを材齢 14 日で実施し、6~10 時間までを材齢 24 日で実施した。

b 結果と考察

(1) 吐出圧力と吐出流量および吐出速度との関係

吐出圧力と吐出流量との関係を **Fig. 35** に示す。吐出装置 A、B ともに吐出圧力の増加により、吐出流量も増加している。吐出圧力 4.5 MPa では、吐出装置 A は吐出装置 B の約 1.9 倍の吐出流量となっている。

吐出圧力と吐出速度との関係を **Fig. 36** に示す。図には、吐出圧力が損失無しにすべて速度エネルギーに変換された場合の吐出速度を Bernoulli の定理より、

$$v = \sqrt{2p/\rho} \tag{5}$$

ここに、 p : 圧力、 ρ : 水の密度

として算定した曲線も示した。しかし、実際の吐出速度は渦、剥離、粘性などの影響で、式(5)の v より小さくなり、

$$v_l = c_v \sqrt{2p/\rho} \tag{6}$$

Table 5 試験体の配合および圧縮強度
Water-cement ratio and compressive strength of specimen

記号	W/C (%)	圧縮強度(N/mm ²)			
		σ_7	σ_{14}	σ_{21}	σ_{28}
WC50	50	37.0	43.9	45.9	47.1
WC40	40	58.5	62.8	66.9	66.7

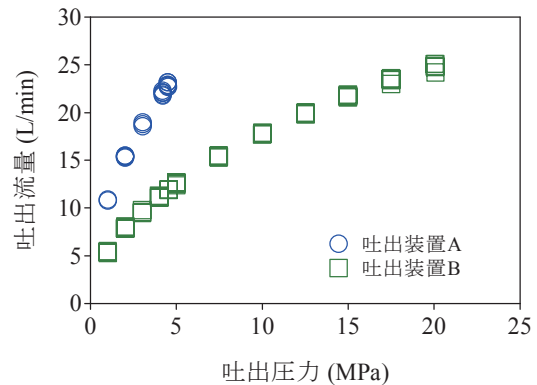


Fig. 35 吐出圧力と吐出流量との関係
Comparison of discharge flow rate as a function of the discharge pressure with the device A and B

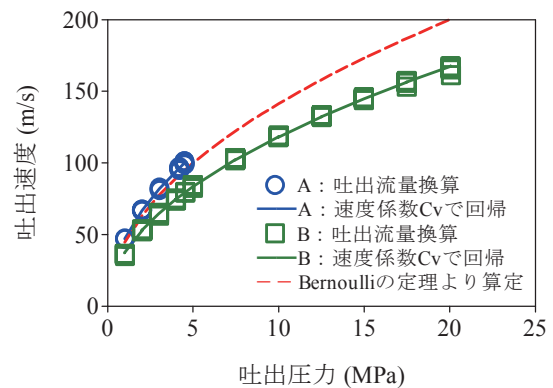


Fig. 36 吐出圧力と吐出速度との関係
Comparison of water jet flow velocity as a function of the discharge pressure with device A and B

Table 6 試験ケース
Test cases

記号	吐出装置	吐出圧力 (MPa)	回転速度 (rpm)	総試験時間 (hour)	計測時間間隔 (hour)
A03030	A	3.0	30	260	20
A04030	A	4.0	30	140	20
A04530	A	4.5	30	140	20 ^{*1}
A04560	A	4.5	60	140	20
B04530	B	4.5	30	140	20
B10030	B	10.0	30	10	1
B15030	B	15.0	30	10	1
B20030	B	20.0	30	10	1
B20060	B	20.0	60	10 ^{*2}	1

ここに、 c_v ：速度係数となる（八尋編，1996）。

Fig. 36には、吐出速度を式(6)で回帰した曲線も示した。最小二乗法により求めた速度係数 c_v は、吐出装置 A については 1.06，吐出装置 B については 0.836 となった。吐出装置 A の吐出速度は、 c_v が 1 を超えているために、式(5)の v を上回っている。これは、吐出圧力，吐出流量，ノズル孔面積の計測における精度上の問題が原因と考えられる。

吐出装置 B については、 $v_1 < v$ であることから妥当であると考えられるが、吐出装置 A とほぼ同様の機器および手法を用いていることから、同様に検証が必要と考えられる。

(2) 摩耗断面形状

摩耗試験終了後の摩耗断面形状の例を Fig. 37 に示す。図中の各断面は、Fig. 34 の摩耗計算領域の中心を通り、長辺方向に平行な断面を示している。吐出装置 A を用いた A04530 においては、試験体の横断位置中心 0 mm 付近を対称としてほぼ均等に摩耗が進行していると考えられる。一方、吐出装置 B を用いた B04530 および B20030 においては、横断位置 15 mm 付近で摩耗の進行が速く、摩耗進行に偏りがあることが示されている。これら以外の B シリーズ

の試験体も同様の摩耗状況にあった。これは、吐出装置 B において水噴流の分布に偏りがあることが原因と考えられた。しかし、先述した摩耗深さの計算では、横断位置 -25 ~ +25 mm 間の摩耗位置データを用いており、同範囲は摩耗範囲（概ね -35 ~ +33 mm）の約 74% を占めること、そして、最深部を同範囲内に含むことから、摩耗進行の偏りが摩耗深さの評価へ及ぼす影響は小さいと判断し、以下の

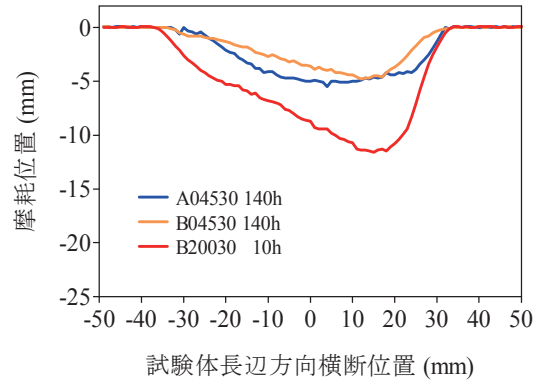


Fig. 37 摩耗断面形状の例
Examples of the eroded cross-sectional shape

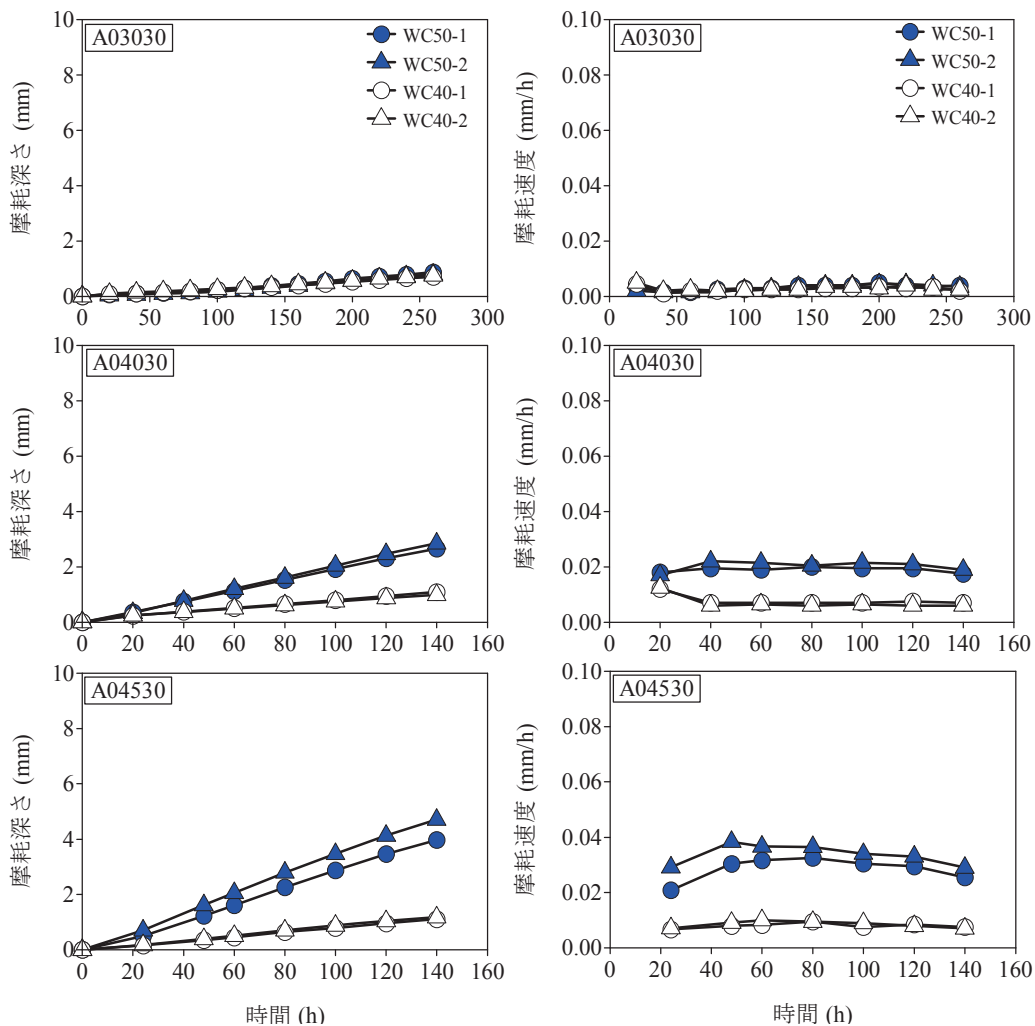


Fig. 38 吐出装置 A における試験時間と摩耗深さおよび摩耗速度との関係
Erosion depth and rate at each discharge pressure using the device A. From the upper: 3.0, 4.0, 4.5 MPa.

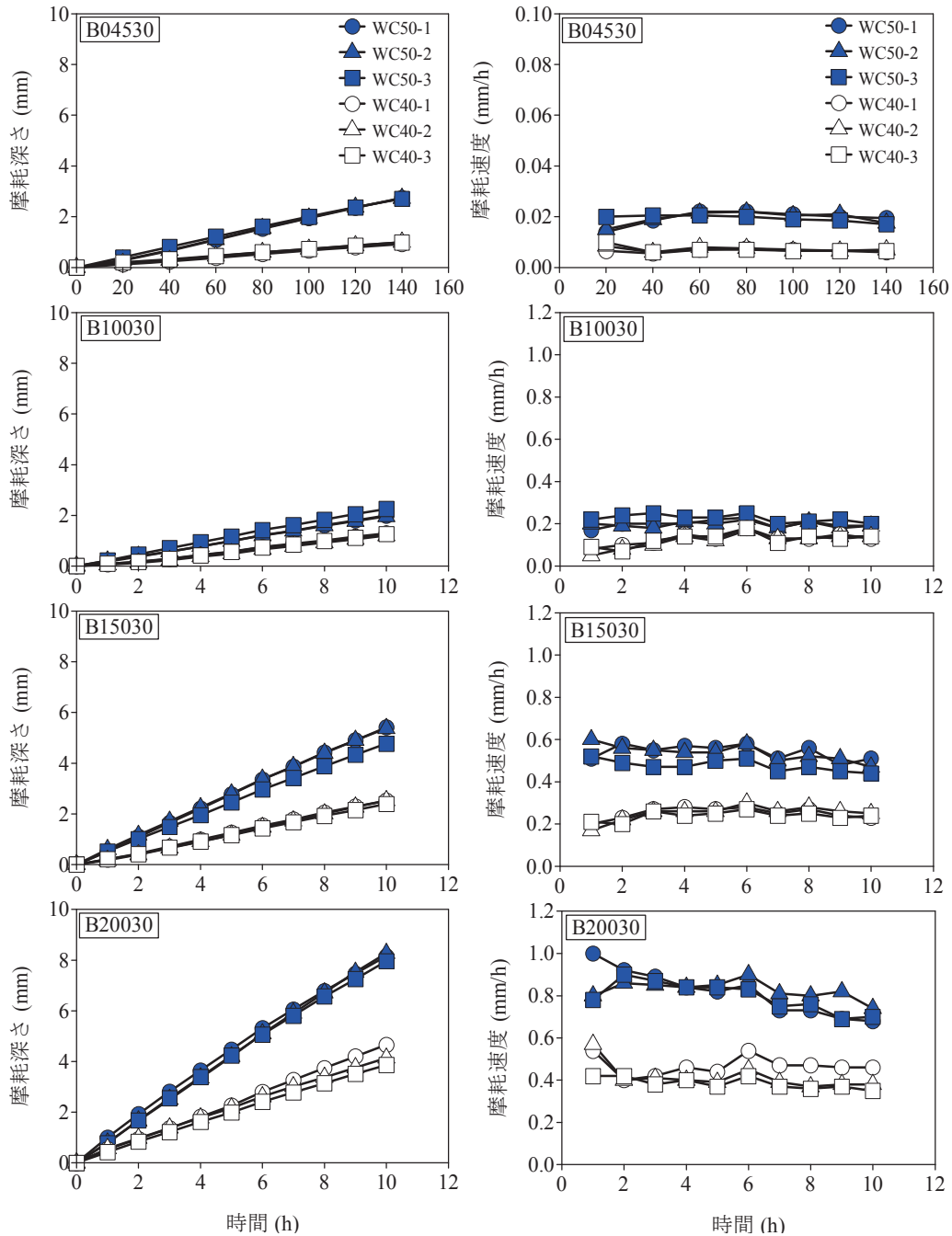


Fig. 39 吐出装置 B における試験時間と摩耗深さおよび摩耗速度との関係

Erosion depth and rate at each discharge pressure using the device B. From the upper: 4.5, 10.0, 15.0, 20.0 MPa.

の分析を行った。

(3) 吐出圧力と摩耗深さおよび摩耗速度との関係

吐出装置 A における試験時間と摩耗深さおよび摩耗速度との関係を Fig. 38 に示す。摩耗深さの図より、①いずれの吐出圧力においても摩耗深さは時間経過に伴い線形的に増加すること、②吐出圧力が高くなるほど、摩耗の進行が速くなること、③3.0 MPa においては摩耗の進行に水セメント比の相違による差が認められないこと、④4.0 MPa 以上においては W/C=50%は 40%に比較して摩耗の進行が速いこと、が示された。これらは、摩耗進行が吐出圧力の影響を受けること、また、耐摩耗性は試験体の水セメ

ント比に依存していることを示唆している。

摩耗速度の図より、初期の 20 時間において速度のばらつきはあるが、それ以後はばらつきが小さく、ほぼ一定の値となることが示された。ただし、W/C=50%の 4.5 MPa における摩耗速度は、100 時間以降は減少傾向にあるように見え、これは、摩耗進行に伴ってノズルから試験体までの距離が増加したことによる試験体表面への液滴の衝撃圧の低下が原因と考えられる。

吐出装置 B における試験時間と摩耗深さおよび摩耗速度との関係を Fig. 39 に示す。吐出装置 B においても A と同様の傾向となり、①時間経過に伴い摩耗深さが線形的に

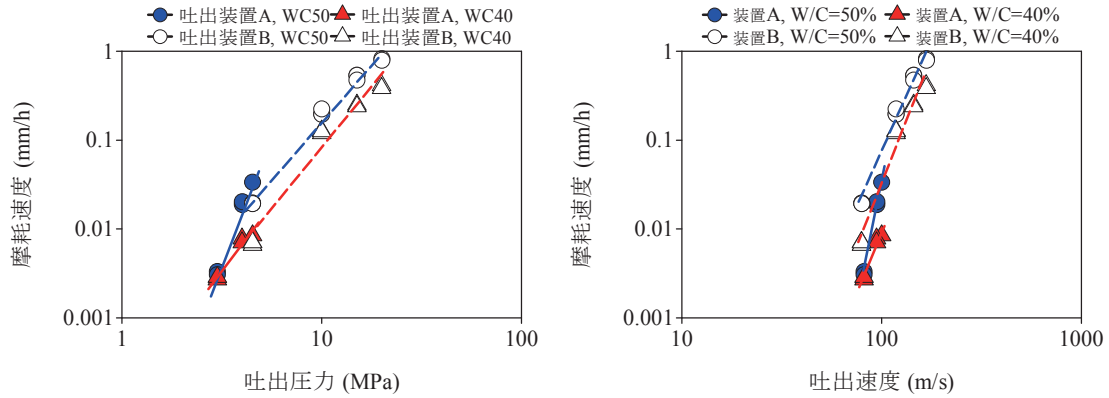


Fig. 40 吐出圧力および吐出速度と摩耗速度との関係
Erosion rate versus the discharge pressure and the water jet flow velocity

Table 7 累乗関数による回帰
Regression parameters of the test results by power function

独立変数	吐出装置	W/C (%)	パラメータ		決定係数
			a	b	
吐出圧力	A	50	6E-06	5.74	0.988
	B	50	5E-04	2.55	0.987
	A	40	1E-04	2.81	0.957
	B	40	1E-04	2.78	0.967
吐出速度	A	50	4E-25	11.48	0.988
	B	50	5E-12	5.10	0.987
	A	40	5E-14	5.62	0.957
	B	40	2E-13	5.56	0.967

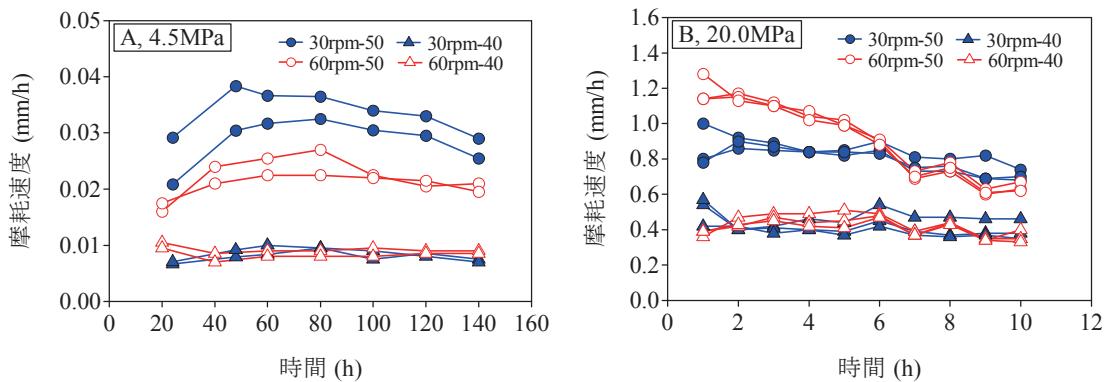


Fig. 41 回転速度 30 rpm および 60 rpm における試験時間と摩耗速度との関係
Comparison of the erosion rate with the test drum rotation at 30 and 60 rpm with discharge pressure 4.5 and 20.0 MPa

増加すること、②吐出圧力が高くなるほど、摩耗の進行が速くなること、③W/C=50%は 40%に比較して摩耗の進行が速いこと、が示された。また、摩耗速度においては、4.5 MPa では初期 20 時間、10 MPa 以上では初期 1~2 時間にばらつきはあるもののそれ以降はほぼ一定の値を示した。

吐出装置 A と B の吐出圧力 4.5 MPa における同水セメント比の全試験時間を通した摩耗速度の平均値を比較すると、吐出装置 A が B を上回っており、吐出装置 B に対する比率で W/C=50%が約 148%、W/C=40%が約 114%であった。この原因としては、吐出装置 A が B に比較して吐出流量が約 1.9 倍と多いこと、また、ノズルから試験体まで

の距離が 10 mm 小さいことが考えられる。

吐出圧力および吐出速度と摩耗速度との関係を Fig. 40 に示す。ここでは、各試験ケースにおける全試験時間の平均摩耗速度をプロットした。また、吐出装置および水セメント比別の累乗関数による回帰直線も併せてプロットした。累乗関数は、

$$E_R = aX^b \tag{7}$$

ここに、 E_R ：摩耗速度、 X ：吐出圧力または吐出速度、 a, b ：パラメータ
で表し、パラメータおよび決定係数を Table 7 に示した。

同じ吐出装置および同じ水セメント比の条件においては、累乗関数で近似できることが示された。これは、吐出圧力および吐出速度の増加により、摩耗速度が加速的に増大することを示している。また、このことは同じ吐出装置を用いた試験であれば、試験体において最低2点の吐出圧力における摩耗速度が既知であれば、2点以外の吐出圧力における摩耗速度が推測可能であることを示している。つまり、異なる吐出圧力で試験された試験体の摩耗速度に関する相対評価が可能となることを示唆している。なお、吐出圧力と摩耗速度との関係における W/C = 40% の吐出装置 A と吐出装置 B の回帰式はほぼ一致したが、それ以外の同水セメント比の試験体における回帰式は一致しなかった。このことは、吐出装置 A および B における摩耗性状が異なることを示唆している。その原因としては、スタンドオフ距離、吐出流量、液滴径などの水噴流の形態などの相違が考えられる。

(4) 回転速度と摩耗速度との関係

回転速度 30 rpm と 60 rpm における試験時間と摩耗速度との関係を Fig. 41 に示す。W/C=40% の試験体の摩耗速度は、4.5 MPa、20.0 MPa とともに回転速度の変化による明確な差は見られない。一方、W/C=50% の試験体の摩耗速度は、4.5 MPa で 30 rpm が 60 rpm を上回り、20.0 MPa では反対に 60 rpm が 30 rpm を上回る結果となり、相反する傾向が示された。このため、上記の結果は試験体のばらつきなどにより得られた可能性があり、この回転速度の範囲内においては、その影響を考慮する必要はないと考えられる。

4 セメントペースト試験体およびモルタル試験体の摩耗特性

本節では、水噴流摩耗試験をセメントペースト、モルタル試験体に適用し、各試験体の基礎的な摩耗特性について検討した結果について述べる。

a 試験方法

(1) 試験体

試験体は、モルタル2種とペースト1種の計3種の配合とした (Table 8)。材料は、普通ポルトランドセメントおよび JIS R 5201 に準拠した標準砂を使用した。M40 の S/C は、単位容積中の細骨材量が M50 と等しくなるように設定した。また、試験体は、内寸法 296×142×60 mm の型枠に打設し、各配合について2個を作製した。材齢1日で脱型した後水中養生し、材齢28日で試験開始とした。

(2) 試験条件

試験条件を Table 9 に示す。吐出装置 A を用い、試験時間は標準で28日 (672時間) とした。試験体の摩耗量としては、摩耗重量 (気中、水中) および摩耗深さを計測した。計測は、摩耗試験前および1, 2, 3, 4, 7, 14, 21, 28日経過後に実施した。各試験時間経過後に試験体を試験機から外し、水中重量および気中重量を測定した後、レーザー変位計により摩耗深さを計測した。

Table 8 試験体の配合および圧縮強度
Mix proportion and compressive strength of specimen

記号	W/C (%)	S/C	圧縮強度 σ_{28} (N/mm ²)
M50	50	3.0	39.1
M40	40	2.6	51.1
C50	50	0	40.7

Table 9 試験条件

Conditions of water jet erosion test	
項目	条件
吐出圧力	4.5 MPa
吐出流量	24.1 l/min
ドラム回転速度	30 rpm
ノズルの噴射水扇状角度	40°
試験体寸法	296×142×60 mm



Fig. 42 試験終了後の試験体 (M40)
Surface state of the specimen after erosion test (M40)

b 結果と考察

(1) 摩耗量

摩耗試験終了後の試験体の状況を Fig. 42 に示す。この図より、摩耗領域が試験体中央部を帯のように縦断していること、また、その領域は長方形ではなく、中心部分の幅が細い形状を有していることがわかる。

試験時間と摩耗重量との関係を Fig. 43 に、気中重量と水中重量から求めた摩耗体積との関係を Fig. 44 に、平均摩耗深さと最大摩耗深さとの関係を Fig. 45 および Fig. 46 に示す。いずれの結果も、ペースト試験体の摩耗量が大きいこと、モルタル試験体は、摩耗初期においてペースト試験体の摩耗量を上回ることもあるが、直ぐに低下すること、を示している。これは、骨材の有無が原因と考えられる。つまり、ペースト試験体では、ほぼ均質構造であるために線形的に摩耗量が増加するのに対し、モルタル試験体では、水噴流による摩耗作用に強い骨材部分とより弱いペースト部分から構成されており、骨材が表面に露出した後は、摩耗を受ける表面に占めるペースト部分の面積が縮小していくために、摩耗量が低下していくと判断された。これは、試験終了後の M50 (Fig. 47) および C50 (Fig. 48) の摩耗状況からも示唆された。

