

# パッチワーク状の水路の補修が通水性改善に及ぼす効果 についての水理模型実験による評価

中田 達\* 浪平 篤\*\* 樽屋啓之\*\*

\* 水利工学研究領域沿岸域水理ユニット

\*\* 水利工学研究領域水利システムユニット

## 要 旨

水路壁の摩耗や劣化に対して表面被覆工法が局所選択的に実施され、補修区間と未補修区間が間欠的に連なったパッチワーク状に補修された水路を想定し、粗度係数の低下が補修区間の設置パターンに応じて水位の低下やエネルギー損失に与える影響を水理模型実験および不等流解析により明らかにした。水路底や水路幅の凹凸による水路断面の変化をなくした一様な水路であれば、パッチワークのパターンによらず、粗度の切り替わり部でのエネルギーの局所損失は発生せず、通常の不等流解析によって、水面形を精度良く算出できる。補修工事の設計・施工においては、あらかじめ不等流解析を行って、水位低下に必要な補修区間の長さを求め、溢水箇所の下流側から劣化の激しい箇所を優先的に補修していくことで、効果的に溢水を防ぐ対策が可能となることを示した。

キーワード：水理設計，水理機能診断，表面被覆工法，粗度係数，コンクリート水路の摩耗，補修水路

## 1 緒 言

基幹的な農業水利施設は、多くが戦後に集中的に整備されてきたことから、老朽化が急速に進行し、耐用年数を超過した水利施設は年々増加する傾向にある。長期供用下におかれた水路壁面（水理基面）に生じた摩耗やひび割れ等の変状は、構造的な耐久性の低下のみならず、水理機能の一つである通水性の低下を引き起こす。水路の摩耗による水路壁面の凹凸の増加は粗度係数の増加を意味し（中矢ら, 2008），設計流量を流下させた際の水位上昇を招く。その結果、余裕高（フリーボード）の不足に陥り、溢水などの水利用上の被害につながりかねない。

これまでの既存水路の長寿命化を目的とした水路の補修には、コンクリート躯体の耐力の回復や施工後の耐摩耗性等の構造機能に主眼が置かれた補修・補強工法が採用されてきた。そのため、損傷箇所のみに補修・補強対策を講じれば良いと判断され、施工箇所の選定がなされてきた。ひび割れなど局所的に生じた損傷に対しては、最小で補修の対象が水路区間の1スパン（コンクリート水路の継ぎ目からと継ぎ目まで）程度で済むこともある。一方で、摩耗のように同程度の劣化が広範囲にわたる場合には、数十から数百 m にわたって水路壁面の補修が実施される。このようなさまざまな補修区間の長さや間隔で補修が実施された結果、Fig. 1 のように、補修済みの水路壁と未補修の水路壁がパッチワーク状に混ざった水路（以降、パッチ補修水路と呼称する）が出現する。

しかしながら、このような構造機能の回復を目的とした水路の補修が水利用・水理機能に及ぼす影響については、これまで十分に検討されないことが多かった。たとえば、壁面補修の実施現場においては、便宜的に、補修により粗度係数が小さくなることで流速が増大して水位が低下し、従前の流量が流下できるとみなす程度であった。筆者らはこれまで、水路の構造的な変化が水面形に及ぼす影響について、構造機能と水利用・水理機能との相互関係に留意した水利用・水理機能診断手法を提案してきた（中田ら, 2015）。たとえば、水路の沈下に対しては、水路壁の嵩上げ等の補修が溢水の防止にもたらす効果の検証や、樋管分水口や取水ポンプなどの水利施設に及ぼす影響の検証などを、水理縦断図等を利用しつつ検討してきた（中田ら, 2013）。



Fig. 1 局所的な補修により補修/未補修区間が混在した事例  
Case of intermittent repairing mixed repaired / unrepaired sections