M50 では、表面に多くの骨材が露出し、凹凸の大きな状況となっていた。これは、水噴流の摩耗作用に弱いペースト分が先に流出し、摩耗に強い骨材が表面に残った結果であると考えられた。骨材の中には、周囲のペースト分は流出しているものの、その下面のペースト分との付着のみで残っている骨材も多く、頂に骨材を載せた独立峰が乱立す

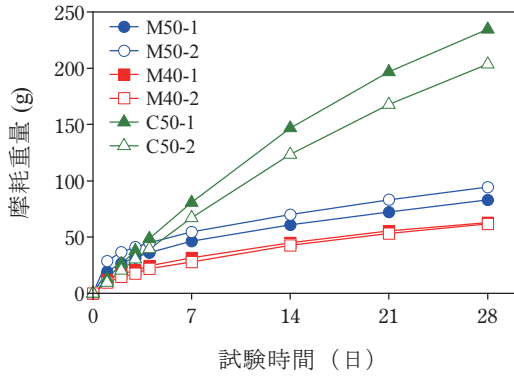


Fig. 43 試験時間と摩耗重量との関係
Comparison of the erosion weight of mortar and cement paste specimen

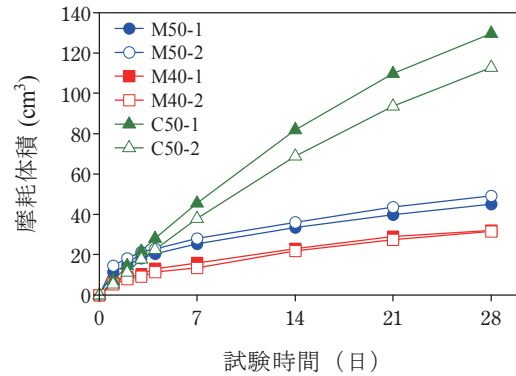


Fig. 44 試験時間と摩耗体積との関係
Comparison of the erosion volume of mortar and cement paste specimen

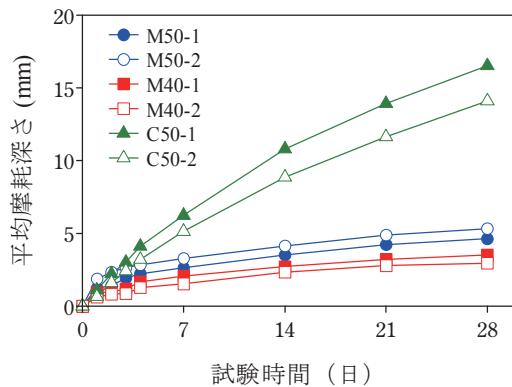


Fig. 45 試験時間と平均摩耗深さの関係
Comparison of the average erosion depth of mortar and cement paste specimen

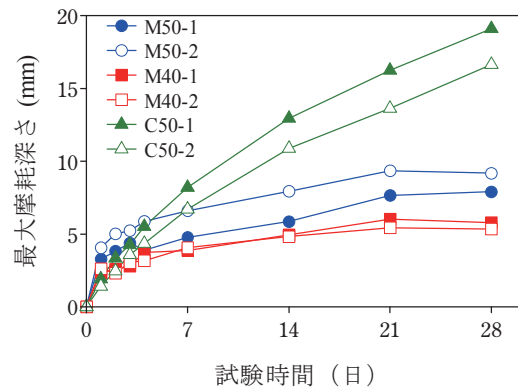


Fig. 46 試験時間と最大摩耗深さの関係
Comparison of the maximum erosion depth of mortar and cement paste specimen



Fig. 47 M50 の摩耗状況 (28 日後)
Eroded surface state of specimen M50 after test (28 days)

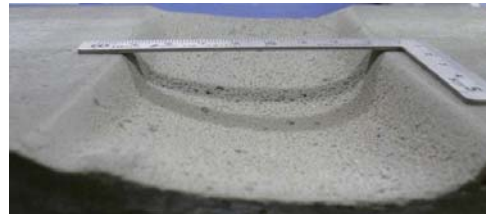


Fig. 48 C50 の摩耗状況 (28 日後)
Eroded surface state of specimen C50 after test (28 days)

の様相を呈していた。その結果、骨材が水噴流から下面のペースト部分を保護することとなり、摩耗の進行が抑制されたと考えられた。これに対して、C50 では、摩耗表面がなだらかなままで摩耗が進行している状況が示されている。

ところで、摩耗量は、摩耗重量、摩耗体積、平均摩耗深さとも同様の傾向を示すが、評価指標としては、平均摩耗深さが優れていると判断された。理由としては、摩耗深さの測定によって、表面形状を定量的に把握することが可能であること、また、摩耗以外の原因による試験体の欠けなどが生じて、摩耗深さの測定値が影響を受けることが少ないことなどが挙げられる。本試験においては、脆性材料であるセメント系試験体による長時間の試験となることから、試験体の取り付け・取り外し、また、計測器への移

動などの一連の作業において試験体の一部が欠けるなどの損傷が生じることは十分に予想される。試験体が損傷した場合は、重量測定だけでは、試験結果を適正に評価することは困難となる。これに対して、摩耗深さは、摩耗面に対する損傷でなければ、試験体に多少の損傷が生じて、試験結果を適正に評価することが可能な頑強な摩耗指標である。

(2) 摩耗速度

日当たりの平均摩耗深さを平均摩耗速度として示したのが Fig. 49 である。初期 7 日目までは各試験体とも変動が大きいが、7 日目以降は変動が少ない結果となった。また、モルタル試験体およびペースト試験体ともに平均摩耗速度が低下していることが示された。7 日目以降の平均摩耗速度の低下については、モルタル試験体とペースト試験

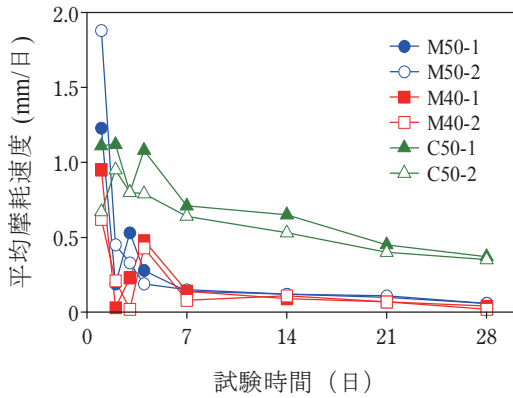


Fig. 49 試験時間と平均摩耗速度の関係
Comparison of the average erosion rate of mortar and cement paste

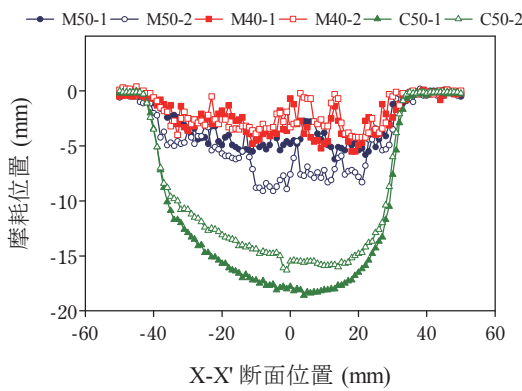


Fig. 51 X-X' 断面の摩耗状況 (28日後)
Cross-sectional erosion shape at X-X' (28 days)

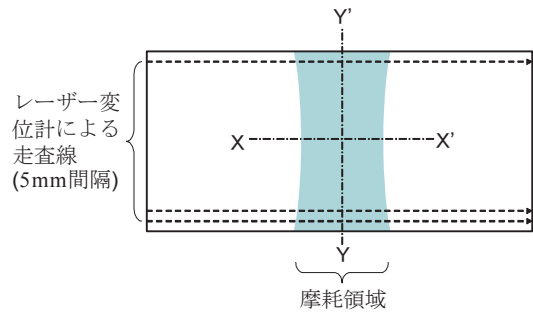


Fig. 50 試験体における摩耗形状検討断面
Measurement position of erosion surface shape at the specimen

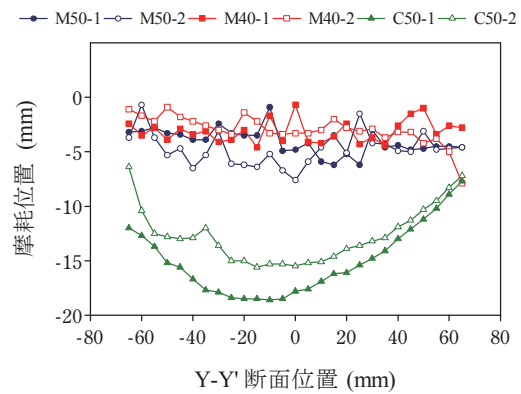


Fig. 52 Y-Y' 断面の摩耗状況 (28日後)
Cross-sectional erosion shape at Y-Y' (28 days)

体では原因が異なると考えられた。前述したようにモルタル試験体では、骨材とペースト部で摩耗の進行速度が異なり、骨材が露出すると摩耗の進行が抑制される。そのため、時間経過とともに摩耗表面積に占める骨材表面積の割合が増加し、摩耗速度が低下したと考えられた。それに対して、ペースト試験体の場合は、骨材部分とペースト部分のような不均一性を有するモルタル試験体とは異なり、ほぼ均一な構造であるため、本来であれば、一定の摩耗速度を維持することが予想された。しかしながら、ペースト試験体は、摩耗速度が速いために、摩耗進行に伴って、試験体の摩耗表面が水噴流噴射ノズルに対して相対的に後退することとなり、その結果、水噴流の到達距離が伸び、摩耗表面における水噴流の衝撃力が低下したため、摩耗速度が低下したように見えると考えられた。

また、単位容積中の細骨材量を同じに設定したモルタル試験体 M50 と M40 においては、7日目以降の平均摩耗速度は M40 に対して M50 は約 1.2~2 倍の摩耗速度で推移した。これは、細骨材量が同じであれば、水セメント比の相違によるペースト分の強度の相違が摩耗進行に影響を及ぼしたと判断された。

(3) 摩耗形状

各試験体における Fig. 50 の X-X' および Y-Y' 断面における試験終了後の摩耗状況を Fig. 51 および Fig. 52 に示す。

前述の、モルタル試験体の摩耗表面が骨材の露出により、表面の凹凸が大きく、一方、ペースト試験体では、なかなか摩耗表面を形成している状況が定量的に示されている。但し、C50-2 の Y-Y' 断面の -40 mm 辺りの突起部分は、その部分の色が周辺と比較し濃い灰色であったことからセメント分が多く、強度の高い部分であったために摩耗進行が抑制されたと推測された。

X-X' 断面のペースト試験体の摩耗形状から、摩耗状況は均一ではなく、摩耗に偏りがあることが判明した。この原因として考えられるのは、本試験機の水噴流噴射ノズルから噴出される水噴流に偏りがあることである。ノズルからは水噴流が 40° の角度で拡がって放出されることになっているが、これにはノズルの加工精度およびノズルの取り付け角度が大きく影響する。しかし、以下の検討では平均値を元に議論を進めているため、この程度の摩耗の偏りは影響ないと判断された。

Y-Y' 断面のペースト試験体の摩耗形状から、試験体の端部よりも中央部で摩耗が進行していることが示された。この原因としては、水噴流噴射ノズルから試験体表面までの距離の相違が挙げられる。ドラムに設置された試験体が、回転しながら水噴流を受ける構造であることから、Fig. 53 に示すように試験体表面への水噴流の衝突角度および水噴流の到達距離は試験体表面の位置によって異なっ

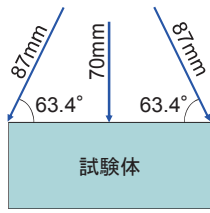


Fig. 53 供試体への水噴流衝突角度および到達距離
Water jet impact angle and the distance from the nozzle to the specimen

いる。試験体中心部では、水噴流衝突角度は 90° で水噴流到達距離は 70 mm、これに対して端部では、水噴流衝突角度 63.4° で水噴流到達距離は 87 mm となっている。試験体の中心部から端部までの間は、水噴流衝突角度は $63.4^\circ \sim 90^\circ$ 、水噴流到達距離は 87~70 mm の間で変化する。水噴流到達距離が短いほど摩耗表面における水噴流の圧力は高いと考えられる。したがって、試験体の摩耗形状は Fig. 52 に示されるように中心部付近で摩耗深さが最大となったと判断された。

ところで、水噴流衝突角度が $63.4^\circ \sim 90^\circ$ であることの影響として、前述の頂に骨材を載せた独立峰が乱立する様相を呈するモルタル試験体の摩耗形状が挙げられる。このような形状であれば、試験体表面と平行方向からの強い圧力が作用する場合には、その骨材は容易に流出し、独立峰が乱立するような形状にはならないと考えられる。ところが衝突角度が直角に近いことから、外力が鉛直方向から主として働くため、その外力は骨材を通じて試験体に伝達されるのみで、骨材流出が遅れる原因となっていると推測される。

5 コンクリート試験体の摩耗特性

a 試験方法

(1) 試験体

試験体は、普通ポルトランドセメントを用いて、Table 10 の配合により、水セメント比 3 種 (40%, 50%, 60%) のコ

ンクリートを型枠 (内寸法 $296 \times 142 \times 60$ mm) に打設して作製した。配合は各水セメント比において骨材の単位量が等しくなるように設定した。試験体は、各水セメント比について 2 体とし、材齢 1 日で脱型した後に水中養生し、材齢 28 日で試験を開始した。材齢 28 日における圧縮強度を Table 11 に示す。

(2) 試験条件

試験条件を Table 12 に示す。吐出装置 B を用い、計測は試験体の摩耗深さを対象に試験開始前、1, 2, 3, 5, 10, 30, 50, 100, 200 時間後に実施した。各計測時において、レーザー変位計を用いて試験体の摩耗深さを測定し、試験体中央部 50×50 mm の領域における摩耗深さの平均値を平均摩耗深さとした。また、単位時間当たりの平均摩耗深さの変化を摩耗速度とした。

b 結果と考察

各試験時間経過後における摩耗状況について水セメント比 40% の試験体を例として Fig. 54 に示す。試験開始前においては、表面に骨材は見られないが、試験の経過とともに先に細骨材、次いで粗骨材が表面に露出する過程が確認された。これは、試験体への水噴流の衝突によって、セメントペーストが脱離し、骨材が露出する過程であると考えられた。また、0~30 時間までは表面状態に変化が見られるのに対し、50 時間以降は試験時間が長くなるにもかかわらず、大きな変化は見られなかった。これは、摩耗表面がほぼ露出した骨材で占められたために、セメントペーストへの水噴流の衝突が妨げられ、摩耗が進行しなかった結果であると考えられた。

試験時間と平均摩耗深さとの関係を Fig. 55 に示す。この図より、いずれの水セメント比においても、試験開始から 10 時間程度までは急激に摩耗深さが増加するが、10 時間を超えると摩耗深さの増加が減速することが確認された。この結果は、IV3a におけるモルタル試験体と同様の傾向であり、試験時間と摩耗深さとの間にほぼ線形の関係が

Table 10 コンクリート配合
Mix proportion of concrete specimen

粗骨材の最大寸法 (mm)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				
			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 A
20	40	43.0	155	387	746	1050	0.968
20	50	43.0	170	340	746	1050	0.850
20	60	43.0	182	303	746	1050	0.757

Table 11 試験体の圧縮強度
Compressive strength of specimen

記号	W/C (%)	圧縮強度 σ_{28} (N/mm ²)
W/C40	40	41.4
W/C50	50	35.4
W/C60	60	25.1

Table 12 試験条件
Conditions of water jet erosion test

項目	条件
高压水噴射圧力	15 MPa
高压水噴射水量	22.0 l/min
ドラム回転速度	30 rpm
ノズルの噴射水扇状角度	40°
試験体寸法	$296 \times 142 \times 60$ mm

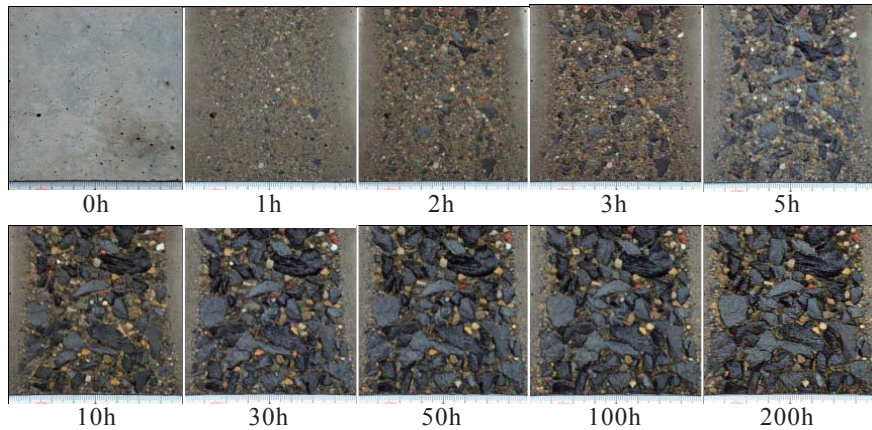


Fig. 54 試験体の摩耗状況の経時変化 (W/C40-1)
Changes of eroded surface state of specimen versus test time

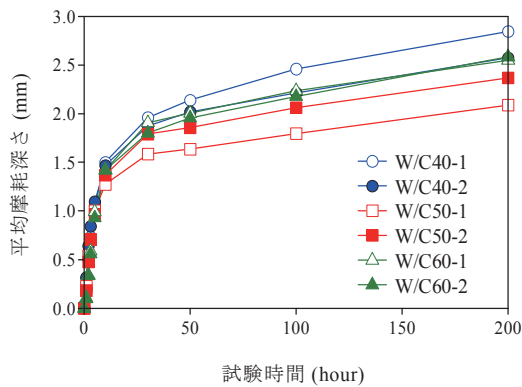


Fig. 55 平均摩耗深さの経時変化
Average erosion depth versus test time

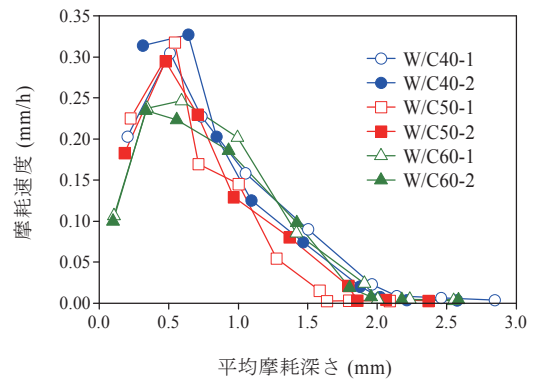


Fig. 56 平均摩耗深さと摩耗速度との関係
Average erosion rate versus the erosion depth

見出されたセメントペースト試験体とは異なっている。これは、先述したようにコンクリート試験体においても、骨材露出が摩耗進行を抑制することが原因と考えられた。

一方、水セメント比の相違による摩耗深さの進行には明確な差異が認められなかった。この原因としては、(1)水セメント比が摩耗進行へ及ぼす影響よりも試験体内部における骨材の形状および配置が摩耗進行へ及ぼす影響が大きかったこと、(2)試験体打設時のブリーディングの影響で摩耗試験面の耐摩耗性が変化したことなどが考えられた。

平均摩耗深さと摩耗速度との関係 (Fig. 56) では、平均摩耗深さが 0.5 mm 前後に摩耗速度のピーク (0.22~0.33 mm/h) があり、それ以深では低減し、2 mm 以深では摩耗速度が0.003~0.004 mm/hとピーク時の約1.1~1.9%で推移することが示された。なお、平均摩耗深さ 0.5 mm 以浅における摩耗速度が小さな理由としては、初期表面の平滑性により、水噴流の衝突エネルギーが散逸するためであると考えられた。

上記の結果より、コンクリート試験体の摩耗過程は、セメントペーストの脱離が先行し、細骨材、粗骨材の順で骨材が露出し、試験表面における骨材露出領域の拡大がセメントペーストの脱離を抑制し、その結果、摩耗進行が遅減する過程であると考えられた。また、このような過程を辿る原因は、水噴流の衝突に対してセメントペーストの凝集



Fig. 57 現地水路ブロックの摩耗状況
Eroded state of concrete blocks in an actual canal

力およびセメントペーストと骨材との付着力が骨材の凝集力に比べて弱いためであると推定された。

6 コンクリートブロック試験体の摩耗特性

石川県においては水路にブロック積構造が多く採用されていることから、ブロック積水路の機能診断および評価の確立が課題となっている。本節では、積みブロックの摩耗 (Fig. 57) を対象として、ブロック模擬試験体の摩耗過程および摩耗による推定粗度係数の変化について促進摩耗試験により検討した。

Table 13 コンクリート配合
Mix proportion of concrete specimen

配合名	目標強度 (N/mm ²)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				
				水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 A
18N	18	70	39.0	165	236	745	1165	3.54
30N	30	47	39.0	165	351	708	1108	3.51

Table 14 蒸気養生パターン
Steam curing conditions of concrete block specimen

	始温	前置き	昇温	最高温度	合計
時間 (h)	—	1	2	4	7
温度 (°C)	20	20	20/h	60	—

Table 15 試験体の圧縮強度
Compressive strength of specimen

配合名	圧縮強度 (N/mm ²)		
	1日	7日	14日
18N	11.6	20.7	23.8
30N	23.2	41.2	43.5

a 試験方法

(1) 試験体

ブロック模擬試験体は2種類の配合 (Table 13) により各4体を作製した。配合名18Nの試験体は、昭和40年代に製造された間知ブロックの強度を再現するため、当時の示方配合に近い配合で作製した試験体である。また、配合名30Nの試験体は、現在製造されているブロックの配合の一つであり、比較のために作製した試験体である。材料は、普通ポルトランドセメント、手取産骨材 (最大寸法 20 mm)、高性能減水剤を使用した。各試験体の蒸気養生パターンおよび圧縮強度を Table 14 および Table 15 に示す。

(2) 試験条件

ブロック模擬試験体の促進摩耗試験は、吐出装置 B により実施した。試験条件は、吐出圧力を 10 MPa とし、吐出流量は約 0.018 m³/min であった。2種類の試験体の各3体 (記号 18N-1~3, 30N-1~3) については、促進試験時間 0, 20, 40, 60, 80, 102 時間で試験体の摩耗深さをレーザー変位計により測定するとともに表面状況を写真撮影した。また、摩耗初期の状況を把握するために、2種類の試験体の各1体 (記号 18N-0, 30N-0) については、0, 1, 3, 6, 10, 15, 20 時間で摩耗深さ測定および写真撮影を実施した。

b 結果と考察

(1) 摩耗特性

平均摩耗深さの経時変化を Fig. 58 に示す。平均摩耗深さでは、18N および 30N の両試験体とも、試験開始から 20 時間程度までは、急激に摩耗深さが増加するが、20 時間を超えると摩耗深さの増加が減速することが確認された。これは、コンクリート試験体においては、骨材露出により、骨材背面のセメントペーストの摩耗が抑制されるためである。このような摩耗進行過程は、平均摩耗速度 (Fig. 59) からも確認された。試験 40 時間以降は、平均摩耗速度は低い値で推移し、102 時間では、18N 試験体の平均で 0.0024 mm/h, 30N 試験体の平均で 0.0025 mm/h とほぼ同じ程度となった。一方、試験 20 時間以前では、18N 試験体の平均摩耗速度の方が若干大きな値を示した。これらの結果は、摩耗表面にセメントペーストが存在している摩耗初期においては、水セメント比の相違によるセメントペーストの耐摩耗性の大小が摩耗進行に影響を及ぼすが、摩耗が進行して表面がほぼ骨材露出のみとなった摩耗中期以降では、水セメント比の相違が摩耗進行に影響をほとんど及ぼさないために生じたと考えられる。

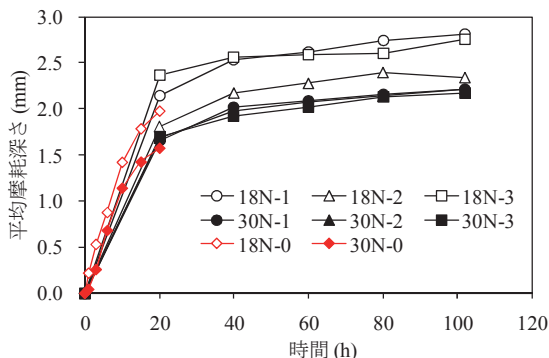


Fig. 58 平均摩耗深さの経時変化
Average erosion depth versus test time

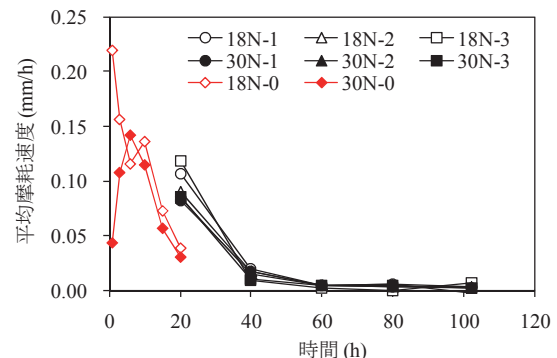


Fig. 59 平均摩耗速度の経時変化
Average erosion rate versus test time

促進試験においては、促進試験時間と現地における実時間との相関を求めることが重要であるが、現地ブロックの摩耗深さ測定が未実施であるため、相関は明らかとなっていない。現地ブロックと試験体との摩耗状況の比較例 (Fig. 60) からは、この現地ブロック例の方が露出した骨材の密度は粗のよう見え、摩耗が進行しているように見られた。