パッチ補修水路においても、同様に、水理機能に及ぼす影響を明らかにすることは、溢水などの被害を効果的に防止する上で重要である。藤山ら(2015)は、現地における水路断面形状と粗度係数が不均一に変化したパッチ補修水路において、粗度係数の変化よりも水路の断面形状や勾配の変化の方が水面形に及ぼす影響は大きいと報告している。水路幅の急拡・急縮、水路床の段上がり・段落ちといった水路断面積の変化は局所的なエネルギー損失を発生させるため、粗度係数が小さくなっても想定ほどには流速が増大せず、通水断面積が増大し、水位の上昇につながる事が考えられる。このことから、通水性の低下による溢水等への対策を目的として補修を実施するのであれば、水位を低下させる効果を最大限に発揮するためには、水路断面形状をできる限り変化させない水路壁面の補修が必要となると考えられる。

しかし、このような異なる壁面材料による粗度係数が混在した水路壁面における流れの特性を検討した研究事例は少なく、基礎的な水理現象としても未解明な部分があるのが現状である。このため、水路断面形状を変化させない条件で、パッチワーク状の補修による粗度係数の減少が水位低下に及ぼす効果を評価することが求められる。さらに、パッチ補修水路の水理設計において補修による水位の低下量を予測するための手法として、従来通りの不等流解析による水面形追跡の適用可能性についても確認が必要である。これらを明らかにするためには、水路幅や勾配が一般的な水理模型実験による評価が適している。

そのため、本研究では、水理模型実験により、断面が一般的な水路で水路壁面の粗度だけをパッチワーク状に変化させ、パッチワークのパターンが水面形に与える影響を明らかにすることを目的とした。さらに、実験で得られた水面形に対する従来通りの不等流解析による再現性について検証を行うとともに、解析結果に基づいて、パッチワークのパターンとエネルギー損失の関係について評価した。

## 2 実験および水面形解析の概要

### 2.1 実験条件および実験方法

本実験では、幅 60 cm、壁高 60 cm、延長 40 m の直線水路を用いた。水路床勾配は、1/1000 に設定した。実際の壁面補修が現場打ちコンクリートの幹線用水路を対象とした事例が多いことから、実規模の水路幅を約 3 m 程度と想定すると、これは縮尺比 1/5 の水理模型に相当することとなる。上流端からの供給水量は電子制御によって任意の流量に設定でき、定常状態を形成できる。水路全長にわたって後述の補修/未補修を模擬した水路壁を底部・側部の 3 面に敷き詰めた。実験水路の概要ならびに横断面の構造の概要を Fig. 2 に示す。水路延長のうち、上流部 10 m を整流区間とし、下流部の 30 m を水深計測

区間とした。以下、水路の上流端を  $x=0$  m とし、下流に向かって距離  $x$  を正にとる。また、水路の下流端  $x=40$  m での水路床の高さを基準位置  $z=0$  m とする。

補修/未補修に見立てた水路壁を模擬するために、それぞれの粗度係数に見合った部材を耐水性合板(厚さ 12 mm, 区間長さ 0.5 m に切り揃えた)に貼り付けて水路壁面とした。未補修区間においては、粗度係数の大きくなった水路壁面を想定し、鉱物性粒子を砥粒とした階段等の滑り止めに用いるシール(厚さ 0.8 mm, 重量 800 g/m<sup>2</sup>)を水路壁の 3 面に貼付した。以下、このシールを貼り付けた未補修区間の壁面を構成する合板を「粗面パネル」と呼称する。一方、補修区間においては、合成樹脂素材のパネル(PETG, 厚さ 0.8 mm)を貼り付けて壁面とした。以下、同様に「滑面パネル」と呼称する。ただし、本論文で扱う粗面・滑面の定義は、ニクラーゼの式で表現される粘性底層と相当粗度との大小を比較した従来の水理学的な定義とは関係なく、2 種類の壁面が混在していることを区別するための便宜上の呼称である。

整流区間および  $x=18$  m までの水深計測区間の前駆区

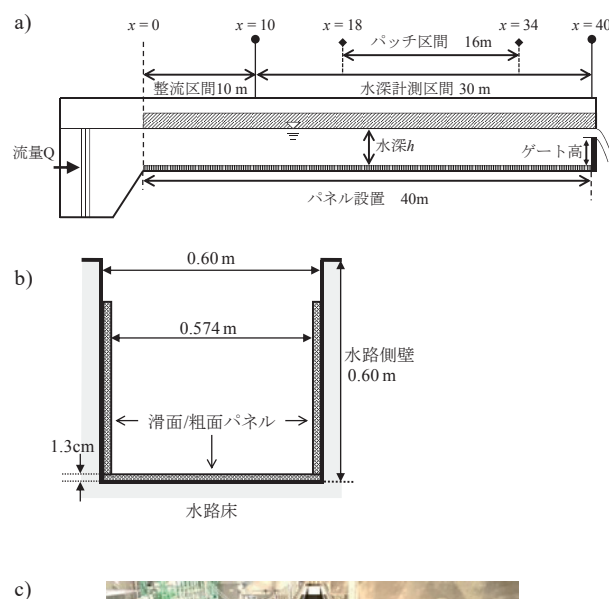


Fig. 2 実験水路の概要

a) 縦断面図 b) 断面図 c) 補修/未補修壁面の設置状況  
Schematic design of experimental channel  
a) Longitudinal view, b) Cross-sectional view,  
c) Setting of rough and smooth wall panels

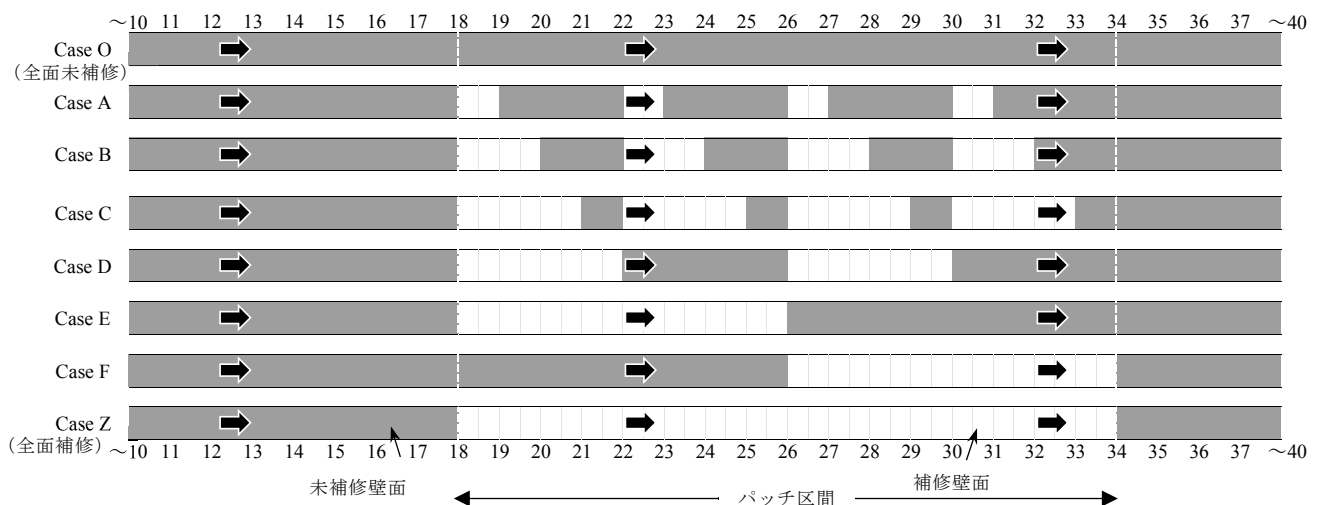
間には粗面パネルを貼付した。 $x=18\sim34$  m の区間において、補修区間および未補修区間の設置パターンを変化させ、水路の縦断方向にパッチワーク状に補修がなされた状態を設定した。以降、この区間をパッチ区間と呼称する。補修区間の長さを変え、実験で対象とした補修パターンを **Fig. 3** のように設定した。未補修区間と補修区間の水路幅は、パネル設置後にレーザー距離計による手計測を行い、どちらも一定の水路幅 ( $B=0.574\pm0.001$  m) であることを確認し、水路幅一定の一樣断面水路として扱った。