(2) 推定粗度係数

試験 102 時間経過後の平均摩耗深さの大きかった 18N-1 および 30N-2、また、18N-0 および 30N-0 の 4 試験体について、式(2)および(3)よりマンシングの粗度係数を推定した。推定粗度係数の経時変化を Fig. 61 に示す。推定粗度係数も、摩耗深さの経時変化と同様に 20 時間以降は増加が遞減する傾向を示した。これは、摩耗進行の遞減により、表面の凹凸状況に大きな変化が生じないことが原因であると考えられる。試験 102 時間後の推定粗度係数は、18N 試験体で 0.0156、30N 試験体で 0.0145 であった。

7 カルシウム溶脱試験体の摩耗特性

農業用水路などの農業水利施設においては、長期間にわたる水との接触により、コンクリート部材のカルシウム (以下、Ca) 溶脱が進行し、コンクリート表層が変質していることが報告されている (石神ら, 2005 ; 森ら, 2009)。表層の変質がもたらす水和組織の脆弱化は、摩耗の促進や、補修工法において材料が要求される付着強度の低下などの問題の主要因となっている可能性がある。既存の農業水利施設ストックが有する性能を今後も持続的に維持していくためのストックマネジメントの取り組みにおいては、Ca 溶脱が農業水利施設の劣化に及ぼす影響を評価することが必要となる。

本節では、農業用水路などで生じていると推測される Ca 溶脱と摩耗との複合劣化の現象把握を目的として、Ca 溶脱したペースト硬化体の耐摩耗性の低下について把握するとともに、摩耗促進試験を用いた Ca 溶脱領域の力学的特性の変化を測定する手法について検討した結果について述べる。

a 試験方法

(1) 試験体

試験体は、普通ポルトランドセメントを用いたペースト硬化体とし、水セメント比は、40、50、60%の3種の配合とした。試験体は、内寸法 70×70×20 mm の型枠に打設し、材齢 1 日で脱型した後に 20°C で水中養生し、材齢 28 日で溶脱促進試験を開始した。

(2) Ca 溶脱促進試験

セメント系材料からの Ca 溶脱を促進する試験には、浸漬法、通水法、電気的促進法の大きく3種の方法がある。浸漬法は試験体をイオン交換水などの作用水に浸す方法であり、通水法は試験体に高圧でイオン交換水を強制的に通水する方法である。また、電気的促進法は、試験体によって分割されたイオン交換水を満たした水槽の両側に電



Fig. 60 摩耗状況の比較
Comparison of erosion state of surface at an actual canal and at the specimen after accelerated erosion test (102h)

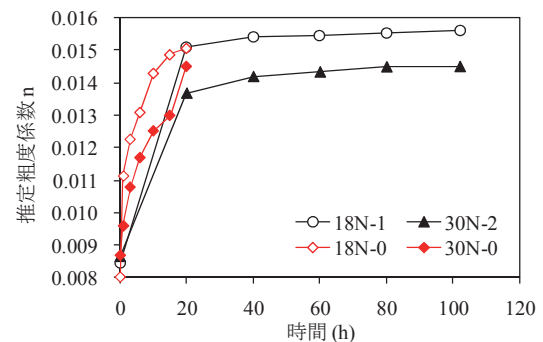


Fig. 61 推定粗度係数の経時変化
Estimated roughness coefficient versus test time

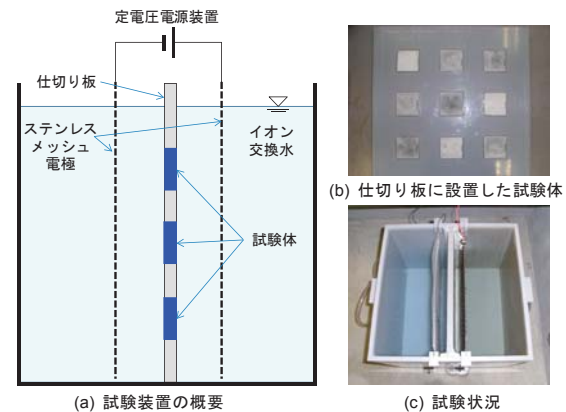


Fig. 62 溶脱促進試験の概要
Overview of accelerated Ca leaching test

位勾配を与えて、カソード側に Ca^{2+} などの陽イオンを強制的に移動させる方法である。ここでは、促進速度の大きな電気的促進法を選定した。電気的促進法で得られる変質試験体は、浸漬法によって得られる変質試験体とほぼ同様であり (斉藤, 1993 ; 尾口ら, 2001)、物性評価に供するための変質試験体入手する方法として有効と考えられている (山本ら, 2002)。電気的促進法である溶脱促進試験の概要を Fig. 62 に示す。装置は、水槽、水槽内に試験体を設置するための仕切り板、ステンレスメッシュ電極、定電圧電源装置およびイオン交換水から構成される。仕切り板には、9 箇所の貫通孔 (72×72 mm) があり、その中に試験体を 70×70 mm の型枠面が Ca 溶脱面となるように非導電性のシリコンで設置した。水槽内をイオン交換水で満たし、電極間に定電圧を作用させて Ca 溶脱を促進させ

る。

定電圧は 60 V とし、電極間で 0.273 V/mm の電位勾配とした。試験時間は 28 日とし、1 週間に 1 回を目処にイオン交換水を全量交換した。

(3) 摩耗促進試験

28 日の溶脱促進試験を終了した試験体を吐出装置 B より、摩耗促進試験を実施した。なお、比較のため、打設後 56 日水中養生した未溶脱の各水セメント比の試験体も同時に試験した。吐出圧力は 10 MPa とし、試験時間は 102 時間とした。

試験体の摩耗状況と計測および試験片採取位置を Fig. 63 に示す。摩耗量は、レーザー変位計により試験体の摩耗深さを計測した。計測は、累積試験時間で、0, 10, 20, 30 分, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 5, 10, 20, 40, 60, 80, 102 時間の計 18 回実施した。試験開始後は、上述の累積試験時間において試験を停止し、試験体を試験機から取り外して計測した。試験体正面の両側には、水噴流の衝突しない幅 10 mm 程度の領域（以下、無摩耗領域）が設定されており、この領域において摩耗は進行しない。この摩耗進行の無い試験体両側の表面を直線で結んで基準位置とし、そこから摩耗面までの距離を摩耗深さとした。摩耗深さは、試験体正面の中心部 40 mm 四方を対象として、5 mm 間隔で 9 本の走査ラインを設定し、各走査ライン上では、1 mm 間隔で 41 点計測した。そして、369 点（41 点×9 本）の計測値の平均値を各累積試験時間における平均摩耗深さとした。

(4) 元素分析

試験体の元素分析は、エネルギー分散型走査型電子顕微鏡 (SEM-EDS) にて分析した。使用した機器は、日本電子 JSM-5600LV および JED-2200 である。

水噴流摩耗試験を終了した試験体において、無摩耗領域から試験片 (70×20×5 mm) を切り出し、それをさらに切断して SEM-EDS 用試験片 (20×20×5 mm 程度) を作製した。分析面には前処理として金を蒸着した。分析は、試験体の二次元的な元素分布を把握するため面分析を実施した。面分析は、試験片の溶脱深さ方向に約 3.6 mm、深さ方向と垂直方向（以下、表面方向）に約 2.8 mm の矩形領域を分析対象とした。分析は、Ca, Si, S, Al, C, Cl, Fe, K, Mg, Mn, Na, O, P の 13 種の元素を選定して実施した。

(5) ビッカース硬さ試験

ビッカース硬さは、微小硬度計（島津微小硬度計 M 型）を用いて測定した。試験力は 2.942 N、試験力の保持時間は 15 秒間とした。ビッカース硬さの算出は次式による。

$$HV = 0.1891 F / dv^2 \tag{8}$$

ここに、HV：ビッカース硬さ、F：試験力 (N)、dv：くぼみの対角線長さの平均値 (mm) である。

試験は、水噴流摩耗試験を終了した試験体から切り出された SEM-EDS 用試験片の残りを試験片とし、溶脱深さ方向の断面を研磨した後、溶脱表面から 1, 2, 3, 4, 5, 7, 10 mm においてビッカース硬さを各 10 点計測した。

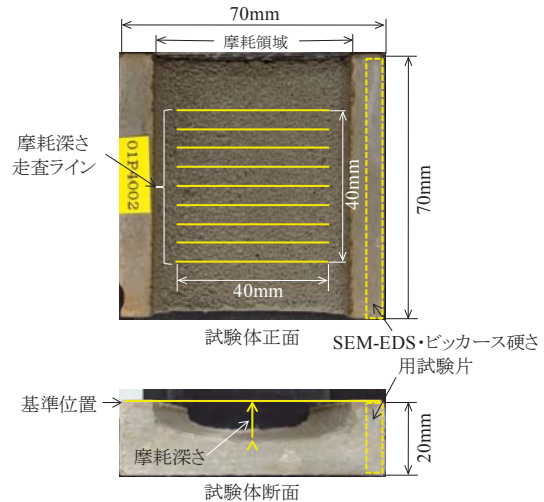


Fig. 63 試験体の摩耗状況と計測および試験片採取位置 Overview of eroded state, erosion depth measurement position and collection position of specimen for SEM-EDS

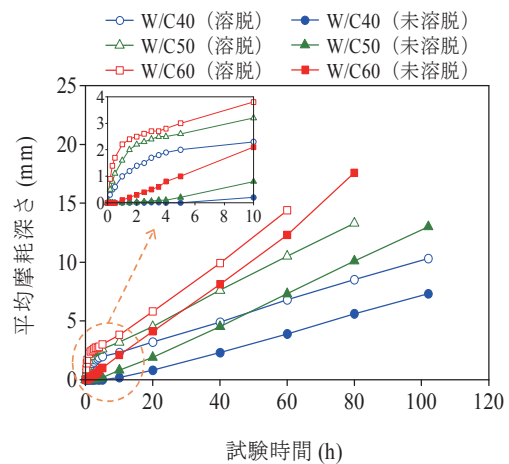


Fig. 64 試験時間と平均摩耗深さとの関係 (左上図は、試験時間 10 時間までの拡大表示) Average erosion depth versus test time

b 結果と考察

(1) 摩耗特性

各水セメント比の溶脱試験体と未溶脱試験体の試験時間と平均摩耗深さとの関係を Fig. 64 に示す。この図より、いずれの水セメント比においても溶脱試験体は、摩耗試験初期の 10 分～2 時間において、急激に摩耗深さが増大し、その後は摩耗深さの増大は漸次低減し、2～4 時間以降は直線的に摩耗深さが増加することが明らかとなった。また、摩耗初期の摩耗深さの増大の程度は、水セメント比により相違し、水セメント比が大きい程その程度が大きかった。これに対して、未溶脱試験体においては、摩耗初期から一貫してほぼ直線的な増加傾向を示した。また、試験時間 10 時間以降の各水セメント比の溶脱試験体と未溶脱試験体との摩耗深さの増加率（図中の直線の勾配で摩耗速度を表す）は、ほぼ同程度となっていた。

摩耗深さと摩耗速度との関係を Fig. 65 に示す。この図より、各溶脱試験体の摩耗速度は表面付近において大きく、摩耗深さが深くなる程、摩耗速度は急激に低下し、約

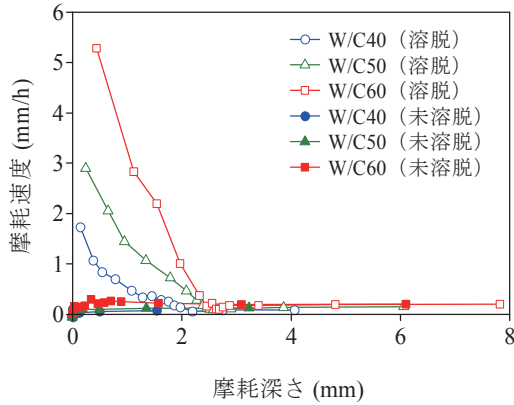


Fig. 65 摩耗深さと摩耗速度との関係
Erosion rate versus erosion depth

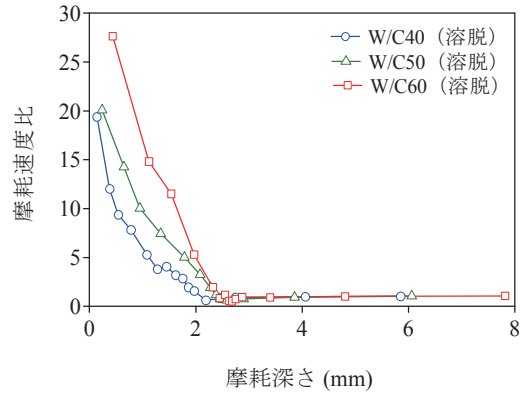


Fig. 66 摩耗深さと摩耗速度比との関係
Erosion rate ratio versus erosion depth

2~3 mm 以深はほぼ一定となることが示された。また、溶脱試験体の 3 mm 以深においては、未溶脱試験体との摩耗速度が同程度であった。

Fig. 66 に各溶脱試験体の 3 mm 以深の摩耗速度の平均値を基準とした時の各摩耗深さにおける摩耗速度比を示す。水セメント比 40, 50, 60% の各試験体の表層付近の摩耗速度比は、各々 19.4 倍, 20.1 倍, 27.6 倍となり、3 mm 以深に比べてかなり大きな摩耗速度であることが示された。しかし、摩耗深さが深くなるにしたがい、摩耗速度比も低下し、3 mm 深付近で約 1 倍となった。

以上の結果より、溶脱試験体においては表面から深さ 3 mm 程度に耐摩耗性の異なる領域の境界があり、未溶脱試験体と比較した場合、3 mm 以浅では耐摩耗性が低く、3 mm 以深では同等の耐摩耗性を有していることが示された。このことから、溶脱試験により試験体表層部 3 mm 以浅が脆

弱化した構造となり力学的特性が変化し、耐摩耗性の低下を生じさせたと推測された。また、耐摩耗性低下の程度が表面付近で摩耗速度比 19.4~27.6 倍程度と極端に低下しているものの、深くなるにしたがい摩耗速度比も小さくなることから、耐摩耗性低下の領域においても脆弱構造は一樣ではなく、深さ方向に変化していることが示唆された。

なお、この耐摩耗性低下領域においては、摩耗促進試験の計測時間の間隔を小さくすることで、耐摩耗性のより詳細な深さ方向プロファイルが得られる可能性を示しており、本研究で用いた水噴流摩耗試験が力学的特性の変化を測定する一つの手法として有用であると判断された。

(2) 溶脱試験体における Ca 溶脱領域

SEM-EDS による面分析の結果である Ca, Si の特性 X 線強度分布を Fig. 67 に示す。いずれの水セメント比においても表層から 2 mm 程度付近に Ca 強度の相違する領域の

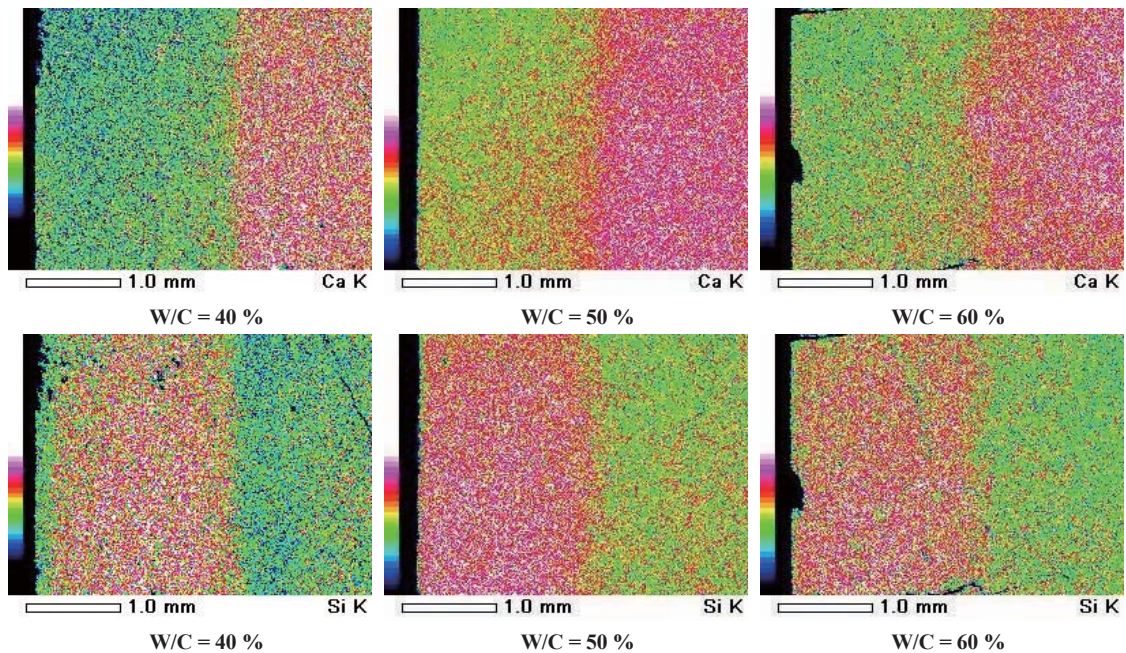


Fig. 67 溶脱試験体における Ca, Si の特性 X 線強度(cps)分布
(図中の左辺が溶脱表面で、右辺側に向けて深さ方向となる。各図の左側カラーバーは上部ほど高強度を示し、各元素の濃度が高いことを表す。元素記号側の K は特性 X 線の K 系列を示す。)
Characteristic X-ray intensity distribution of Ca and Si in Ca leached specimens

明瞭な境界が存在することが判明した。その境界以浅では Ca 強度が低く、境界以深では Ca 強度が高い。Ca 強度の低い領域は、溶脱試験において Ca が溶脱した領域と判断された。ただし、Fig. 61 に見られたように Ca 溶脱領域内における耐摩耗性は深さ方向に一様ではなく、次第に大きくなっていると考えられるが、Fig. 67 の Ca 強度分布からは化学的変質の明確な相違は読み取れなかった。このためには、Ca/Si モル比などの定量的な指標を求める必要があると考えられた。

(3) 溶脱試験体における Si の分布

Fig. 67 における Si の特性 X 線強度分布は、Ca とほぼ対照的な様相を呈した。つまり、Ca の強度が低い領域においては Si の強度が高く、逆に、Ca の強度が高い領域では Si の強度が低くなった。このような Si の分布が生じた理由については、現時点では不明である。芳賀ら (2002) は、ペースト硬化体に対する遠心力を利用した通水試験を行い、SiO₂ の濃度が初期に比較して変質部分で高くなった原因として、Ca(OH)₂ の溶出による相対的な濃度上昇か、Ca/Si 比が変化したことにより C-S-H ゲルの溶解度が変化し、それに伴う液相の Si が析出したものではないかと指摘している。今後、X 線回折分析を用いて、同領域の Si の状態について解明する必要がある。

(4) 溶脱試験体の変質深さの推定

Table 16 に面分析および摩耗速度比から推定した変質深さを示す。面分析では、Fig. 67 の Ca 強度分布を基に強度の境界を目視で選定し、SEM-EDS でその距離を計測した。また、Fig. 66 の摩耗速度比では、速度比が初めて 1 となる位置を補間して求め変質深さとした。摩耗速度比から求めた推定変質深さは面分析から求めた推定変質深さを若干上回っていたもののほぼ同等と判断した。このため、摩耗速度比の大きな領域は、Ca 溶脱による脆弱化した領域であると判断された。なお、推定された変質深さは、各水セメント比で同程度であり、水セメント比の相違による溶脱領域深さの傾向は見られなかった。

(5) ビッカース硬さ

各溶脱試験体における深さ方向のビッカース硬さを Fig. 68 に示す。水セメント比 40% および 50% については、表面からの深さ 3 mm および 2 mm においてビッカース硬さのピークを有し、ピークから表層側および深さ方向側にビッカース硬さが小さくなる形状を示している。水セメント比 60% についてはこれらと若干異なり、同じように表面から 3 mm にピークを有し、表層側および深さ方向側にビッカース硬さが小さくなるものの、途中で大きくなる形状が示されている。比較のために、Fig. 66 の摩耗速度比の最小点付近の拡大図を Fig. 69 に示す。摩耗深さ 2.2~2.7 mm 付近において、未溶脱領域よりも摩耗速度比が小さくなっており、耐摩耗性の高い領域が存在すると考えられる。これらの結果より、溶脱領域と未溶脱領域との境界付近において力学的特性の特異な領域が存在する可能性が示唆された。

Table 16 各試験体の推定変質深さ
Estimated chemical alteration depth from specimen surface

推定基データ	推定変質深さ (mm)		
	W/C40	W/C50	W/C60
面分析 (Ca 指標)	2.06	1.93	1.86
摩耗速度比	2.10	2.41	2.43

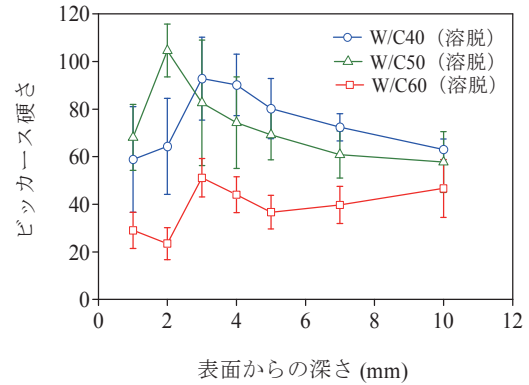


Fig. 68 ビッカース硬さ (平均値±標準偏差)
Vickers hardness versus the depth from surface

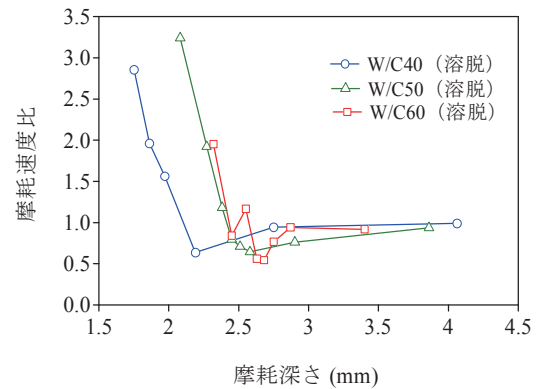


Fig. 69 摩耗速度比の最小点付近
Erosion rate ratio versus erosion depth near the minimum point



(a)補修施工直後の水路側壁 (b)補修後供用中の水路側壁
Fig. 70 補修材の表面状況

Surface states of repair materials. (a) Canal sidewall after repair construction, (b) canal sidewall after 1 year.

8 補修材料の摩耗特性および推定粗度係数

開水路においては、水路躯体に補修材料を施工して通水性や水密性の機能回復を図る補修が実施されている。補修後初期の通水性については、材料の粗度係数試験により推定することは可能であるが、長期供用され、摩耗が進行した場合の粗度係数については推定できず、長期的な通水性の照査の観点から課題となっている (Fig. 70)。本節で

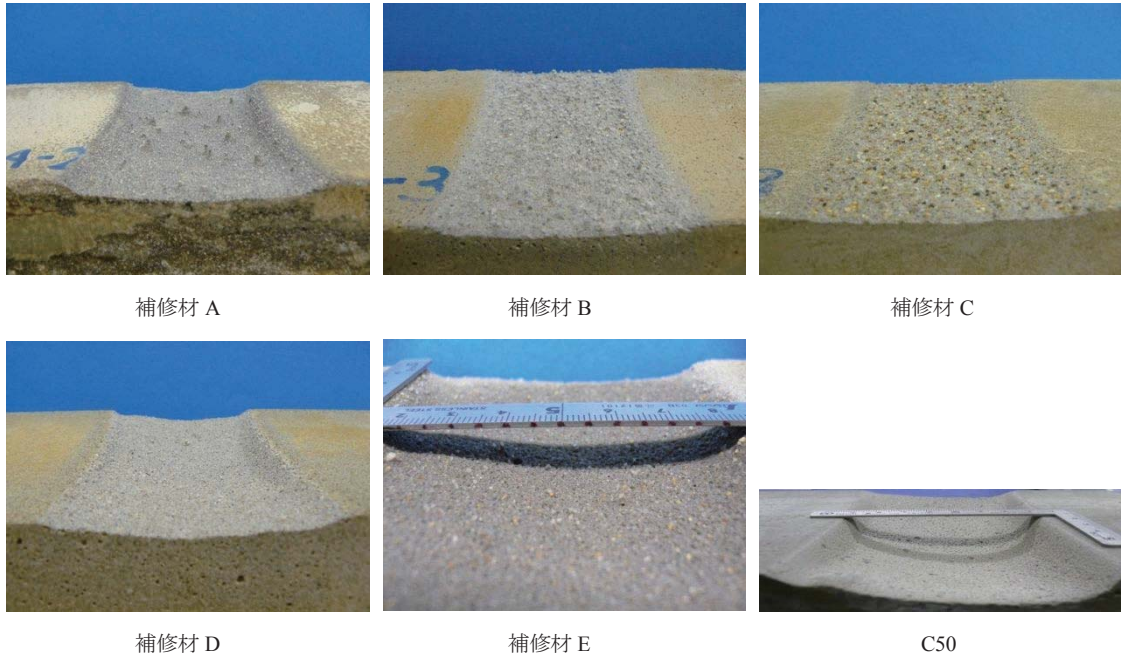


Fig. 71 試験終了後の表面状況
Surface states of specimen after accelerated erosion test

は、補修材料を用いて促進摩耗試験を実施し、耐摩耗性および表面形状から推定した粗度係数について検討した。

a 試験方法

試験体は、実際の補修事業に用いられているポリマーセメント系断面修復材料 5 種類（記号 A～E）を用いた。また、比較のため、III4 で検討したセメントペースト 1 種（C50）とモルタル 2 種（M40, M50）の試験体のデータを引用した。

試験体の促進摩耗試験は、吐出装置 A により、水噴流の吐出圧力を 4.5 MPa、吐出流量を約 0.023 m³/min として実施した。

試験体の表面形状は、レーザー変位計を用いて計測した。5 種類の補修材料については、促進試験時間 0, 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180, 200, 300, 400, 500, 600, 672 時間で、また、セメントペーストおよびモルタル試験体については、促進試験時間 0, 24, 48, 72, 96, 168, 336, 504, 672 時間で試験体の表面形状を計測するとともに表面状況を写真撮影した。

表面形状の計測データを用いて、式(2)および(3)よりマニングの粗度係数を推定した。

b 結果と考察

試験終了（672 時間）後の試験体の表面状況を Fig. 71 に示す。この図より、材料による表面状況の相違が見取れる。平均摩耗深さの経時変化（Fig. 72）では、補修材料により、摩耗の進行の速度に差のあることが示された。モルタル試験体（M50, M40）との比較では、補修材料 A, D, E は摩耗進行が速く、補修材料 B, C は遅いことが確認された。この結果は、補修材料 B, C の方が耐摩耗性の高い材料であることを示唆している。また、平均摩耗深さの進

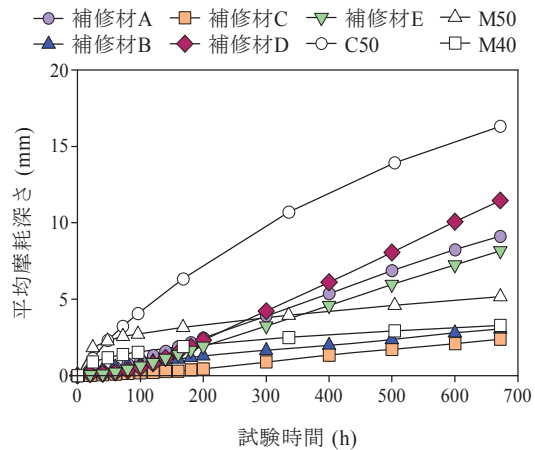


Fig. 72 平均摩耗深さの経時変化
Average erosion depth versus test time with repair materials

行において、各補修材料とも概ね 200 時間以降はほぼ一定の増加率で進行していることが示された。これに対して、モルタル試験体では、試験時間 100 時間以降は摩耗の進行が遅減しており、進行過程が相違することが確認された。これは、摩耗の進行に伴うモルタル試験体の骨材露出により、セメントペーストへの水噴流の衝突が妨げられ、摩耗が進行しなかった結果であると考えられた。補修材料も骨材を含むが、モルタルに含まれる標準砂に比べて粒径の小さなことが摩耗進行過程の相違を生じさせたと考えられた。

表面形状データから粗度係数を推定するにあたり、Fig. 73 に示すデータの補正を実施した。各表面形状データを 2 次関数で近似し、近似曲線から各データまでの偏差を新たな表面形状データとした。水噴流摩耗試験機による摩耗試験においては、試験体の中央部がより速く摩耗進行し、中央部から縁辺部に向けて湾曲した表面形状が形成される。このため、この湾曲したデータから式 (1) を用いて算術

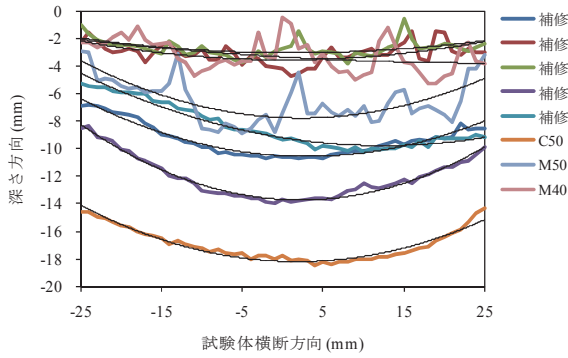


Fig. 73 表面形状および補正用の近似曲線の例
Examples of surface profile of specimen and the fitted curve for the correction

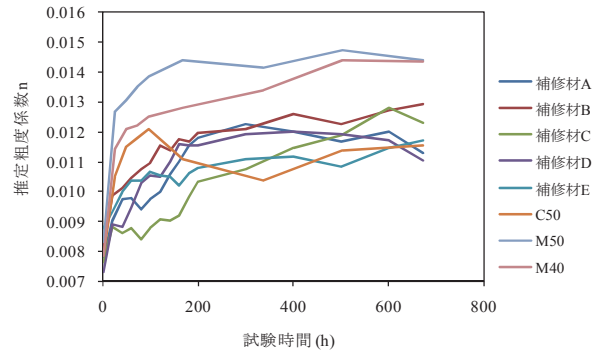


Fig. 74 推定粗度係数の経時変化
Estimated roughness coefficient versus test time

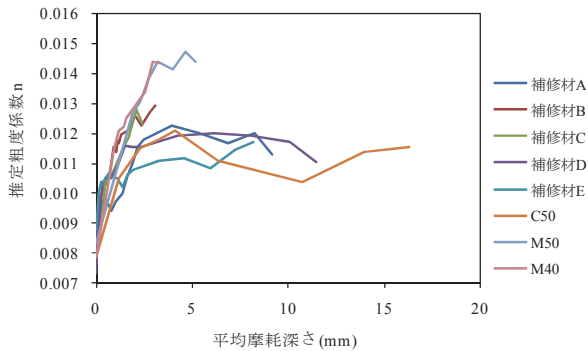


Fig. 75 平均摩耗深さと推定粗度係数との関係
Estimated roughness coefficient versus the average erosion depth

平均粗さを求めると、過大な値が得られる。より適切な算術平均粗さを求めるためには、湾曲の影響を排除する必要がある。ここでは、2次関数による各データへの適合が良好であったため、2次関数を用いたデータの補正を行った。

補正データを用いて求めた推定粗度係数の経時変化を Fig. 74 に示す。推定粗度係数は、各補修材ともモルタル試験体 (M50, M40) を下回った。これは、補修材に含まれる骨材の粒径がモルタル試験体に含まれる骨材の粒径よりも小さく、骨材が露出しても算術平均粗さがモルタル試験体に比較して小さいことに起因していると判断された。セメント (モルタル) の粗度係数が最小値 0.011, 最大値 0.015 とされて (農林水産省農村振興局, 2001) おり、モルタル試験体 (M50, M40) の推定粗度係数がその範囲内に収まることから推定値は概ね妥当であると判断された。

平均摩耗深さと推定粗度係数との関係を Fig. 75 に示す。この図は、各補修材料において摩耗が進行した場合の粗度係数の把握が可能となることから、補修材料を選定する上で有効な情報となり得ると考えられる。

9 水噴流摩耗試験機の改良

Fig. 32 に示した水噴流摩耗試験機は、セメント系材料のエロージョン摩耗を模擬して促進し、耐摩耗性および粗度係数を評価する上で非常に有効な試験機である。一方、III 4 で検討したように水噴流が試験体に衝突する角度 (衝突角度) がほぼ一定であるため、骨材を含む材料においては、骨材を頂点とした突起状の部分が摩耗表面に形成され、適

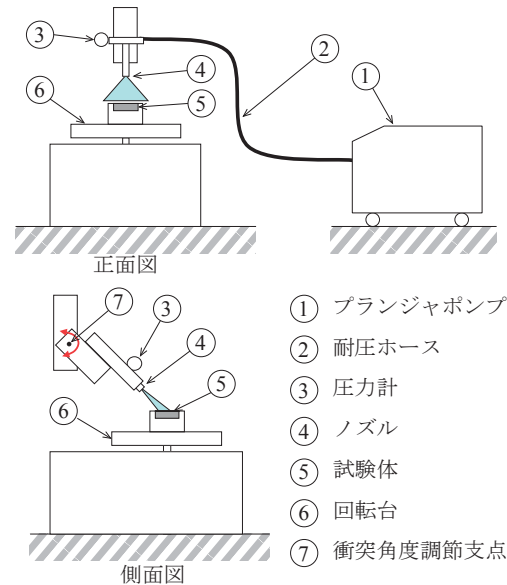


Fig. 76 新型試験機の概要
Overview of the new water jet erosion tester

切な耐摩耗性および粗度係数の評価における課題であった。そのため、試験体への水噴流の衝突角度を調整可能とする試験機の改良を実施した。本節では、改良した新型試験機の概要および新型試験機の性能を評価するための促進摩耗試験について検討した。

a 新型試験機の概要

新型試験機の概要を Fig. 76 に示す。新型試験機の特徴は、ノズルの支持部を回転させて水噴流の試験体への衝突角度を 0~90° の範囲で任意に設定可能としたことである。試験体は、回転台中央に 1 個、または、回転台円周上に 4 個を配置できる。実機の状態を Fig. 77 に示す。

b 試験方法

試験体は、W/C = 50% の JIS モルタル 1 種と実用水路の補修事業に用いられている補修材料 2 種を作製した。補修材料は、ポリマーセメントモルタル (記号 PCM-A) と繊維補強セメント複合材料 (High Performance Fiber Reinforced Cement Composites, 記号 HPRFRC) を用いた。

試験体の促進摩耗試験は、新型試験機により、水噴流の吐出圧力を 15 MPa, 吐出流量を約 0.022 m³/min とし



衝突角度 30° 衝突角度 75°
試験体 1 個を中央部に設置 水噴流の吐出
Fig. 77 新型試験機の状況
Conditions of the new water jet erosion tester

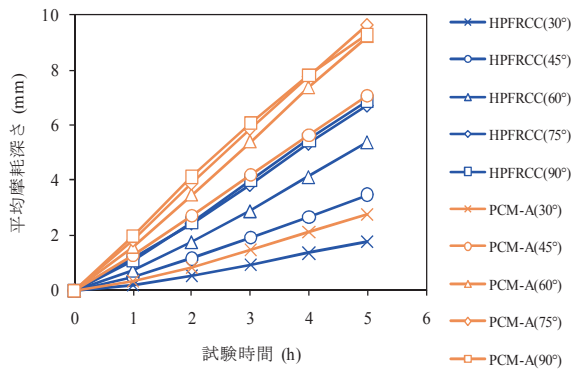


Fig. 79 HPFRC および PCM-A の衝突角度別平均摩耗深さの経時変化
Average erosion depth of HPFRC and PCM-A at different impact angle of water jet

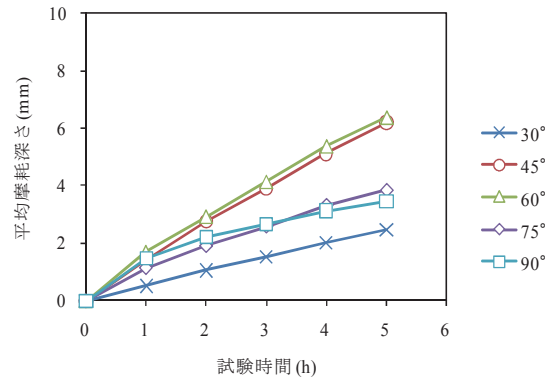


Fig. 78 JIS モルタルの衝突角度別平均摩耗深さの経時変化
Average erosion depth of JIS mortar at different impact angle of water jet

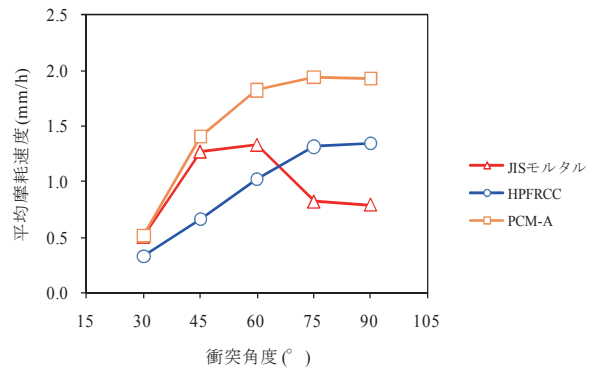


Fig. 80 衝突角度と平均摩耗速度との関係
Average erosion rate versus the impact angle of water jet

施した。試験体は回転台中央に配置し、30 rpm 程度で回転させた。ノズルから試験体までの距離を 50 mm とし、水噴流の衝突角度を 30, 45, 60, 75, 90° の 5 水準で変化させた。

試験体の表面形状は、レーザー変位計を用いて、促進試験時間 0, 1, 2, 3, 4, 5 時間に計測し、式(2)より算術平均粗さを求めた。

c 結果と考察

JIS モルタルの衝突角度別平均摩耗深さの経時変化を Fig. 78 に示す。試験 5 時間後の平均摩耗深さは、衝突角度 30° で最小、45° で約 2.5 倍、60° で最大となり、75° および 90° では再び減少する結果となった。一方、HPFRCC および PCM-A では、衝突角度 30° ~90° にかけて平均摩耗深さがほぼ増大する結果となった (Fig. 79)。

平均摩耗深さの経時変化データを 1 次直線 (切片 = 0) で近似した場合の直線の傾きは、各試験における平均摩耗速度を表す。その値を Fig. 80 に示す。HPFRCC および PCM-A は、衝突角度の増加とともに平均摩耗速度が増加し、衝突角度 75~90° で最大になることを示している。こ

れに対して、JIS モルタルでは、45~60° の間で平均摩耗速度の最大値をとり、75~90° では平均摩耗速度が低下した。Bitter (1963a ; 1963b) は、エロージョン摩耗における粒子の衝突角度が材料の摩耗に及ぼす影響を評価し、脆性材料の場合には 0~90° において衝突角度の増加とともに摩耗量が增大することを示した。本試験で用いた 3 種の材料はセメント系材料であり、脆性材料である。JIS モルタルがこのような特異な結果を示した理由としては、骨材を頂点とした突起状部分が多数存在する表面形状の形成が考えられる。

Fig. 81 に示すように、JIS モルタルにおいては、75 および 90° において表面に突起状部分が多数形成されている。この突起状部分における摩耗進行の遅延が平均摩耗速度の低下を招いた原因と考えられる。JIS モルタルにおける突起状部分の形成が表面の粗さを大きくすることは、Fig. 82 に示す平均摩耗深さと算術平均粗さとの関係からも読み取れる。一方、HPFRCC および PCM-A も材料中に骨材を含んでいるが、その粒径が小さいために突起状部分の形成には至らず、摩耗進行の遅延が生じなかったものと考えられる。

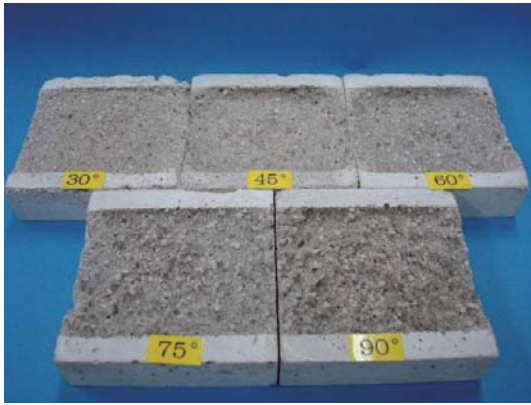


Fig. 81 JIS モルタルの試験後の表面状況
Eroded surface states of the specimens after test

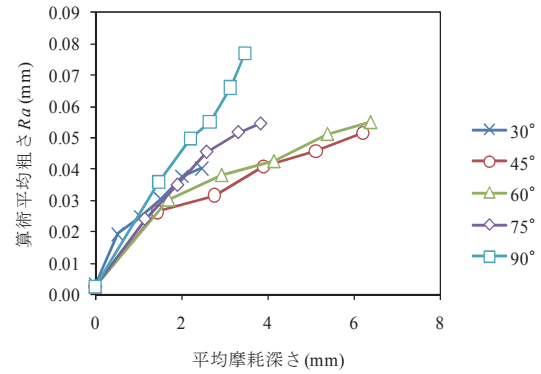


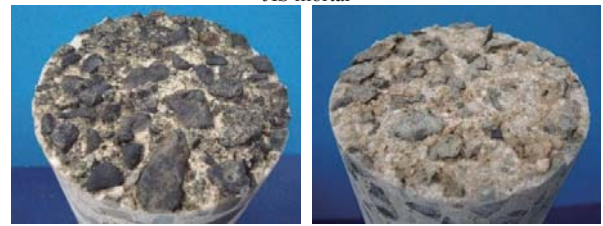
Fig. 82 JIS モルタルの平均摩耗深さと算術平均粗さの関係
Arithmetic average roughness versus the average erosion depth of JIS mortar

d 水噴流の衝突角度の選定

促進摩耗試験には、実現象を模擬する程度および試験の効率性が求められる。含有骨材の粒径が小さいセメント系材料（HPFRCC, PCM-A など）の試験であれば、Fig. 80 に示されたように衝突角度 75~90° での試験の方が平均摩耗速度は大きいことから、促進効果が高く、効率的と言える。一方、JIS モルタルは衝突角度 75~90° では試験の効率性が悪く、また、摩耗表面に形成される突起状部分は Fig. 83 に示すように実水路では見られないことから適切ではないと判断される。さらに、第V章において検討するように各種材料の耐摩耗性を比較する際には、基準となる標準試験体が必要であり、セメント系材料の中では規格化されている JIS モルタルが適切であると考えられる。したがって、新型試験機における水噴流衝突角度は、JIS モルタルの効率性および表面形状を考慮して、45° 程度が適切と考えられる。

10 現地水路試験体の摩耗特性

促進摩耗試験においては、実構造物における摩耗程度との時間的相関を得ることは構造物の性能低下予測をする



(a) D 地区：水路側壁水中部 (b) E 地区：水路側壁水中部
Fig. 83 実水路の表面状況
Eroded surface states of the collected cores from the actual canal in the D and E district

ために必要である。上野ら（2010）は、水路構造物から採取した試験体を用いて水砂噴流摩耗試験機による促進摩耗を実施し、1.10~1.72 year/h を導き出している。本節では、実水路構造物から採取したコアを用いた水噴流摩耗試験の結果について検討した。

a 試験方法

試験体は、第II章で調査対象地区としたD地区およびE地区で採取した側壁水中部のコア（φ100 mm）から、Fig. 84 に示すように70×70×20 mmの直方体を切り出して作製した。試験体の切り出し位置は、背面部およびFig. 29, Fig. 30のCa濃度分布を元に設定したCa未溶脱部分であ

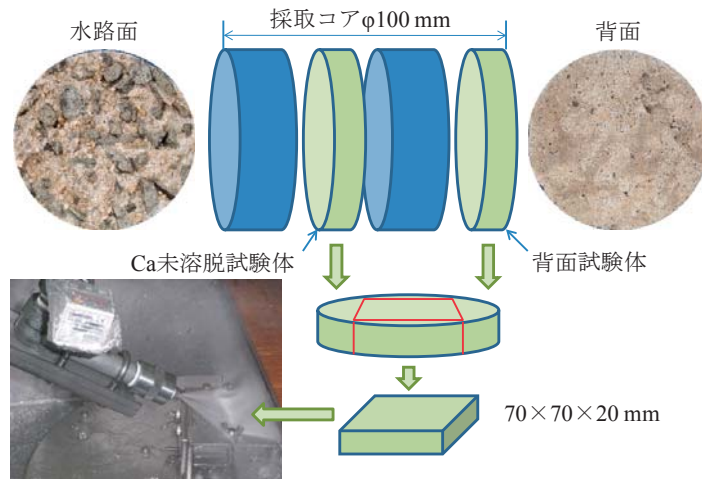


Fig. 84 摩耗試験体の作製方法
Specimen preparation methods for accelerated erosion test using collected cores from an actual canal

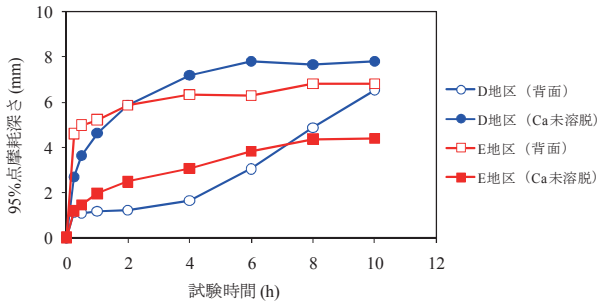


Fig. 85 実水路試験体の95%点摩耗深さの経時変化
95th percentile erosion depth versus test time using actual canal specimens



Fig. 87 E地区背面の状況
Back surface state of collected core in the E district

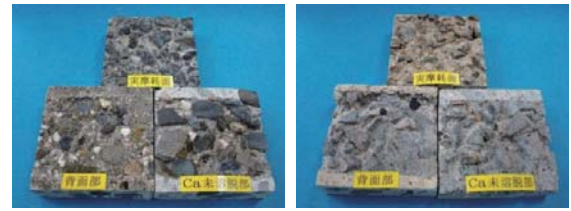
る。Ca未溶脱試験体は、D地区では表面から35~55mm、E地区では25~45mmの位置から切り出し、各々35mm面と25mm面を促進摩耗面とした。また、背面試験体は最背面を促進摩耗面とした。

試験体の促進摩耗試験は、新型試験機により、水噴流の吐出圧力を15MPa、吐出流量を約0.022m³/minとして実施した。試験体は回転台中央に設置し、30rpm程度で回転させた。ノズルから試験体までの距離を50mmとし、水噴流の衝突角度を45°とした。試験体の表面形状は、レーザー変位計を用いて計測した。計測時間は、0、15、30分、1、2、4、6、8、10時間とした。

なお、ここでは摩耗深さの指標として、平均摩耗深さではなく、後述(V5a)する95%点摩耗深さを採用した。これは、セメントペースト部の摩耗フロントを的確に把握するためである。

b 結果と考察

95%点摩耗深さの経時変化をFig. 85に示す。また、試験後の試験体の状況をFig. 86に示す。D地区背面試験体では、試験開始15分で1.1mmまで摩耗が進行した後は2時間までほとんど変わらず、4時間以降は急激に直線的に摩耗が進行した。これは、表層1mm前後に耐摩耗性の高い領域が存在したためであると考えられた。D地区Ca未溶脱試験体では、試験開始15分で2.7mmまで摩耗が進行した後も緩やかに摩耗は進行し、6時間以降はほぼ一定となった。E地区背面試験体では、試験開始15分で4.6mmま



D地区 E地区
Fig. 86 実水路摩耗面および促進摩耗試験後試験体
Eroded surface states of actual canals and accelerated erosion test. A sample in the back is eroded by actual canal and two specimens in the front are eroded by accelerated erosion test.

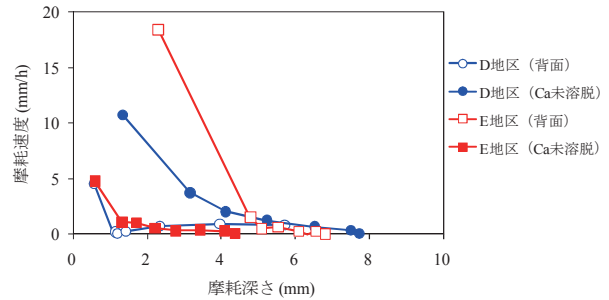


Fig. 88 実水路試験体の摩耗速度と摩耗深さとの関係
Erosion rate versus the erosion depth using actual canal specimens

で急激に摩耗が進行した後は、緩やかに摩耗は進行し、8時間以降はほぼ一定となった。急激に摩耗が進行した理由としては、表層4mm程度までの領域でセメントペーストの脆弱化が生じていたと考えられる。また、E地区Ca未溶脱試験体では、試験開始15分で1.2mmまで摩耗が進行した後も緩やかに摩耗は進行し、8時間以降はほぼ一定となった。Ca未溶脱試験体においては、両地区とも絶対値は相違するものの摩耗進行が時間の経過とともに徐々に減速していく類似した状態を示した。これに対して、背面試験体においては、D地区試験体が硬質化、E地区試験体が脆弱化していると考えられ、相反する摩耗進行過程を示した。

硬質化の可能性の一つとしては、打設時に型枠からフレッシュコンクリート中の水分が浸み出し、表層の水セメント比が小さくなって強度が高くなったことが考えられる。脆弱化では、当該水路背面の地下水が高く、コンクリートが水に長期間接触し、表層からCaが溶脱して脆弱化したことが考えられる。Fig. 86のE地区の実摩耗面および背面部とも表面が薄い赤褐色を呈しており、III7で検討したCa溶脱試験体の溶脱領域の変色と類似している。ただし、Fig. 87に示すように背面の初期状況は、気泡の痕は存在するがセメントペーストの減量は生じていない。これは、この部分がCa溶脱による脆弱化が進行しているものの接触している水分が静水または微流速の水であったためにエロージョン摩耗が生じなかったものと考えられる。つまり、脆弱化が進行しても接触している水分が静水または微流速の水であればエロージョン摩耗には至らず、化学的変質と流水との接触がエロージョン摩耗を生じさせると考えられた。なお、以上のように施工時および供用時に外部環境

と接するコンクリートにおいては、施工状況や化学的作用の影響を受けてコンクリートが変質する可能性が高く、摩耗特性が初期コンクリートと相違すると考えられる。そのため、V6で議論する促進摩耗試験の促進倍率を求めるための試験体は、化学的変質を生じていないと判断される部位からの切り出し・作製が必要と考える。

摩耗速度と摩耗深さとの関係を Fig. 88 に示す。この図より、E 地区背面試験体の脆弱化領域は、摩耗速度の大きな摩耗深さ 5 mm 付近までであることが示された。また、摩耗深さ 5 mm 以深では、E 地区 Ca 未溶脱試験体の摩耗深さ 2 mm 以深と摩耗速度がほぼ同等であることが示された。

11 結論

本章では、農業水利施設で生じるエロージョン摩耗を模擬することを目的として開発した水噴流摩耗試験機をセメント系材料に適用し、セメント系材料のエロージョン摩耗特性について把握するとともに水噴流摩耗試験の有用性について検討した。得られた結果を以下に示す。

- (1) 水噴流摩耗試験機における吐出圧力の増加により、摩耗速度は加速度的に増大し、その関係は、累乗関数で近似できる。
- (2) 水噴流摩耗試験機で使用する吐出装置が異なると摩耗性状も相違し、その原因としては、スタンドオフ距離、吐出流量、液滴径などの水噴流の形態などの相違が考えられる。
- (3) 水噴流摩耗試験機における回転速度の変化が摩耗速度に及ぼす影響は、吐出圧力 4.5 MPa と 20.0 MPa では相反する傾向が示されたため明確とはならなかった。
- (4) 水噴流摩耗試験においては、計測作業における試験体の欠けなどによる試験結果への影響を排除するためには、摩耗量の評価指標として、摩耗深さを計測する必要がある。また、摩耗表面形状の経時変化を定量的に把握するためにも摩耗深さ計測は適している。
- (5) セメントペースト試験体の摩耗量は線形的に増加し、一方、モルタル試験体およびコンクリート試験体では骨材露出とともに摩耗量の増加が逡減する。その原因としては、摩耗表面積に占める骨材表面積の割合の増加が影響し、骨材下部への水噴流の衝突が抑制されるためであると考えられる。
- (6) コンクリート試験体の摩耗過程は、セメントペーストの脱離が先行し、細骨材、粗骨材の順で骨材が露出し、試験表面における骨材露出領域の拡大がセメントペーストの脱離を抑制し、その結果、摩耗進行が逡減する過程であると考えられる。また、このような過程を辿る原因は、水噴流の衝突に対してセメントペーストの凝集力およびセメントペーストと骨材との付着力が骨材の凝集力に比べて弱いためであると推定される。
- (7) ブロック模擬試験体の摩耗初期においては、水セメント比の相違によるセメントペーストの耐摩耗性の大小が摩耗進行に影響を及ぼすが、摩耗表面がほぼ骨材露出のみとなった摩耗中期以降では、水セメント比の相違が摩耗進行に及ぼす影響は小さいと考えられる。
- (8) ブロック模擬試験体の推定粗度係数は、試験 20 時間以降は増加が逡減する傾向を示したが、これは、表面の凹凸状況に大きな変化が生じないことが原因であると考えられる。
- (9) ブロック模擬試験体の推定粗度係数は、102 時間後に 18N-1 試験体で 0.0156、30N-2 試験体で 0.0145 であった。
- (10) Ca 溶脱試験体の表層付近の摩耗速度は、未溶脱領域の最大 19.4～27.6 倍の摩耗速度であり、耐摩耗性の低下が著しい。また、摩耗速度の大きな領域は、Ca 溶脱領域とほぼ一致し、Ca 溶脱による表層の脆弱化が原因と考えられる。
- (11) Ca 溶脱領域と未溶脱領域との境界付近において力学的特性の特異な領域が存在する可能性が示唆された。
- (12) 水噴流摩耗試験は、Ca 溶脱領域の力学的特性の変化を測定する一つの手法として有用である。
- (13) 補修材料により、摩耗進行の速度に差のあることが示された。このため、水噴流摩耗試験による補修材料の耐摩耗性の相対比較が可能であると判断された。
- (14) 5 種の補修材に含まれる骨材の粒径がモルタル試験体に含まれる骨材の粒径よりも小さいため、骨材が露出しても算術平均粗さがモルタル試験体に比較して小さくなり、推定粗度係数も小さいと考えられた。
- (15) モルタル試験体の推定粗度係数が最小値 0.011、最大値 0.015 の範囲内に収まることから推定値は概ね妥当であると判断された。
- (16) 各補修材料の平均摩耗深さと推定粗度係数との関係は、材料選定をする上で有効な情報となりうると判断された。
- (17) 新型水噴流摩耗試験機を用いた試験条件としては、JIS モルタルの試験効率性および表面形状を考慮して、水噴流の試験体への衝突角度を 45° 程度にすることが適切と判断された。
- (18) 実水路から採取したコアを用いた水噴流摩耗試験の結果、施工時および供用時に外部環境と接するコンクリートにおいては、施工状況や化学的作用の影響を受けてコンクリートが変質する可能性が高く、摩耗特性が初期コンクリートと相違すると考えられた。
- (19) E 地区背面試験体の結果から、Ca 溶脱による脆弱化が進行しても接触している水分が静水または微流速の水であればエロージョン摩耗には至らず、化

Table 17 実水路における摩耗速度の推定値
Estimated erosion rate in actual canal

地区	供用年 (year)	最大高さ Rz (mm)	推定摩耗深さ $Rz + 6$ (mm)	摩耗速度 (mm/year)	摩耗速度 ($\mu\text{m}/\text{day}$)
A	40	6.3	12.3	0.31	1.7
B	51	26.4	32.4	0.63	3.5
C	35	11.2	17.2	0.49	2.7
D	38	8.2	14.2	0.37	2.1
E	38	6.8	12.8	0.34	1.9

Table 18 細骨材の粒度の標準 (土木学会コンクリート委員会, 2008b)
Standard grading of the fine aggregate

ふるいの呼び寸法 (mm)	10	5	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15
ふるいを通るものの 質量百分率 (%)	100	90~100	80~100	50~90	25~65	10~35	2~10

学的変質と流水との接触がエロージョン摩耗を生じさせると考えられた。

IV 農業用コンクリート水路における摩耗機構

1 結論

現在、多くの農業用コンクリート水路が劣化していると診断され、種々の補修対策が施されている。その劣化の一つである摩耗現象については、その摩耗機構が十分に解明されているとは言い難い状況にある。摩耗機構が解明されていないならば、適切な補修対策を選定することも困難である。

本章では、第II章および第III章の結果を基に農業用コンクリート水路における摩耗機構について検討する。

2 摩耗機構

第II章で検討したように農業用コンクリート水路における摩耗現象は、骨材が摩耗せず、セメントペースト（セメントの水和物）のみが摩耗する現象である。コンクリートが骨材とその結合材であるセメントペーストとから構成される複合材料であることを考慮すれば、農業用コンクリート水路における摩耗現象は、コンクリート中の結合材料であるセメントペーストの破壊現象であると推察される。セメントペーストの破壊に伴い、セメントペーストに固定されていた骨材が脱離するのである。

セメントペーストの破壊に作用するのは、水および砂粒子による力学的作用と化学的作用の2種の作用である。力学的作用は切削、衝撃、疲労などでセメントペーストの構造を破壊する。化学的作用はCa溶脱、乾湿繰り返しなどでセメントペーストの構造を変質させ脆くする。この両作用の複合作用により、農業用コンクリート水路の摩耗が進行していると推察する。

最初に力学的作用について検討する。力学的作用としては、水および砂粒子がコンクリートに衝突してセメントペ

Table 19 細骨材の代表径
Typical diameter of the fine aggregate

ふるいの呼び寸法 (mm)	代表径 (mm)	質量百分率 (%)
10		
5	7.50	10
2.5	3.75	10
1.2	1.85	30
0.6	0.90	25
0.3	0.45	15
0.15	0.23	8
	0.08	2

ーストを徐々に破壊して脱離させるエロージョンがある。ここで、実水路における摩耗速度の推定値を **Table 17** に示す。第II章で調査した地区の水路側壁で計測した最大高さに骨材上のモルタル分の想定かぶり 6 mm (佐藤ら, 2008) を加算した値を推定摩耗深さとし、その値を供用年数および供用日数で除して摩耗速度を算定した。供用日数は1年のうち180日が通水されると仮定した。この表より、摩耗速度は、0.31~0.63 mm/year、または、1.7~3.5 $\mu\text{m}/\text{day}$ と推定された。平均すると、0.43 mm/year および 2.4 $\mu\text{m}/\text{day}$ となる。

この値は、コンクリートにおける摩耗が、モルタル分（細骨材とセメントペーストの複合物）の脱離として進行すると仮定するとかなり小さな値と考えられる。コンクリートで使用される細骨材の粒度の標準は **Table 18** のようになっている。この表からふるいを通るものの質量百分率の範囲の最小値を元に粒度を設定し、代表径とその質量百分率を求めると **Table 19** のようになる。代表径は隣接するふるいの呼び寸法の平均値とした。代表径 7.50~1.85 mm と 0.90~0.08 mm とで累積の質量百分率が同じ 50% となることから、この代表径の平均を細骨材の平均径とすれば 1.38 mm となる。単純計算でこの値を摩耗速度 0.43 mm/year で除す

と3.2年が得られる。つまり、平均径1.38mmの細骨材をモルタル層として脱離させるためには、3.2年を要することになる。

しかし、このように離散的にモルタル層の脱離現象が生じているとは考えにくい。また、DおよびE地区から採取した水路側壁水中部のコアの摩耗表面（Fig. 89）からは、細骨材周りのセメントペーストが洗い流されているように見える。これは、セメントペースト中に固定されていた骨材が、骨材周りのセメントペーストの脱離により、表面に現れたと考えられる。また、表面に現れた骨材は、その基部だけで直下のセメントペーストと付着しており、その付着強度は、この状態で水流下に置かれても脱離しないほど大きなことが示唆される。以上のことから、農業用コンクリート水路側壁における摩耗は、セメントペーストの破壊・脱離によるものであり、モルタル層としての破壊・脱離ではないと推察する。ただし、農業用コンクリート水路の底版においては、礫の転がりなどが生じている可能性があることから、モルタル層としての破壊・脱離も考えられる。しかし、これまでの調査では、まだ、十分なデータの蓄積がない状況である。

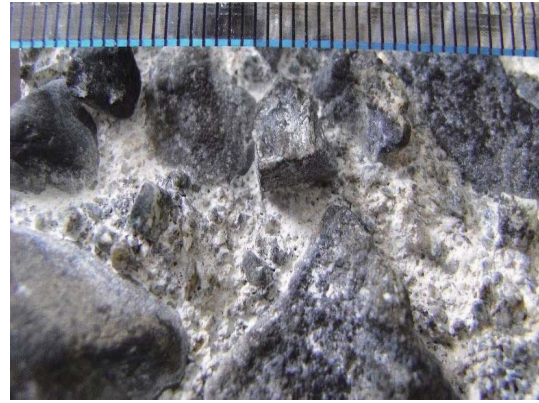
ここで、セメントペーストに作用する力について検討する。力には、水と砂粒子の2種の要因に起因する力がある。水を要因とするものとしては、壁面せん断応力がある。壁面に沿って粘性流体が移動する場合、壁面にはせん断応力が働く。コンクリートのエロージョン摩耗機構として壁面せん断応力を議論している研究はあまり見受けられない。しかし、金属と液体（松村ら、1986）、セラミックと気体（Heuer and Walter, 1998）については、壁面せん断応力に対して乱流による応力がエロージョン摩耗の要因として卓越しているという報告もある。ただし、これらは流体が3 m/secを超えるような速度を対象としている。これは、壁面に沿う乱流境界層内では、壁面近くで激しい速度変動を示す（例えば、日野、1992）ためであると考えられる。このように、水を要因とした壁面せん断応力および乱流による応力、そして、砂粒子の衝突が農業用コンクリート水路におけるセメントペーストの破壊に作用する力であると考えられるが、いずれが卓越しているのかは現時点では不明である。また、作用する力が摩耗機構としての切削と疲労のどちらをセメントペーストに生じさせるのかも不明である。

次に化学的作用について検討する。化学的作用としては、II3bおよびIII7で検討したCa溶脱がある。II3bでは、

- ① 実水路のコンクリート表面においてCa溶脱が進行していること
- ② 摩耗フロントより溶脱フロントの方が深く進行していること

を明らかにした。また、III7では、

- ① Ca溶脱させた試験体において溶脱領域の摩耗速度が20倍前後と大きくなること
- ② 実水路から採取したCa溶脱領域と判断されるコアにおいても摩耗速度が大きなこと



D地区



E地区

Fig. 89 採取コア（水路側壁水中部）の摩耗表面（写真上部に見えるスケールは、1目盛1mmを表示）
Eroded surface of collected cores from submerged sidewall in actual canal

- ③ Ca溶脱による脆弱化が進行しても接触している水分が静水または微流速の水であれば摩耗しないこと

が明らかとなった。Ca溶脱は細孔量を増加させ、組織構造を粗とし、力学的特性を低下させる（Carde, 1996）。その結果、力学的作用による摩耗の進行が速められると考えられる。

以上の結果を踏まえて農業用コンクリート水路における摩耗過程を推定すると以下のようなになる。

- ① 水と接触するセメントペーストはCa溶脱が進行する。
- ② Ca溶脱したセメントペーストは細孔量が増加し、組織構造が粗となる。
- ③ 組織構造が粗となったセメントペーストは強度が低下する。
- ④ 強度が低下したセメントペーストに水流および砂粒子が衝突すると、セメントペーストは疲労または切削破壊を生じ、脱離する。
- ⑤ セメントペーストの脱離が進行すると、セメントペーストに固定されていた骨材の脱離が生じる。

3 摩耗モデル

本節では、セメントペーストのCa溶脱、脆弱化、破壊、脱離による摩耗現象を単純に表現するためにCAを適用した。本モデルでは、対象領域のセルに水、セメントペースト、骨材を配置し、セメントペーストセル中のCaが溶脱

している過程およびセメントペーストセルが破壊・脱離する過程を模擬した。

a セルオートマトン

CA 理論は、数学者 J. Neumann が 1940 年代後半にあたためていた考えにその起源があるとされている (加藤ら, 1998)。1970 年に数学者 J.H. Conway により考案されたライフゲーム (game of life) では、多数の正方形のセルで区切ったコンピュータの画面上に、生きている状態と定義した生のセルを少数置くと増殖し始め、単純な初期の形と簡単な規則から予想もできない複雑で多彩なパターンが作り出され、爆発的なヒットとなった (加藤ら, 1998)。S. Wolfram (1983) は、CA 理論に 1 次元モデルを導入し、CA が離散力学系の代表モデルとなることを明らかにした。その後、Packard と Wolfram (1985) は、2 次元 CA 理論が多く of の物理系の実験に現れるパターン形成問題のモデルとして適用できるものと考え、反応・拡散系、樹脂状結晶成長、そして、ナビエ・ストークス方程式を挙げた。そして、S. Wolfram (1986) は、CA 理論から派生した LGA (Lattice Gas Automata) 法がナビエ・ストークス方程式とマクロレベルで同値となることを数学的に示した。これ以降、CA 理論の流体解析への適用が進行した (例えば、Frisch et al., 1986)。このように、CA 理論は生き物の生長 (生体組織、植物、バクテリアなど)、反応・拡散現象 (生物の紋様形成、神経の刺激伝達、化学反応など)、材料 (組織変化など)、フラクタル自然現象 (結晶成長、凝集など)、災害 (森林火災、地震、地すべりなど)、交通 (高速道路の車の流れ)、経済 (株価、景気の循環など) など多くの分野で適用されている。

CA は、モデルが単純であり、セル間の単純な局所的相互作用 (マイクロレベル) から、パターン形成における不規則性を自然発生させて複雑な現象 (マクロレベル) を再現できる計算手法である。そのため、従来の手法では困難であった多孔質内部のマイクロな流れなどをシミュレーションすることも可能である。通常の CA は、2 次元平面空間を三角形あるいは四角形格子により離散化し、各格子の次の時間における状態を近接格子の現在の状態から決定していく。CA の特徴をまとめると以下ようになる (Sudjono・関, 2002)。

- ① 同じ大きさの均一なセルを想定する。
- ② 各セルは k 種類の状態を取ることができる。
- ③ 次ステップ時間のセルの状態 (色) は現在の状態と隣り合うセルの状態だけの局所な規則により決まる。
- ④ でき上がるパターンは初期のセルの状態と適用する規則によって決まる。
- ⑤ 適用規則として、セルの空間的な周囲 (近接) との局所相互作用則の時間的な状態を考えた遷移則がある。

全てのセルの状態は、規則に従いステップ時間ごとに同時に更新される。セルの状態の変わり方は、自身と隣接す

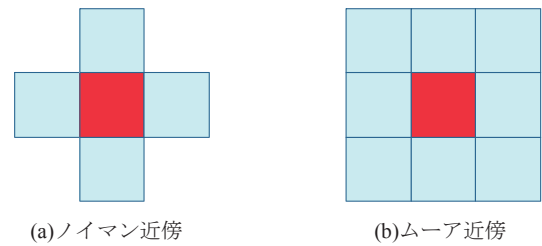


Fig. 90 2次元 CA において考慮する隣のセル
Two types of neighboring cells used in two-dimensional cellular automata model

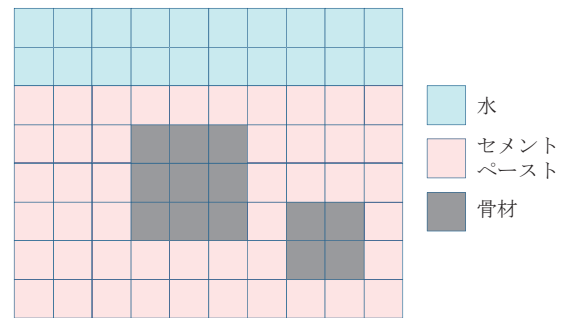


Fig. 91 対象領域の離散化
Discretization of the model domain

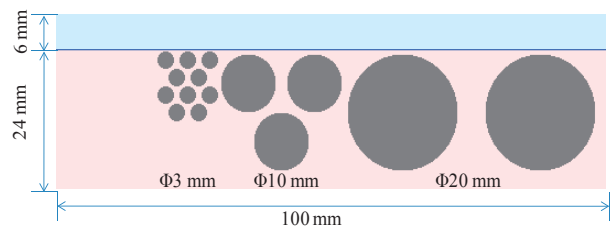


Fig. 92 対象領域および骨材配置
Arrangement of the aggregate in the model domain

5	5	5	8	4	2	8	16	8
5		5	16		1	4		4
5	5	5	8	4	2	2	1	2

(a) 等方 (b) 左方大 (c) 上方大

Fig. 93 水セルから受ける摩耗作用値の例
(中央セルがセメントペーストセル, 周囲セルが水セル)
Examples of the erosion action values from neighboring water cells toward central cement paste cell

るセルの状態に依存し、影響を与えるセルの選び方などによって過程が決まる。2 次元 CA において考慮する近傍セルを Fig. 90 に示す。

b 摩耗のモデル化

本モデルでは 2 次元 CA を適用し、対象領域を Fig. 91 に示すように正方格子セルで離散化し、各セルを水セル、セメントペーストセル、骨材セルで表現する。計算上は、水セルを 0、セメントペーストセルを 1、骨材セルを 3 などで表現する。各セルはムーア近傍にしたがって周囲 8 方向のセルの影響を受ける。対象領域は、幅 100×高さ 30 mm

とし、0.2×0.2 mm のセルで離散化 (500×150 セル) した。領域の下部 24 mm をセメントペーストとし、その上部 6 mm を水とした。セメントペーストの領域には、直径 20 mm の骨材を 2 個、10 mm を 3 個、3 mm を 10 個配置した (Fig. 92)。

本モデルでは摩耗現象を、水と接する表層のセメントペーストが、水から力学的作用を受けて疲労し、やがて破壊して脱離する過程とした。局所近傍則は、以下のとおりとした。

- ① セメントペーストセルは、近傍の水セルから摩耗作用を受ける。
- ② セメントペーストセルは、摩耗作用の累積値が脱離閾値以上になると脱離する (水セルに変化する)。
- ③ 骨材セルは、近傍セルのうち、セメントペーストセルの占める割合が骨材脱離閾値以下となると脱離する (水セルに変化する)。

水セルから受ける摩耗作用値の例を Fig. 93 に示す。これは、セメントペーストセルに対して特定の方向からの摩耗作用を卓越させるための設定である。また、骨材セル脱離判定は、骨材の近傍セルのうち、セメントペーストセルが 20% となった時に脱離するとした。

c Ca 溶脱のモデル化

セメントペーストからの Ca 溶脱は、Ca の拡散現象としてモデル化した。1 次元の拡散方程式は次のように表せる。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = D \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \tag{9}$$

ここに、 u : Ca 濃度、 D : 拡散係数を表す。また、CA では拡散係数 D は次式で対応させることができる (森下ら, 1998)。

$$D = (\text{単位セル幅})^2 / (2 \times (\text{単位時間ステップ幅})) \tag{10}$$

本モデルでは、単位セル幅 : 0.2 mm, 単位時間ステップ : 0.02 年とした。

セメントペーストセルは状態量としての Ca 濃度をセル内の Ca 粒子数で表す。各時間ステップにおいて、Fig. 94 に示すように各セメントペーストセルは、ノイマン近傍にしたがって東西南北セルに等割合で自セル内の Ca 粒子を振り分ける。近傍の東西南北セルのいずれかが骨材セルである場合には、骨材セルへの Ca 粒子の振り分けは行わず、残りのセルで等分に振り分ける。

d 摩耗・Ca 溶脱統合モデル

III7 で検討したように、セメントペーストは Ca 溶脱に伴い、耐摩耗性が低下する。これを本モデルで実装するために、Ca 濃度の低下したセメントペーストセルは水の摩耗作用による累積作用値の閾値を下げることにした。各時間ステップにおいて、Ca 濃度の閾値判定、セメントペーストセルの脱離判定、骨材の脱離判定の順に実施した。計算フローを Fig. 95 に示す。

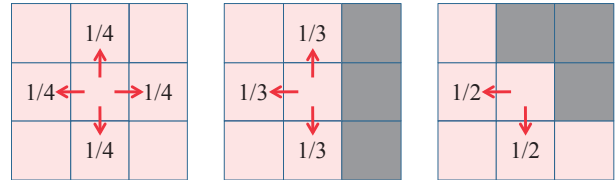


Fig. 94 Ca 粒子の拡散方向および割合
Direction and allocation of Ca particles diffusion

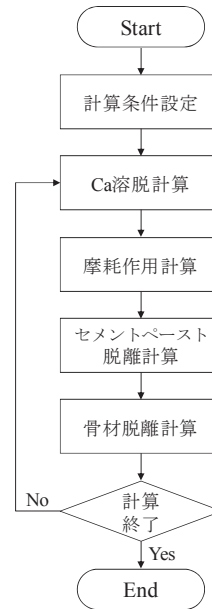


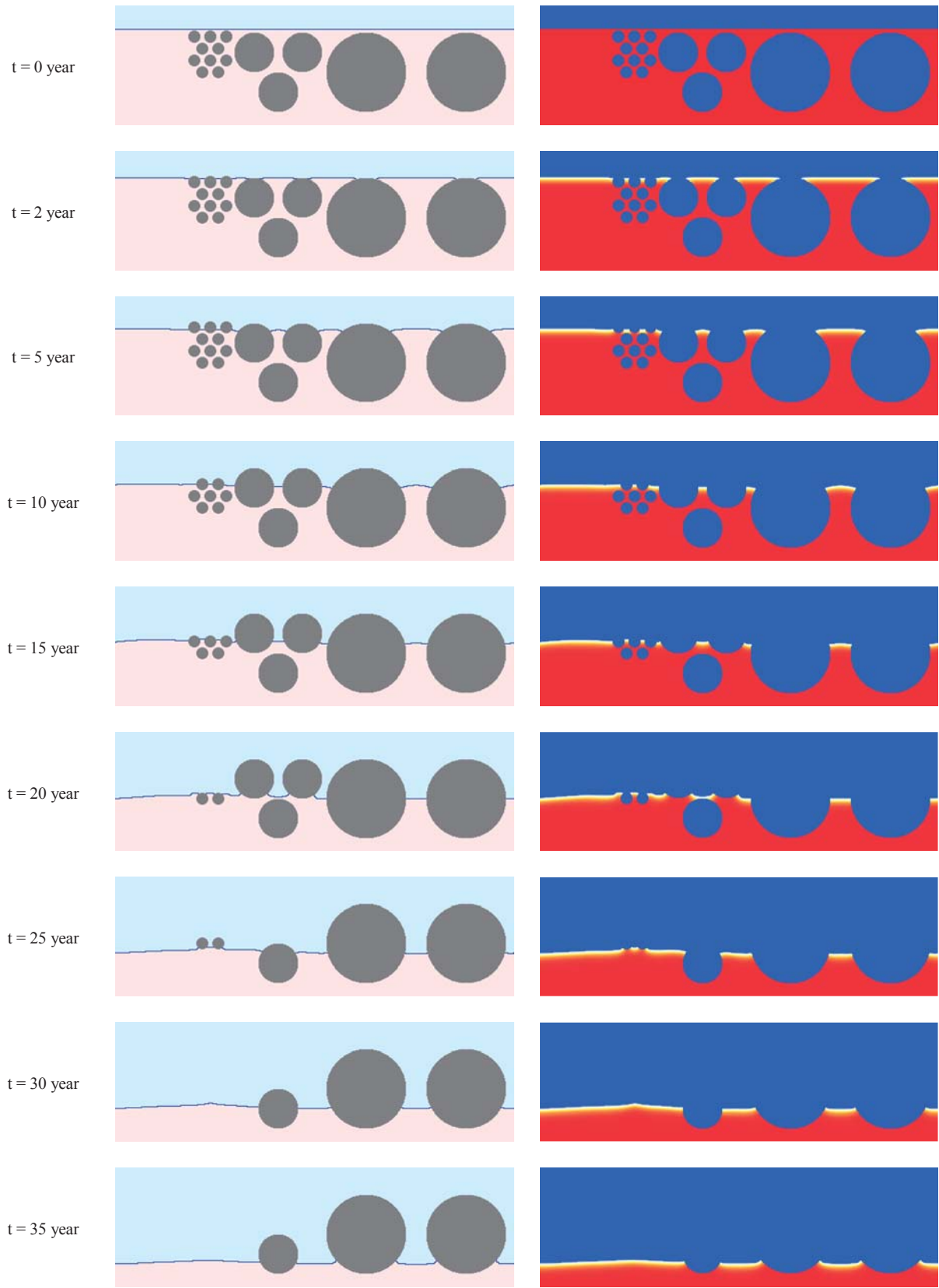
Fig. 95 計算フロー図
Simulation flow diagram

e シミュレーション

シミュレーションは Mathematica 7 で実施した。Fig. 93 の摩耗作用値を用いたシミュレーション結果を Fig. 96, Fig. 97, Fig. 98 に示す。これらの図より、次のことが読み取れる。①骨材の大小および配置の相違によらず多少の凹凸はあるもののセメントペーストは同程度の進行速度で摩耗する、②表層付近で骨材頂部にあるセメントペーストは下層からの Ca 供給が無いために Ca 濃度の低下が大きく力学的な弱部となり摩耗進行が速い (Fig. 99)。

また、等方作用を与えた場合の Ca 溶脱有無による 40 年後の摩耗状況を Fig. 100 に示す。本モデルにおいては、溶脱の有無が摩耗進行速度に大きく影響を与えていることが見て取れる。しかし、この結果は、セメントペースト脱離閾値、Ca 濃度低下によるセメントペーストセル脱離閾値の設定によって大きく影響を受けたと考えられる。このため、この結果は、あくまで定性的な傾向である。

さらに、上方からの噴流を想定して、極端に鉛直下方への摩耗作用を与えた場合を Fig. 101 に示す。この場合、骨材を頂点とする突起状の表面が形成された。この表面形状は、III4 および III9 で検討した水噴流摩耗試験の試験体への衝突角度により形成された試験体の表面形状と類似していた。



摩耗状況

Ca 濃度

Fig. 96 「等方」作用の摩耗進行状況
Erosion progress by the isotropic action

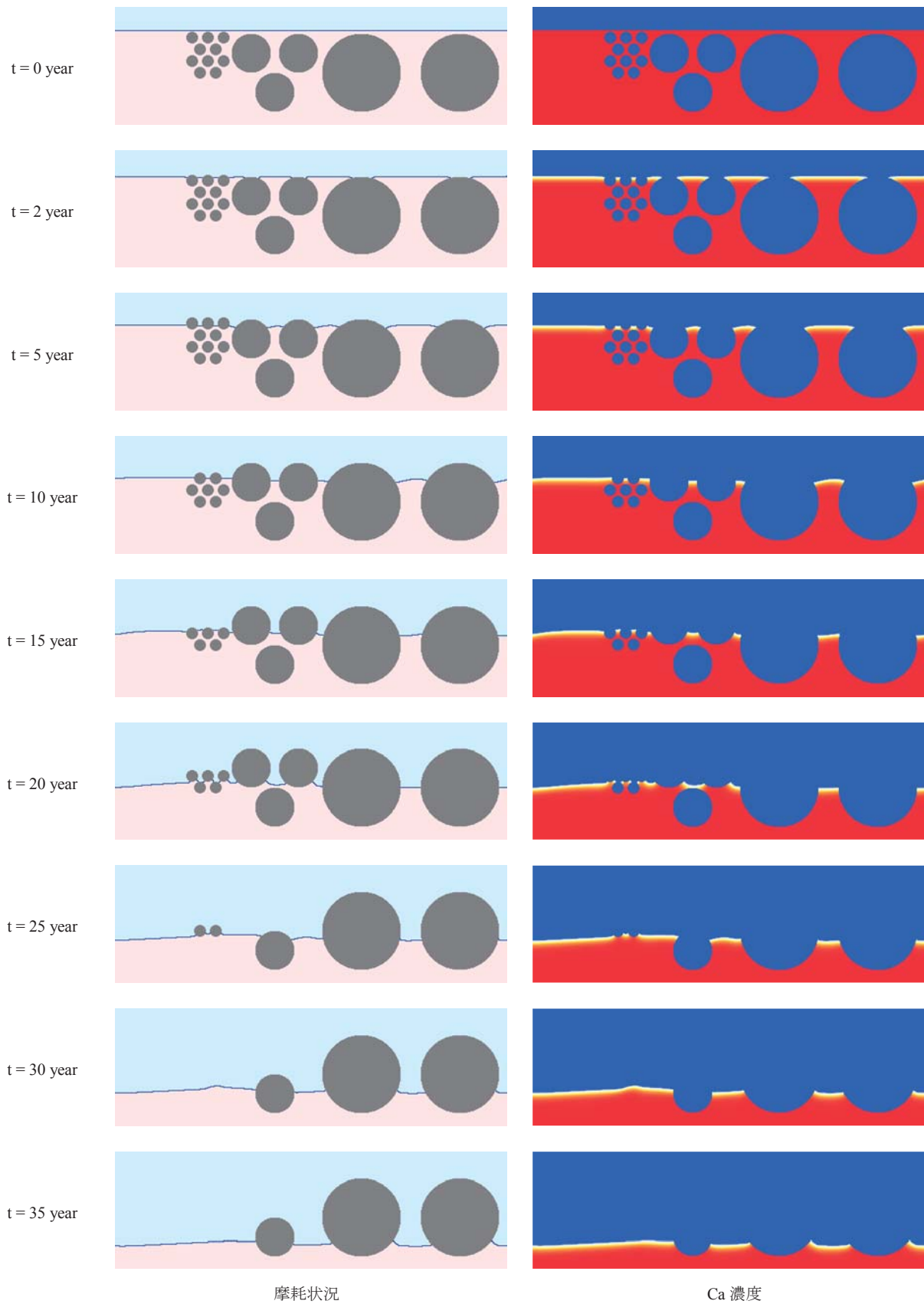
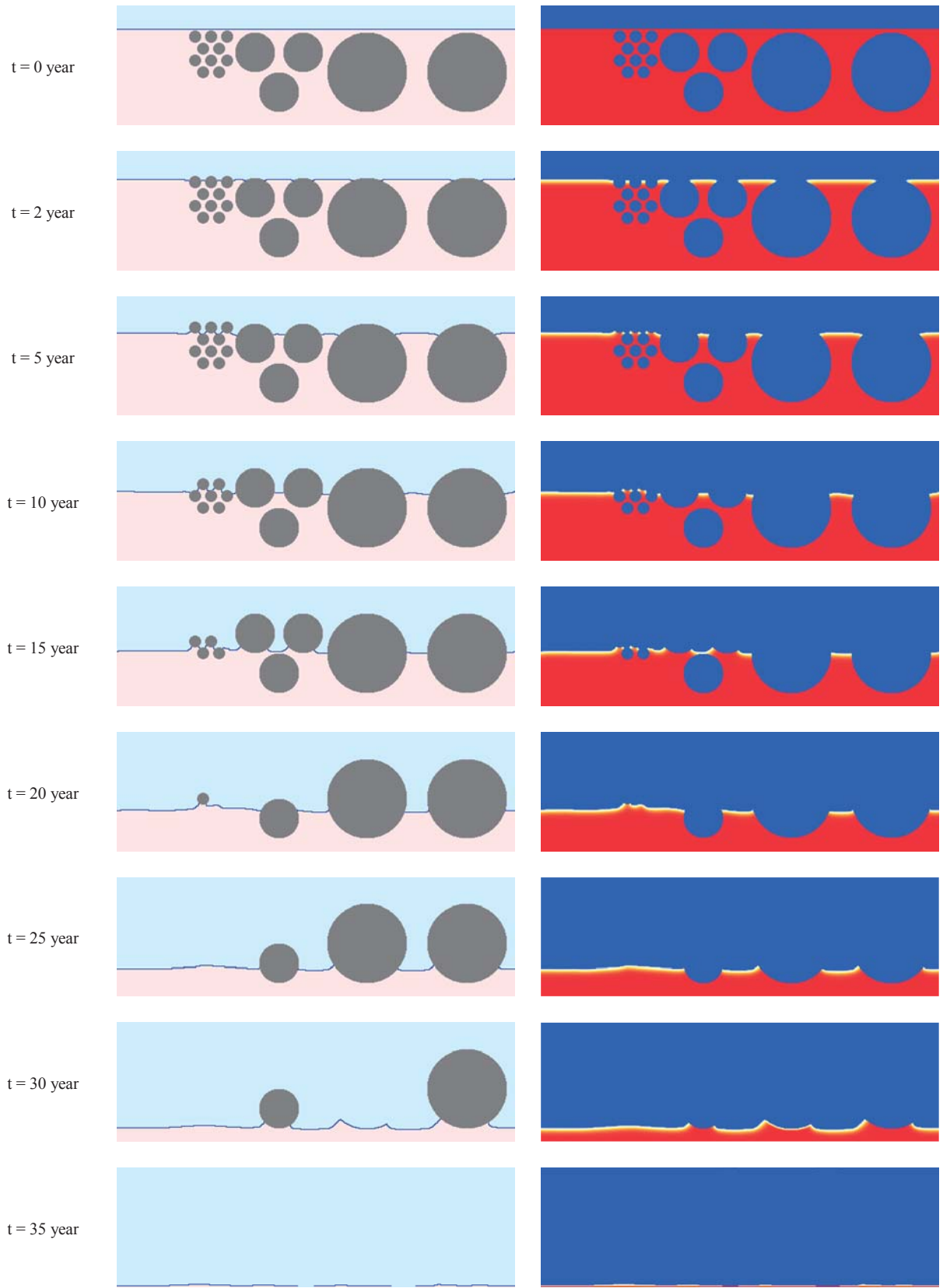


Fig. 97 「左方大」作用の摩耗進行状況
Erosion progress by the left dominant action



摩耗状況

Ca 濃度

Fig. 98 「上方大」作用の摩耗進行状況
Erosion progress by the upper dominant action

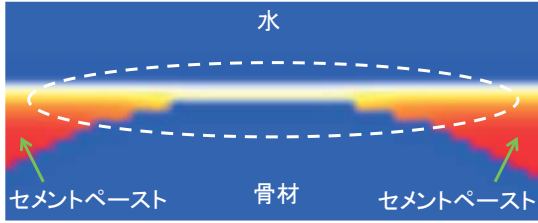
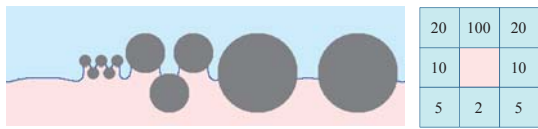


Fig. 99 Ca 溶脱が進行し脆弱化している骨材頂部の領域
Weakening of cement cells above the aggregate along with Ca leaching



(a) Ca 溶脱有 (b) Ca 溶脱無し
Fig. 100 「等方」作用における溶脱有無別の40年後の摩耗状況
Eroded states after 40 years by the isotropic action with and without Ca leaching

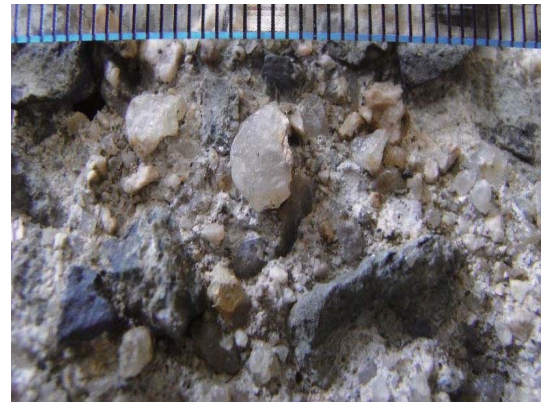


(a) 20 年後の摩耗状況 (b) 摩耗作用値
Fig. 101 上方噴流
Eroded state after 20 years by the upper dominant jet flow

4 結論

本章では、農業用コンクリート水路における摩耗機構を推定し、セルオートマトンを用いたシミュレーションを実施した。得られた結果を以下に示す。

- (1) 実水路構造物の摩耗速度の検討および採取コアの表面観察の結果から、農業用コンクリート水路における摩耗現象は、コンクリート中の結合材料であるセメントペーストの破壊に伴い、セメントペーストに固定されていた骨材が脱離する現象であると推定された。
- (2) セメントペーストの破壊に作用するのは、水および砂粒子による力学的作用と化学的作用の2種の作用であり、この両作用の複合作用により、農業用コンクリート水路の摩耗が進行していると推定された。
- (3) 農業用コンクリート水路における摩耗過程は次のように推定された。①水と接触するセメントペーストはCa溶脱が進行する、②Ca溶脱したセメントペーストは細孔量が増加し、組織構造が粗となる、③組織構造が粗となったセメントペーストは強度が低下する、④強度が低下したセメントペーストに水流および砂粒子が衝突すると、セメントペーストは疲労または切削破壊を生じ脱離する、⑤セメントペーストの脱離が進行すると、セメントペーストに固定されていた骨材の脱離が生じる。
- (4) セルオートマトンによるシミュレーションの結果、骨材の大小および配置の相違によらず多少の凹凸はあるもののセメントペーストは同程度の進行速



実摩耗



促進摩耗

Fig. 102 E地区採取コアの実摩耗表面および促進摩耗表面の比較
(写真上部に見えるスケールは、1目盛1mmを表示)
Comparison of eroded surface states of actual canal surface and accelerated erosion surface from the collected cores from the actual canal

度で摩耗すること、また、表層付近で骨材上にあるセメントペーストはCa濃度の低下が大きく力学的な弱点となることが示唆された。

- (5) 本CAモデルにおいては、溶脱の有無が摩耗進行速度に大きく影響を与えていることが見て取れた。しかし、この結果は、本モデルのセメントペースト脱離閾値、Ca濃度低下によるセメントペーストセル脱離閾値の設定によって大きく影響を受けたと考えられた。
- (6) 上方からの噴流を想定したシミュレーションの結果、骨材を頂点とする突起状の表面が形成され、水噴流摩耗試験の試験体への衝突角度により形成された試験体の表面形状と類似していることが示された。

V 水路構造物材料の促進摩耗試験

1 結論

農業用コンクリート水路の劣化の一つである摩耗現象については、その摩耗機構が十分に解明されていない。そのため、水路構造物材料であるコンクリートおよび補修材料の耐摩耗性評価に適した促進摩耗試験も確立されていない状況にある。水路構造物材料にも適用可能と考えられる規定化された耐摩耗性評価試験としては、ASTM C 1138があ

る (Liu, 1981 ; 石田, 2007 ; 高野ら, 2009)。ASTM C 1138 は、試験体形状の制約があり、実構造物採取コアによる試験が困難であるという課題がある。また、同試験で用いる3種の鉄球の直径は、13 mm, 19mm, 25 mm であり、農業用コンクリート水路の側壁へ衝突すると考えられる浮遊砂に対してかなり大きいことから、現象を模擬する試験方法としては適切でない判断される。一方、水噴流を利用した摩耗試験 (石神ら, 2005) や、水噴流に珪砂を混入した摩耗試験 (長東ら, 2010) がエロージョン摩耗を再現できる促進摩耗試験として提案されている。

本章では、第II章から第IV章までの結果を基に水路構造材料の促進摩耗試験について検討し、試験条件案を提示する。

2 水噴流摩耗試験機の摩耗機構

本論で使用した旧型水噴流摩耗試験機 (Fig. 32) および新型水噴流摩耗試験機 (Fig. 76) とも試験体を摩耗させる因子はノズルから吐出される液滴であり、摩耗機構は液滴衝突エロージョンとなる。実水路における摩耗は水流によるエロージョンであり、摩耗機構は異なると考えられる。しかし、Fig. 102 に示すように現地の実摩耗表面と促進試験後の摩耗表面とでは、細骨材周りのセメントペーストが脱離している状況などが相似しているように見える。このため、本試験機は、農業用コンクリート水路における構造材料の促進摩耗試験機として適切であると判断される。

3 標準試験条件

水噴流摩耗試験の標準試験条件を JIS R 1645 「ファインセラミックスの噴流エロージョン試験方法」にならひ、Table 20 に示す。III9 で検討したように脆性材料のエロージョン摩耗においては、液滴の衝突角度が 90° に近いほど摩耗量が大きくなるが、形成される表面形状を考慮し、衝突角度 45° を選定したい。

4 標準試験体

どのような試験機においても試験機の性能を保証するためのキャリブレーションは重要である。キャリブレーションが可能となって初めて、データの信頼性が得られ、異なる試験機間におけるデータの比較も可能となる。キャリブレーションを実施するためには、標準となる試験体が必要となる。ここでは標準試験体として、JIS R 5201 「セメント物理試験方法」に規定された質量比でセメント 1、標準砂 3、水セメント比 0.50 の JIS モルタルを提案したい。また、使用するセメントおよび標準砂は、社団法人セメント協会のセメント標準試料およびセメント強さ試験用標準砂を用いることとしたい。材料を絞り込むことで、標準試験体の摩耗特性にばらつきが小さくなるものと考えられる。

標準試験体の寸法および形状は、 $70 \times 70 \times 20$ mm の直方体とし、型枠に打設して作製する。また、試験体の評価面は、 70×70 mm の面とする。なお、評価材料の形状および寸法は標準試験体と同じとし、現地採取コアから切り出す

Table 20 水噴流摩耗試験の試験条件 (案)
Test conditions for water jet erosion test (draft)

項目	JIS R 1645	水噴流摩耗試験
ノズル入口温度	$200 \pm 5^\circ\text{C}$	—
ノズル入口圧力	17 ± 0.5 MPa	15 ± 0.1 MPa
噴流の流量	許容差が測定流量に対し $\pm 1.5\%$ 以内の流量計にて測定	0.022 ± 0.001 m ³ /min
噴流の衝突角度	試験片評価面に対して 直角	試験体評価面に対して 45°
ノズルから試験片までの距離	10 mm	50 mm
ノズル形状	$\phi 0.3$ mm \times 1.0 mm	上記ノズルから試験片までの距離を保持したままで、試験体評価面中央部の 50×50 mm 四方に対して、扇形で均等な流量分布を衝突させることが可能な形状。
試験体の回転	—	試験体は噴流の衝突角度を維持したまま評価面に対して水平に自転させる。
水質	純水 (脱イオン水)	水道水
時間	48 時間とし、必要に応じて、時間を延長する。	4 時間とし、必要に応じて、時間を延長する。 4 時間のうち、15 分、30 分、1、2 時間で試験を一時停止して摩耗量を測定する。
ノズルの交換	上記ノズル入口温度に対して、流量一定の元でノズル入口圧力が維持できなくなった時点でノズルを交換する。	ノズル入口圧力一定の元で流量が維持できなくなった時点でノズルを交換する。

か、同寸法の型枠に打設して作製する。試験体の寸法および形状を 70×70×20 mm の直方体とした理由としては、現地採取コア（多くがΦ100 mm）の断面の円に内接する矩形の一つが 70×70 mm となり試験体作製が容易なこと、また、試験面を正方形とすることで試験機治具に取り付ける際に4方向を任意に選定可能となり摩耗の偏りを抑制できること、さらに、70×70×20 mm の型枠は JIS A 1171「ポリマーセメントモルタルの試験方法」の接着強さ試験の基板作製用として市販されており入手が容易であることが挙げられる。

セメント系材料は、材齢によりその発現強度が異なる。

Fig. 103 に JIS モルタルの材齢 28 日と 94 日の平均摩耗深さの経時変化を示す。なお、この試験は旧型試験機を用いて実施された。試験 20 時間で平均摩耗深さに 2.4 mm の差が生じ、材齢 94 日の耐摩耗性が高くなっていることが示された。コンクリートの標準的な試験材齢が 28 日であることから、それに合わせて標準試験体の材齢も 28 日にキャリブレーションをすることとしたい。

5 評価指標

促進摩耗試験の評価指標としては、容積減少量、質量減少量、摩耗深さなどが用いられる。第III章においては、摩耗深さを用いて検討した。摩耗深さを用いた理由は、摩耗深さの計測がそのまま表面形状を定量的に把握することに繋がること、また、試験中に試験体の欠けなどが生じても摩耗深さの計測値が影響を受けることが少なく頑強な指標であることが挙げられる。さらに、実構造物における摩耗現象の把握は、摩耗深さがその指標となることから、促進摩耗試験結果との比較が容易となる。

a 摩耗深さ

摩耗深さとしては平均摩耗深さが多く用いられ、第III章においても平均摩耗深さを元に議論を進めた。しかし、第IV章で示されたように農業用コンクリート水路における摩耗がセメントペーストの破壊であることに着目して摩耗現象を把握する必要がある。摩耗深さの計測はレーザー変位計などを用いてある基準面から対象物の表面までの距離を測定し、ある基準長内でのデータを平均して算定することとなる。

ところが、摩耗が進行しても、骨材が脱離するまでは、骨材表面の摩耗深さが全体の摩耗深さに影響を与えることとなる。つまり、見かけの摩耗深さとなる。見かけの摩耗深さは、真の摩耗深さ（摩耗フロント）を過小評価することとなる。例えば、コンクリートの耐久性に影響を与える中性化残りの評価は、摩耗フロントで行うのが適切と考えられる。この摩耗フロントの算定方法としては、**Fig. 104** のように摩耗表面の骨材部分を除いた領域で摩耗フロントまでの距離を計測して平均値を取ることが考えられる。しかし、この方法では労力がかかること、計測者の主観の影響が出てくることから現実的ではない。必要となるのは、摩耗深さの算定値に骨材の影響をできるだけ排除する

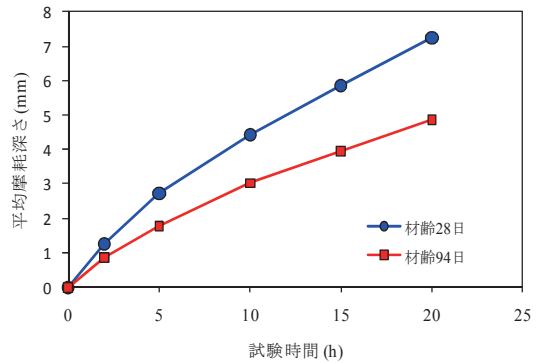


Fig. 103 JIS モルタルの材齢 28 日および 94 日の試験体の平均摩耗深さの経時変化
Average erosion depth versus test time using material age 28 and 94 days of JIS mortar

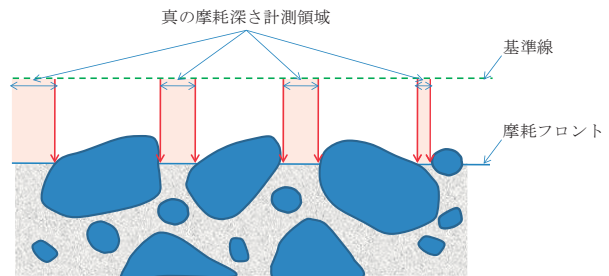


Fig. 104 摩耗フロントと真の摩耗深さ計測領域
Concepts of the erosion front position and the measurement region of true erosion depth

ことにある。

そこで、計測領域に出現する骨材の面積率を求め、それを元に摩耗フロントを算定する方法を考えた。ここでは、コンクリートを例に検討する。コンクリート標準示方書[施工編]で示される標準的な示方配合を元に求めた骨材（細骨材+粗骨材）面積率が **Table 21** である。なお、各材料の密度は **Table 22** とした。骨材面積率とは、コンクリート中に含まれる骨材容積をコンクリート容積で除した値で、コンクリートを任意の面で切断した時に切断面全体に占める骨材面積の期待値を表す。最小値は 62.3%，最大値は 71.1%，平均値は 66.9% となった。ただし、これらの値は任意の切断面における値であり、実際には、摩耗フロントの進行とともに任意の面の重なりが生じて骨材面積率は多少大きくなると推定される。ここでは、骨材面積率を 70% と設定する。

次に基準線から実際の摩耗表面までの計測距離データを小さな値（骨材表面のデータである可能性が高い）から大きな値（摩耗フロントである可能性が高い）まで並び替え、データの小さい方から 70% までは使わず、残り 30% のデータを用いて摩耗フロントを算定する。その場合、平均値と中央値が考えられるが、中央値の方が外れ値の影響を受けないためにより頑健であることから適切であると考えられる。中央値を用いる場合、この方法はデータを昇順に並べた場合の 85% 点を求めることと同じである。

例として、E 地区側壁水中部コアの促進摩耗試験のデータを **Fig. 105** に示す。この図より、大きなパーセント点ほど平均値より値が大きくなるが、95% 点までは外れ値の影

Table 21 標準的なコンクリート配合における骨材面積率
Aggregate area ratio to concrete cross-sectional area with standard specified mix proportions

	粗骨材の 最大寸法 (mm)	空気量 (%)	水セメント 比 W/C (%)	細骨材 率 s/a (%)	単位量(kg/m ³)			単位容積(m ³ /m ³)		骨材 面積率 (%)	
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	細骨材 s		粗骨材 g
AE 剤	15	7.0	55	47	180	327	796	907	0.304	0.342	64.6
	15	7.0	50	46	180	360	766	910	0.292	0.343	63.6
	15	7.0	45	45	180	400	735	908	0.280	0.343	62.3
	20	6.0	55	44	175	318	765	985	0.292	0.372	66.4
	20	6.0	50	43	175	350	737	988	0.281	0.373	65.4
	20	6.0	45	42	175	389	706	986	0.269	0.372	64.2
	25	5.0	55	42	170	309	750	1048	0.286	0.395	68.2
	25	5.0	50	41	170	340	722	1051	0.276	0.397	67.2
	25	5.0	45	40	170	378	692	1050	0.264	0.396	66.0
	40	4.5	55	39	165	300	710	1123	0.271	0.424	69.5
	40	4.5	50	38	165	330	682	1126	0.260	0.425	68.5
	40	4.5	45	37	165	367	653	1125	0.249	0.424	67.4
AE 減水 剤	15	7.0	55	48	170	309	832	912	0.318	0.344	66.2
	15	7.0	50	47	170	340	803	916	0.306	0.346	65.2
	15	7.0	45	46	170	378	771	916	0.294	0.346	64.0
	20	6.0	55	45	165	300	801	991	0.306	0.374	68.0
	20	6.0	50	44	165	330	773	995	0.295	0.375	67.0
	20	6.0	45	43	165	367	742	995	0.283	0.375	65.9
	25	5.0	55	43	160	291	786	1054	0.300	0.398	69.8
	25	5.0	50	42	160	320	758	1058	0.289	0.399	68.8
	25	5.0	45	41	160	356	727	1059	0.278	0.400	67.7
	40	4.5	55	40	155	282	745	1130	0.284	0.426	71.1
	40	4.5	50	39	155	310	717	1134	0.274	0.428	70.2
	40	4.5	45	38	155	344	688	1135	0.262	0.428	69.1

Table 22 材料の密度
Densities of materials

材料	密度 (kg/m ³)
水	1,000
セメント	3,150
細骨材	2,620
粗骨材	2,650

響を大きく受けていないこと、また、最大値(100%点)は外れ値の影響を受けていることが読み取れる。平均値に対する比では、85%点で2.1~2.4倍、95%点で2.7~3.4倍という結果が得られた。以上の結果より、摩耗深さの指標としては、真の摩耗フロント深さに近いと考えられる85~95%点を用いることを提案したい。

85~95%点を用いることにより、コンクリートの促進摩耗試験における副次的な効果も期待できる。III10で検討したように現地コアを用いて本来のコンクリートの耐摩耗性を評価しようとする場合、摩耗作用を受けていないだけで平滑な表面を含むコアを採取する必要がある。しかし、そのようなコアの採取が困難な場合、または、表面が化学的変質を生じていて初期のコンクリートと性状が相

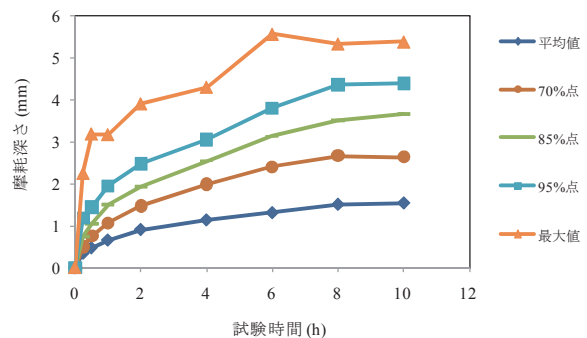


Fig. 105 E地区採取コアの各パーセント点摩耗深さの経時変化

Comparison of each percentile erosion depth using collected core specimen in the E district

違する場合、採取コアを切断して健全な平滑面を出す必要が生じる。また、採取したコアの摩耗特性がコンクリートの深さ方向にどのように変化するかを知りたい場合にも、コアの切断面における試験が必要となる。ところが、切断面では骨材が予め露出していることとなり、骨材が露出していない試験体との比較において齟齬が生じる可能性がある。摩耗深さとして85~95%点を用いれば、この問題がある程度解消されると推察される。

b 比摩耗速度および耐摩耗性

各材料の摩耗特性の指標としては、JIS モルタルの摩耗速度に対する各材料の比摩耗速度およびその逆数を提案したい。V3 で検討したように、促進摩耗試験においては、試験機のキャリブレーション、また、異なる試験機間における耐摩耗性データの比較には標準試験体の使用が不可欠であると考えている。Table 20 の試験条件を満足する試験機であっても各試験機における結果に偏りが生じる可能性がある。このため、対象材料の促進摩耗試験の前または後に標準試験体の試験を入れ、標準試験体の摩耗速度に対する対象材料の比摩耗速度を求めるとする。III9 で検討したデータを基に HPCRCC および PCM-N の比摩耗速度を Fig. 106 に示す。また、それらの逆数を耐摩耗性として Fig. 107 に示す。耐摩耗性指標が 1 であれば、JIS モルタルと同等の耐摩耗性を有し、1 より大きくなれば、JIS モルタルより耐摩耗性に優れた材料であることを示す。

6 実構造物の供用時間に対する促進倍率

補修材料に促進摩耗試験を適用する目的の一つに、実構造物に施工した場合に供用予定年数にどのように摩耗が進行するのかの予測がある。この場合、水噴流摩耗試験の試験時間と実構造物の供用時間との相関を把握する必要がある。これは、各水路によって流量、流速、砂混入量、通水期間、コンクリート材料の耐摩耗性などが相違しているために一律の促進倍率を設定することができない理由による。そのため、III10 で検討したように現地採取コアから切り出した試験体の健全面で試験を実施し、実水路摩耗面の推定摩耗深さとの比較から水噴流摩耗試験の促進倍率を求めるとなる。ただし、健全と考えられる面においても Ca 溶脱などによる変質が生じている可能性があるため、EPMA を利用して評価試験体の採取位置を選定する必要がある。

ここでは、Fig. 85 および Fig. 88 から Ca 未溶脱部のデータを抽出して検討する (Fig. 108, Fig. 109)。これらのデータから各試験体における代表摩耗速度を算定する必要があるが、両図に示されるように摩耗深さは試験時間とともに、また、摩耗速度は摩耗深さとともに変化しているため容易ではない。これは、III5 および III6 で検討したように、試験時間の経過とともに骨材露出による摩耗進行の抑制が生じるためである。ここで把握したいのは、V5a で検討した真の摩耗フロントの摩耗速度である。そのためには、骨材露出による摩耗進行の抑制が生じる前の試験開始初期のデータが適切であると考えている。試験開始初期のデータを選定する場合、2 種の方法がある。一つは試験時間による方法であり、もう一つは摩耗深さによる方法である。試験時間による方法は、例えば、試験開始から 1 時間までのデータを用いて摩耗速度を求める方法である。摩耗深さによる方法は、例えば、試験開始から摩耗深さが 2 mm を最初に超えたデータまでを用いて摩耗速度を求める方法である。

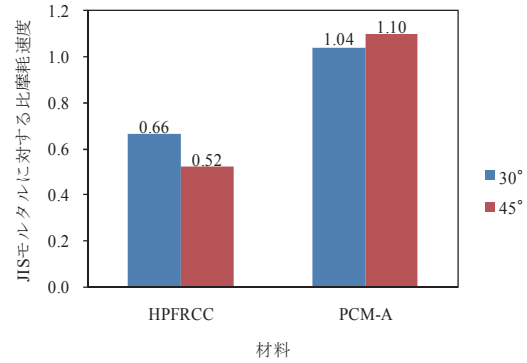


Fig. 106 JIS モルタルに対する HPCRCC および PCM-A の比摩耗速度
Erosion rate ratio of HPCRCC and PCM-A to JIS mortar

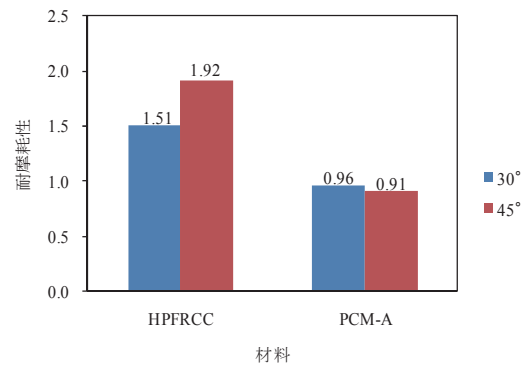


Fig. 107 HPCRCC および PCM-A の耐摩耗性
Erosion resistance of HPCRCC and PCM-A

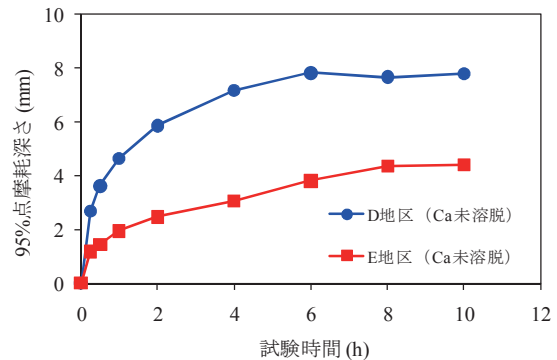


Fig. 108 95%点摩耗深さの経時変化
Comparison of 95th percentile erosion depth of collected cores from the D and E district

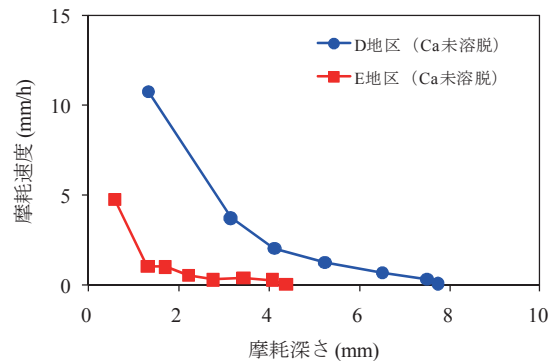


Fig. 109 摩耗速度と摩耗深さとの関係
Comparison of the erosion rate versus the erosion depth of collected cores from the D and E district

Table 23 DおよびE地区の促進倍率の算定条件
Calculation conditions of accelerating magnification in the D and E districts

	D地区	E地区
供用年数 (year)	38	38
実水路最大高さ Rz (mm)	7.05	4.48
実水路最大高さ+想定かぶり $Rz+6$ (mm)	13.05	10.48
実水路平均摩耗速度 $[Rz+6]$ (mm/year)	0.344	0.276
コア平均摩耗速度[1時間] (mm/h)	5.41	2.26
コア平均摩耗速度[2時間] (mm/h)	3.54	1.49
コア平均摩耗速度[2mm深さ] (mm/h)	10.75	1.49
コア平均摩耗速度[4mm深さ] (mm/h)	5.41	0.64

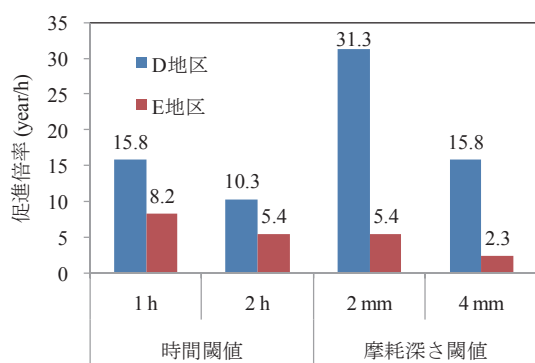


Fig. 110 各閾値と促進倍率との関係
Comparison of the accelerating magnification at the each threshold

ここでは、試験時間の閾値として1時間と2時間、摩耗深さの閾値として2mmと4mmとして促進倍率を求めてみた。Table 23に示すように各閾値におけるコア平均摩耗速度の切片を0とした近似直線の傾きとして求め、促進倍率を算定した。その結果、Fig. 110の促進倍率が得られた。両地区とも得られた値はばらついており、最大値は最小値の3倍を超えていた。そのため、促進倍率の求め方については、さらにデータの蓄積が必要であると考えられた。

7 複合摩耗試験

2では農業用コンクリート水路における摩耗現象は、力学的作用と化学的作用の複合作用により進行すると述べた。ところが、水噴流摩耗試験が単独で評価できるのは、力学的作用のみである。20~40年という補修に課せられた予定供用年の耐摩耗性を評価するためには、化学的作用による材料の変質も考慮した複合摩耗試験が必要となる。本論においては、III7において先行してCa溶脱させた試験体を用いて水噴流摩耗試験を実施し、試験体の表層付近では、健全部の約20倍の摩耗速度となることを明らかにした。このように対象とする化学的作用を促進して変質させた試験体を用いた複合摩耗試験を用いることが、今後の材料試験では重要となる。また、試験データの蓄積が進めば、複合摩耗試験の試験条件なども明らかになることが期待される。

8 結論

本章では、水路構造材料の促進摩耗試験について検討し、標準試験条件、標準試験体、評価指標、促進倍率、複合摩耗試験などについて案を提示した。得られた結果を以下に示す。

- (1) JIS R 1645「ファインセラミックスの噴流エロージョン試験方法」にならい、水噴流摩耗試験の標準試験条件を提示した。
- (2) 標準試験体としてJIS R 5201「セメント物理試験方法」に規定されたJISモルタルを提案し、また、寸法および形状は、70×70×20mmの直方体とすることを提案した。同寸法は、現地採取コアから試験体を切り出す場合も加工が容易である。
- (3) 摩耗深さの指標として、摩耗フロントをよりの確に把握できるように85%~95%摩耗深さを提案した。
- (4) 各材料の摩耗特性の指標として、JISモルタルの摩耗速度に対する各材料の比摩耗速度およびその逆数を耐摩耗性指標として提案した。
- (5) 水噴流摩耗試験の試験時間と実構造物の供用時間との相関を把握するために、現地採取コアから切り出した試験体の健全面で試験を実施し、実水路摩耗面の推定摩耗深さとの比較から水噴流摩耗試験の促進倍率を求めることを提案した。
- (6) 農業用コンクリート水路における摩耗現象は、力学的作用と化学的作用の複合作用により進行することから、摩耗試験も対象とする化学的作用を促進した試験体を使用するなどの複合摩耗試験を実施する必要がある。

VI 結言

本研究では、農業用コンクリート水路に多く見られる劣化現象の一つである摩耗現象を対象として、摩耗現象の状況(第II章)、水噴流摩耗試験(第III章)、摩耗機構(第IV章)、水路構造材料の促進摩耗試験(第V章)の検討を行った。得られた知見を総括すると以下になる。

1 研究の総括

第II章では、農業用コンクリート水路で生じている摩耗機構の解明に資するため、実水路の摩耗状況を把握することを目的として現地調査を実施した。調査対象とした供用35～51年が経過した5地区の現場打ちコンクリート水路では、コンクリート表面の摩耗形状計測、コア採取（3地区）、EPMA分析（2地区）、水噴流摩耗試験（2地区）を実施した。また、比較のために頭首工1地区、ポリマーセメントモルタルによる補修水路1地区においても摩耗形状計測を実施した。その結果、水路側壁における表面粗さは、気中部より水中部において表面が粗くなっており、同じ気中部および水中部においても水路底版に近くなるほど表面が粗くなる傾向にあることが明らかとなった。この理由としては、底版に近づくほど水に接触して摩耗作用を受ける時間が増加することが考えられた。5地区についてから推定した粗度係数の最小値は0.0113、最大値は0.0192であった。最大値の地区は、供用年数が51年と長く、摩耗状況がより進行していると考えられた。この地区を除けば、推定粗度係数が0.0113～0.0156であり、土地改良事業計画設計基準・設計「水路工」に現場打ちコンクリートの粗度係数として記載されている最小値0.012および最大値0.016に概ね合っていることが示された。また、算術平均粗さ R_a と最大高さ R_z との関係は線形の関係性を有していることが明らかとなり、粗度係数の推定には簡易的に最大高さを用いることが可能であることが明らかとなった。供用40年程度の水路では、最大高さがほぼ10mm程度となっており、竣工時からの摩耗した深さは最大高さ16mm程度であると推察された。さらに、農業用コンクリート水路においては、その摩耗状況から水流および水流中の砂などによるエロージョン摩耗が進行しており、セメント部が脱離し、続いて、細骨材、粗骨材の順で脱離過程が進んでいると考えられた。

第III章では、農業水利施設で生じるセメント系材料のエロージョン摩耗特性について把握することおよびエロージョン摩耗を模擬する水噴流摩耗試験の有用性を明らかにすることを目的として、水噴流摩耗試験をセメント系材料に適用した。その結果、水噴流摩耗試験機における吐出圧力の増加により、摩耗速度は加速度的に増大し、その関係は、累乗関数で近似できることが明らかとなった。また、水噴流摩耗試験機で使用する吐出装置が異なると摩耗性状も相違し、その原因としては、スタンドオフ距離、吐出流量、液滴径などの水噴流の形態などの相違が考えられた。

セメントペースト試験体の摩耗量は線形的に増加し、一方、モルタル試験体およびコンクリート試験体では骨材露出とともに摩耗量の増加が逡減し、その原因としては、摩耗表面積に占める骨材表面積の割合の増加が骨材下部への水噴流の衝突を抑制するためであると考えられた。コンクリート試験体の摩耗過程は、セメントペーストの脱離が先行し、細骨材、粗骨材の順で骨材が露出し、試験表面に

おける骨材露出領域の拡大がセメントペーストの脱離を抑制し、その結果、摩耗進行が逡減する過程であると考えられた。

Ca溶脱試験体の表層付近の摩耗速度は、未溶脱領域の最大19.4～27.6倍の摩耗速度であり、耐摩耗性の低下が著しいことが明らかとなった。また、摩耗速度の大きな領域は、Ca溶脱領域とほぼ一致し、Ca溶脱による表層の脆弱化が原因と考えられた。Ca溶脱領域と未溶脱領域との境界付近において力学的特性の特異な領域が存在する可能性が示唆された。このような結果から、水噴流摩耗試験は、Ca溶脱領域の力学的特性の変化を測定する一つの手法として有用であることが示された。

補修材料の相違により、摩耗進行の速度に差のあることが示された。このため、水噴流摩耗試験による補修材料の耐摩耗性の相対比較が可能であると判断された。5種の補修材に含まれる骨材の粒径がモルタル試験体に含まれる骨材の粒径よりも小さいため、骨材が露出しても算術平均粗さがモルタル試験体に比較して小さくなり、推定粗度係数も小さいと考えられた。ただし、モルタル試験体の推定粗度係数が最小値0.011、最大値0.015の範囲内に収まることから推定値は概ね妥当であると判断された。水噴流摩耗試験から得られる各補修材料の平均摩耗深さと推定粗度係数との関係は、材料選定をする上で有効な情報になりうると判断された。

新型水噴流摩耗試験機を用いた試験条件としては、JISモルタルの試験効率性および表面形状を考慮して、水噴流の試験体への衝突角度を45°程度にすることが適切と判断された。実水路から採取したコアを用いた水噴流摩耗試験の結果、施工時および供用時に外部環境と接するコンクリートにおいては、施工状況や化学的作用の影響を受けてコンクリートが変質する可能性が高く、摩耗特性が初期コンクリートと相違すると考えられた。Ca溶脱による脆弱化が進行しても接触している水分が静水または微流速の水であればエロージョン摩耗には至らず、化学的変質と流水との接触がエロージョン摩耗を生じさせると考えられた。

第IV章では、第II章および第III章の結果を基に農業用コンクリート水路における摩耗機構を推定し、セルオートマトンを用いたシミュレーションを実施した。まず、実水路構造物の摩耗速度の検討および採取コアの表面観察の結果から、農業用コンクリート水路における摩耗現象は、コンクリート中の結合材料であるセメントペーストの破壊に伴い、セメントペーストに固定されていた骨材が脱離する現象であると推定された。セメントペーストの破壊に作用するのは、水および砂粒子による力学的作用と化学的作用の2種の作用であり、この両作用の複合作用により、農業用コンクリート水路の摩耗が進行していると推定された。

セルオートマトンによるシミュレーションの結果、①骨材の大小および配置の相違によらず多少の凹凸はあるもののセメントペーストは同程度の進行速度で摩耗する、②

表層付近で骨材上にあるセメントペーストは Ca 濃度の低下が大きく力学的な弱点となることが示唆された。また、本 CA モデルにおいては、溶脱の有無が摩耗進行速度に大きく影響を与えていることが見て取れた。しかし、この結果は、本モデルのセメントペースト脱離閾値、Ca 濃度低下によるセメントペーストセル脱離閾値の設定によって大きく影響を受けたと考えられた。さらに、上方からの噴流を想定したシミュレーションの結果、骨材を頂点とする突起状の表面が形成され、水噴流摩耗試験の試験体への衝突角度により形成された試験体の表面形状と類似していることが示された。

第V章では、水路構造材料の促進摩耗試験の標準試験条件、標準試験体、評価指標、促進倍率、複合摩耗試験の案を提示することも目的に、第II章から第IV章までの結果について考察した。まず、JIS R 1645「ファイナセラミックスの噴流エロージョン試験方法」にならい、水噴流摩耗試験の標準試験条件を提示した。試験条件の項目としては、ノズル入口圧力、噴流の流量、噴流の衝突角度、ノズルから試験片までの距離、ノズル形状、試験体の回転、水質、時間、ノズルの交換を設定した。また、標準試験体としては、JIS R 5201「セメント物理試験方法」に規定された JIS モルタル、形状および寸法は、70×70×20 mm の直方体とすることを提案した。同形状および寸法は、現地採取コアから試験体を切り出す場合も加工が容易である。

摩耗深さの指標として、摩耗フロントをよりの確に把握できるように 85%~95%摩耗深さを提案した。そして、各材料の摩耗特性の指標として、JIS モルタルの摩耗速度に対する各材料の比摩耗速度およびその逆数を耐摩耗性指標として提案した。なお、水噴流摩耗試験の試験時間と実構造物の供用時間との相関を把握するために、現地採取コアから切り出した試験体の健全面で試験を実施し、実水路摩耗面の推定摩耗深さとの比較から水噴流摩耗試験の促進倍率を求めることを提案した。

農業用コンクリート水路における摩耗現象は、力学的作用と化学的作用の複合作用により進行することから、摩耗試験も対象とする化学的作用を促進した試験体を使用するなどの複合摩耗試験を実施する必要性について指摘した。

2 今後の展望

コンクリート構造物の摩耗現象は、その摩耗機構の解明および促進試験方法の確立において未だ発展途上にある。これは、摩耗現象の基本機構がいまだに確実には解っていないからである(笹田, 2008)。本論においては、農業水利施設で生じている摩耗現象の一部である農業用コンクリート水路の摩耗のみを対象とした。その摩耗がセメントペーストの破壊・脱離、細骨材の脱離、粗骨材の脱離の順に進行していることを明らかにしたが、そもそのセメントペーストの破壊がどのような機構で生じるのかについては、明らかになっていない。つまり、摩耗機構のうち、壁面せん断応力、乱流による応力、砂粒子の衝突のいずれ

がエロージョン摩耗の力学的作用として卓越しているのか、また、その作用は切削と表面疲労のどちらをコンクリートに及ぼすのかが未解明である。構造材料の耐摩耗性向上のための品質改善の手法は、摩耗機構が異なれば対策も異なってくる。摩耗機構が切削であれば「硬度を改善し、固くすること」であり、表面疲労であれば「脆さを改善し、ひび割れを抑制すること」になる(堀口, 1993)。今後の農業用コンクリート水路の耐久性を高めるためには、摩耗機構を把握して耐摩耗性の高い材料を用いること、そして、長期間の水接触環境下に置かれても化学的変質が生じにくい材料を用いることが必要となる。また、乾湿繰り返しセメントペーストの毛細管空隙に相当する細孔を増加させ組織を粗くするという報告(青野ら, 2006)があることから、かんがい期と非かんがい期を有する農業用コンクリート水路においても同様の組織構造の変化の可能性が示唆され、耐摩耗性向上のために考慮すべき化学的作用の一つと考えられる。

謝辞：本研究の取りまとめに際しましては、多くの方のご指導とご協力をいただきました。島根大学生物資源科学部教授 長東勇博士には、非常に多くのご指導、ご助言、励ましをいただきました。心より感謝申し上げます。先生が旧農業工学研究所造構部施設機能研究室の初代室長として研究室を立ち上げられた時に筆者は室員として配属され、研究のご指導をいただきました。当時は、正にストックマネジメント事業が始まろうとしている時であり、右も左もわからぬ筆者をストックマネジメント研究に導いていただきましたことに重ねて感謝の意を表します。また、本研究を進める上で、貴重なご教示を賜りました、鳥取大学農学部教授 服部九二雄博士、同准教授 緒方英彦博士、島根大学生物資源科学部教授 武田育郎博士、同准教授 石井将幸博士に心より感謝申し上げます。そして、本研究を進めるにあたり、在籍しました研究室関係者や農林水産省本省をはじめ各農政局の担当者の方々の多大なるご支援を頂きました。ここに記して深く感謝いたします。

参考文献

- 1) ACI Committee 210 (1993) : Erosion of Concrete in Hydraulic Structures, *American Concrete Institute*, 1-8.
- 2) 青野義道・松下文明・柴田純夫・濱幸雄 (2006) : 乾湿繰り返し及ぼすコンクリートの耐凍害性への影響とその劣化メカニズムに関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 607, 15-22.
- 3) Aquaro, D. (2006) : Erosion due to the impact of solid particles of materials resistant at high temperature, *Meccanica*, 41(5), 539-551.
- 4) Bentz, D.P., and Garboczi, E.J. (1992) : Modelling the leaching of calcium hydroxide from cement paste: effects on pore space percolation and diffusivity, *Materials and Structures*, 25, 523-533.
- 5) Bitter, J. G. A. (1963a) : A study of erosion phenomena part

- I, *Wear*, **6**(1), 5-21.
- 6) Bitter, J. G. A. (1963b) : A study of erosion phenomena part II, *Wear*, **6**(3), 169-190.
- 7) Carde, C. François, R. Torrenti, J. (1996) : Leaching of both calcium hydroxide and C-S-H from cement paste: Modeling the mechanical behavior, *Cement and Concrete Research*, **26**(8), 1257-1268.
- 8) Chopard, B. and Dupuis, A. (2002) : Lattice Boltzmann models: an efficient and simple approach to complex flow problems, *Computer Physics Communications*, **147**(1-2), 509-515.
- 9) D'Ambrosio, D., Gregorio, S., Gabriele, Di S. and Gaudio, R. (2001) : A Cellular Automata model for soil erosion by water, *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, **26**(1), 33-39.
- 10) 出口朗・増田良一・斉藤裕司 (2000) : 約 80 年間水と接していたコンクリートの変質状態, *Cement Science and Concrete Technology*, **54**, 174-179.
- 11) 土木学会 (2006) : 硬化コンクリートのミクロの世界を拓く新しい土木学会基準の制定—EPMA 法による面分析方法と微量成分溶出試験方法について—, 土木学会, 64-66
- 12) 土木学会コンクリート委員会 (2001) : 2001 年制定コンクリート標準示方書 [維持管理編], 土木学会
- 13) 土木学会コンクリート委員会 (2008a) : 2007 年制定コンクリート標準示方書 [維持管理編], 土木学会
- 14) 土木学会コンクリート委員会 (2008b) : 2007 年制定コンクリート標準示方書 [施工編], 土木学会
- 15) 土木学会コンクリート委員会化学的侵食・溶脱研究小委員会 (2003) : コンクリートの化学的侵食・溶脱に関する研究の現状, 土木学会
- 16) 土木学会メンテナンス工学連合小委員会 (2004) : 社会基盤メンテナンス工学, 東京大学出版会
- 17) Frisch, U., Hasslacher, B. and Pomeau, Y. (1986) : Lattice-Gas Automata for the Navier-Stokes Equation, *Physical review letters*, **56**(14), 1505-1508.
- 18) Goretta, K. C., Burdt, M. L., Cuber, M. M., Perry, L. A., Singh, D., Wagh, A. S., Routbort J. L. and Weber, W. J.(1999) : Solid-particle erosion of Portland cement and concrete, *Wear*, **224**(1), 106-112.
- 19) 芳賀和子・豊原尚実・須藤俊吉・金子昌章・小林康利・小澤孝 (2002) : セメント硬化体の溶解に伴う変質 (I) 遠心力法によるセメント硬化体の通水試験, 日本原子力学会和文論文誌, **1**(1), 20-29.
- 20) Hassan, A. I. and Kosmol, J. (2001) : Dynamic elastic-plastic analysis of 3D deformation in abrasive waterjet machining, *Journal of Materials Processing Technology*, **113**(1-3), 337-341.
- 21) Heuer, V. , Walter, G. (1998) : Wear of fibrous ceramic components caused by high velocity gas streams: Erosion mechanisms, *Cfi-Ceramic Forum International*, **75**(11-12), 29-35.
- 22) 日野幹雄 (1992) : 流体力学, 朝倉書店, 386-388.
- 23) 久田真 (2008) : 大河津分水路, コンクリート工学, **46**(9), 156-159.
- 24) 堀口敬 (1993) : コンクリートの摩耗に関する研究の現状, コンクリート工学, **31**(10), 17-27.
- 25) Horszczaruk, E. K. (2009) : Hydro-abrasive erosion of high performance fiber-reinforced concrete, *Wear*, **267**(1-4), 110-115.
- 26) Hu, X.G., Momber, A. W. and Yin, Y. G. (2002) : Hydro-abrasive erosion of steel-fibre reinforced hydraulic concrete, *Wear*, **253**, 848-854.
- 27) 古澤靖彦 (1997) : カルシウムの溶出によるコンクリート劣化とモデル化に関する研究動向, コンクリート工学, **35**(12), 29-32.
- 28) 石田知子 (2007) : 水理構造物のコンクリートの摩耗評価に関する試験方法の現状, コンクリート工学, **45**(3), 50-54.
- 29) 石神暁郎・森充広・渡嘉敷勝・増川晋 (2005) : 農業用水路コンクリートに生じる摩耗現象と促進試験方法に関する検討, コンクリート工学年次論文集, **27**(1), 805-810.
- 30) 石神暁郎・渡嘉敷勝・森充広・増川晋 (2006) : 農業用コンクリート水路における断面修復材の耐摩耗性評価, コンクリート工学年次論文集, **28**(1), 1739-1744.
- 31) 加藤智丈・石神暁郎・渡嘉敷勝・森充広 (2009) : 農業用水路コンクリートに生じる摩耗に関する調査手法, コンクリート工学年次論文集, **31**(1), 931-936.
- 32) 加藤恭義・光成友孝・築山洋 (1998) : セルオートマトン法—複雑系の自己組織化と超並列処理, 森北出版
- 33) 勝山達郎 (2002) : スtockマネジメントの導入による農業水利施設の有効活用, ARIC 情報, **67**, 17-21.
- 34) 河野広隆 (2007) : コンクリート構造物の維持管理のあり方再考, セメント・コンクリート, **720**, 15-21.
- 35) 小林陵二・新井隆景・山田泰司 (1987) : ウォータージェット加工技術における噴流の構造と金属材料の懐食過程, 日本機械学会論文集 (B 編), **53**(489), 1539-1542.
- 36) Li, D. Y. and Liu, R. (1999) : The mechanism responsible for high wear resistance of Pseudo-elastic TiNi alloy - a novel tribo-material, *Wear*, **229**, 777-783.
- 37) Liu, T. C. (1981) : Abrasion resistance of concrete, *Journal of the American Concrete Institute*, **78**(5), 341-350.
- 38) Liu, Y.W. et al. (2006) : Abrasion erosion of concrete by water-borne sand, *Cement and Concrete Research*, **36**, 1814-1820.
- 39) 眞嶋光保・野田純嗣・木原義孝・宮本浩治 (1991) :

- 水道施設におけるコンクリートの劣化現象, 材料, 40(456), 29-35.
- 40) 松村昌信・岡良則・横畑英明 (1986) : 銅合金のエロージョン・コロージョン機構, 防食技術, 35(12), 706-711.
- 41) 三科博司 (2010) : 摩耗現象のモデル化, トライボロジスト, 55(1), 31-36.
- 42) 宮川豊章 (2004) : コンクリート構造物の戦略的マネジメントに向けて, コンクリート工学, 42(5), 4-8.
- 43) 宮元均 (2002) : 適切な施設の維持管理に向けた取り組みについて, 農業土木学会誌, 70(5), 393-396.
- 44) Momber, A. and Kovacevic, R. (1994) : Fundamental investigations on concrete wear by high velocity water flow, *Wear*, **177**, 55-62.
- 45) Momber, A.W. (2000) : The erosion of cement paste, mortar and concrete by gritblasting, *Wear*, **246**, 46-54.
- 46) 森充広・渡嘉敷勝・山崎大輔・加藤智丈 (2009) : 長期供用された農業用水路のコンクリート通水表面の変質, コンクリート工学年次論文集, 31(1), 919-924.
- 47) 森丈久 (2005) : 農業水利施設へのストックマネジメント導入に向けた取り組み, 農業土木学会誌, 73(11), 3-6.
- 48) 森丈久・森充広・渡嘉敷勝・中矢哲郎 (2008) : 農業水利施設の構造機能診断のための調査手法, 農業農村工学会誌, 76(3), 205-208.
- 49) 森丈久・西野徳康・藤原鉄朗 (2009) : マルコフ連鎖を用いた農業水利施設群の劣化進行モデル, 農業農村工学会論文集, 264, 657-665.
- 50) 森下信・長谷川純一・中野孝昭・築山洋 (1998) : セルラオートマトン法による拡散現象の解析, 日本造船学会論文集, 183, 181-187.
- 51) 中達雄・田中良和・向井章恵 (2003) : 施設更新に対応する水路システムの性能設計, 農業土木学会誌, 71(5), 51-56.
- 52) 中矢哲郎・渡嘉敷勝・森充広・森丈久 (2008) : 摩耗したコンクリート水路表層形状からの粗度係数推定手法, 農業農村工学会論文集, 258, 501-506.
- 53) 長東勇・甲本達也・青山咸康・野中資博, 服部九二雄 (2002) : 農業水利コンクリート構造物の更新と維持管理, 農業土木学会誌, 70(12), 1081-1084.
- 54) 長東勇・上野和広・渡嘉敷勝・石井将幸 (2010) : 水砂噴流摩耗試験機の試作とその性能評価, 農業農村工学会論文集, 266, 25-31.
- 55) 野中資博 (2001) : コンクリート水利施設の劣化機構と老朽化診断, 農業土木学会誌, 69(5), 465-469.
- 56) 農林水産省 (2005) : 食料・農業・農村基本計画 (平成17年3月), <http://www.maff.go.jp/keikaku/20050325/20050325honbun.pdf>, 2007.3
- 57) 農林水産省 (2010) : 食料・農業・農村基本計画 (平成22年3月), http://www.maff.go.jp/j/keikaku/k_aratana/pdf/kihon_keikaku_22.pdf, 2010.3
- 58) 農林水産省農村振興局 (2001) : 土地改良事業計画設計基準・設計「水路工」, 農業土木学会, p.156
- 59) 農林水産省農村振興局整備部設計課施工企画調整室 (2007) : 農業水利施設のコンクリート構造物調査・評価・対策工法選定マニュアル, 農業土木事業協会
- 60) 農林水産省農村振興局整備部水利整備課施設管理室 (2007) : 農業水利施設の機能保全の手引き, 農業土木事業協会
- 61) 尾口本一・大井才生・久田真 (2001) : 水和物組成の違いがCaの溶脱による硬化体物性の変化に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, 23(2), 457-462.
- 62) 奥田徹 (1979) : ダムコンクリートのすりへり・洗掘損傷, コンクリート工学, 17(11), 40-43.
- 63) 奥田徹 (1984) : コンクリート構造物のすりへり摩耗による機能的寿命とその再生, 第57回コンクリート講習会テキスト, (社)セメント協会, 65-78
- 64) Orbanic, H. and Junkar, M. (2004) : Simulation of abrasive water jet cutting process: Part 2. Cellular automata approach, *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, **12**(6), 1171-1184.
- 65) 大即信明・皆川浩・宮里心一・西田孝弘 (2001) : 100年にわたるコンクリートのカルシウム溶出による変質の予測に関する実験的研究, 土木学会論文集, 676(V-51), 41-49.
- 66) 大脇英司・宇治公隆・坂井悦郎・大門正機 (2000) : コンクリート構造物の耐久性評価へのビッカース硬さ測定法の応用, セメント・コンクリート, 638, 36-41.
- 67) Packard, N. H., Wolfram, S. (1985) : Two-dimensional cellular automata, *Journal of Statistical Physics*, **38**(5-6), 901-946.
- 68) 斉藤裕司 (1993) : 電気的手法による劣化促進試験法におけるセメント水和物の溶解と変質に及ぼす電位勾配の影響, コンクリート工学論文集, 4(2), 69-78.
- 69) 笹田直 (2008) : 摩耗, 養賢堂, 1-2.
- 70) 佐藤周之・緒方英彦・野中資博・服部九二雄 (2008) : コンクリート水路における骨材露出の評価に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, 30(1), 699-704.
- 71) Shimizu, K. Noguchi, T. Seitoh, H. and Muranaka, E. (1999) : FEM analysis of the dependency on impact angle during erosive wear, *Wear*, **235**, 157-159.
- 72) Sudjono, A.S., 関博 (2002) : セルオートマトン法を用いたポルトランドセメントの複合水和反応モデル, 土木学会論文集 V, 704(V-55), 81-100.
- 73) 杉田英明・永松武教・大和竹史 (1986) : 小水カダムコンクリートの耐摩耗性評価に関する一考察, コンクリート工学年次講演会論文集, 8, 885-888.
- 74) 高野智宏・寺田哲美・山中誠 (2009) : 水中環境下のコンクリートならびにモルタルの耐摩耗性について, コンクリート工学年次論文集, 31(1), 709-714.
- 75) 渡嘉敷勝・長東勇・森充広・石村英明・石神暁郎

- (2003) : コンクリート構造物の劣化度データに対するワイブル分布の適用, 構造物の安全性及び信頼性 JCOSSAR2003 論文集, 5, 947-952.
- 76) 豊福俊英・豊福俊泰 (1999) : 各種コンクリートの衝撃摩耗特性に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, 21(2), 901-906.
- 77) 内田善久・蓮本清二・橋本淳・新村亮 (2004) : コンクリートダム着岩部の経年劣化に関する研究, 第36回ダム技術講演討論会テキスト, 111-120.
- 78) 上野和広・長束勇・石井将幸 (2010) : 開発した水砂噴流摩耗試験機の促進倍率, 農業農村工学会論文集, 266, 41-47.
- 79) Valette, G., Prevost, S. Lucas, L. and Leonard, J. (2006) : SoDA project: A simulation of soil surface degradation by rainfall, *Computers & Graphics*, **30**(4), 494-506.
- 80) Wang, Y.-F. and Yang, Z.-G. (2009) : A coupled finite element and meshfree analysis of erosive wear, *Tribology International*, **42**(2), 373-377.
- 81) Wolfram, S. (1983) : Statistical-mechanics of cellular automata, *Reviews of Modern Physics*, **55**(3), 601-644.
- 82) Wolfram, S. (1986) : Cellular automaton fluids 1. Basic theory, *Journal of Statistical Physics*, **45**(3-4), 471-526.
- 83) 八尋暉夫編 (1996) : 最新ウォータージェット工法, 鹿島出版会, 16.
- 84) 山本武志・広永道彦・吉沢勇二・小松進一 (2002) : 各種試験法によるセメント硬化体の溶脱現象の評価ーその2、固相分析ー, 土木学会年次学術講演会概要集, 57(CS), 509-510.
- 85) 安田和弘・渡邊賢三・大野俊夫・横関康祐 (2001) : 約60年経過したダムコンクリートの溶出挙動評価, 土木学会第56回年次学術講演会, 570-571.
- 86) 横関康祐・渡邊賢三・古澤靖彦・大門正機・大即信明・久田真 (2002) : カルシウムイオンの溶出に伴うコンクリートの変質に関する実態調査と解析的評価, 土木学会論文集, 697(V-54), 51-64.

受理年月日 平成24年12月10日

Studies on Erosion Mechanism and Accelerated Erosion Test of Concrete Irrigation Canal

TOKASHIKI Masaru

Summary

Knowledge of the mechanisms of erosion and a method for testing accelerated erosion of the cementitious materials of a concrete irrigation canal are of major importance for maintaining the performance of a canal over the long term. Most previous studies of erosion of concrete in hydraulic structures have examined the effect of high-velocity water flow or the impact intensity of rocks transported in the water flow on erodibility, whereas the long-term effects of low-velocity water flow and calcium leaching on the erodibility of such structures has rarely been examined. Therefore, field investigations, water jet erosion tests, and cellular automata simulations were performed to investigate these phenomena.

The first objective of this study was to explain the mechanisms of erosion of concrete irrigation canals. The following results were obtained:

- (1) Erosion of a concrete irrigation canal results from the complex degradation of the hardened cement paste (hcp) component of the concrete by both chemical and mechanical processes;
- (2) Calcium hydroxide is leached from the hcp into the water;
- (3) The microstructure of the hcp is thereby coarsened;
- (4) Hcp with coarse microstructure has low strength;
- (5) Collision of flowing water or waterborne sand with the low-strength hcp causes fatigue or abrasive failure, detaching it from the concrete body;
- (6) Detachment of the hcp from the concrete causes detachment of aggregate that is no longer supported by the hcp matrix from the concrete.

These results are based on the following observations.

Field measurements of arithmetic surface roughness of concrete irrigation canals in five districts indicate that erosion progressed as the exposure time of hcp to water increased. Moreover, observations of eroded concrete surfaces show that the surfaces of the aggregate did not erode; rather, the hcp around the aggregate was detached from the concrete body. Furthermore, electron probe microanalysis of specimens of concrete from the canals shows that calcium was leached from the surface hcp to a greater depth than the depth of erosion, indicating that leaching, a chemical process preceded mechanical erosion. Despite the occurrence of calcium leaching, no volume loss was observed from the concrete surfaces in contact with water with zero or very slow velocity, indicating that a volume loss of concrete, defined as erosion, requires not only chemical but also mechanical processes.

Water jet erosion test results of experimentally leached hcp specimens showed that the maximum erosion rate in leached portions of the specimens was 19.4 to 27.6 times that in non-leached portions. This result indicates that the erosion resistance of leached portions is remarkably deteriorated.

Two-dimensional cellular automata simulations were performed to evaluate the contributions of chemical and mechanical processes to the erosion process. The results show that hcp was eroded at nearly the same rate regardless of the diameter or the arrangement of aggregate in the concrete. This finding may indicate that the erosion of hcp is not affected by the presence of aggregate.

The second objective of the study was to establish an accelerated erosion test method for the cementitious materials of concrete irrigation canals. As a result, the following method was proposed:

- (1) The parameters of the accelerated erosion test consisted of nozzle entrance pressure, water jet flow rate, impingement angle of the water jet, distance from nozzle to specimen, nozzle shape, rotation rate of the specimen, water quality, exposure time, and replacement of nozzle;
- (2) The control specimen was a rectangular solid composed of mortar meeting the JIS R 5201 standard with the

dimensions 70 x 70 x 20 mm;

- (3) The 85th to 95th percentile of measured erosion depth was adopted as the index for determining the erosion front depth;
- (4) The ratio of the erosion rate of the cementitious materials to that of the control specimen mortar was adopted as the erodibility index of the materials;
- (5) The reciprocal of the erodibility index was adopted as the erosion resistance index of the cementitious materials;
- (6) The accelerated rate of erosion of a sound specimen from a concrete canal was estimated as the correlation between the water jet erosion test time and the service time of real concrete canals;
- (7) A combined test incorporating both chemical and mechanical processes is required to evaluate the erosion resistance of cementitious materials, because in the real environment such materials are affected by both chemical reactions and mechanical actions.

Keywords : concrete irrigation canal, erosion mechanism, accelerated erosion test, cementitious materials, calcium leaching