Case O は補修がなされる以前の長期供用下におかれた水路に相当し、Case Z はパッチ区間をすべて改修した場合に相当する。Case A～Case F は、パッチ区間の中で選択的な補修がなされた場合を想定し、補修区間の長さをそれぞれ変えている。Case A, Case B, Case C は、どれも補修/未補修の切り替えの周期 4 m を 4 回繰り返すパターンであるが、補修区間の長さがそれぞれ 1m, 2m, 3m とパッチ区間の補修比率が順に 25%, 50%, 75% と異なる実験ケースである。Case B, Case D, Case E, Case F は、補修比率が 50% と同じながら一回の補修区間の長さが 2 m～8 m と異なる実験ケースである。Case B の補修区間長さ 2 m は実際に供用される水路に換算すると 5 倍の 10 m となり、実規模水路におけるコンクリート打設の単位である 1 スパン区間程度の長さに相当する。Case A や Case C は、補修区間あるいは未補修区間が 1 スパンに満たない長さで単独で存在しているが、一方の区間が占有的なケースとして扱った。Case E と Case F は、堰上げ背水区間における補修部分の水深の違いが水位低下効果に及ぼす影響を比較するために設定した。実際の補修水路の施工現場では、将来的な構造面での劣化を予測して予防保全的に補修対策が適用される場合も多く、同等の劣化状態の壁面を広範囲にわたって施工する場合も多い。それらのいくつかのバリエーションとして、補修区間の長さを変えた Case D, Case E, Case F を採用した。

本実験で用いた可変勾配水路は、全区間が 5 点の油圧ジャッキによって平均勾配が 1/1000 に調整されているものの、ジャッキ間の施工誤差があり、局所的には一様であるとは言えず、パネル設置後も地点によっては設計標高と最大 2～3 mm 程度の誤差があった。このため、実験ケースごとに、止水させた状態で静水時の水深を測定し、水路床標高を算出した。水面形の解析にはこの水路床標高の実測値を用いた。

流量は、 $0.1\text{ m}^3/\text{s}$  と  $0.05\text{ m}^3/\text{s}$  の 2 パターンとした。流量  $0.1\text{ m}^3/\text{s}$  は、建設当初の水利設計において等流水深を採用するような前後に構造物のない水路区間における設計流量に相当すると想定した。Case O における流量  $0.1\text{ m}^3/\text{s}$  のときの流況が等流に近くなるように、水路の下流端に設置された歯型堰の高さを調整した。その際には、まず不等流状態の水面形の測定から粗面パネルの粗度係数を推定し、下流端付近において、その粗度係数における等流水深に近づくように堰高さを調整した。その他の実験ケースでも堰の高さを固定した。これにより、Case O における等流水深に近い水面形を他の補修パターンの水面形との比較基準とし、長期供用によって水路壁面が摩耗した状態から壁面補修がなされた際の水面形の変化を比較した。流量  $0.05\text{ m}^3/\text{s}$  は堰上げ背水などの不等流の水面形となった場合を想定し、最大量を必要としない灌漑時期における流況や、チェックゲートや分排水工などの水位調整施設の影響を受けている状態を想定した実験ケースである。以上により、1 つの補修パターンにつき流量 2 種類の計 16 の流れの条件で実験を行った。流量ごとに、各実験ケースにおける  $x=34\sim40$  m の下流端の未補修区間の水面形は共通しており、パッチ区間 ( $x=18\sim34$  m) において、各実験ケース間の水位の変化を比較することができる。

水深の測定は、水深計測区間 ( $x=10\sim40$  m) を 0.5 m 間隔で、サーボ式水位計 (ケネック社, NST-30) を用いて計測した。1 点につき 10Hz で 20 秒間計測し、その平



**Fig. 3** 未補修区間と補修区間の設置パターン  
Setting pattern of non-repaired and repaired section.  
Gray and white section represent non-repaired and repaired section respectively.

均値を用いた。

## 2.2 不等流解析による粗度係数の同定

一様水路での定常状態での水面形は式-1で表現できる。

$$\frac{dh}{dx} = \frac{I_b - n^2 / R^{4/3} (Q / Bh)^2}{1 - Q^2 / (gB^2 h^3)} \quad (1)$$

$$R = \frac{Bh}{B + 2h} \quad (2)$$

ここで、 $h$  は水深、 $x$  は流下方向への距離、 $n$  はマンニングの粗度係数、 $I_b$  は水路床勾配、 $Q$  は流量、 $B$  は水路幅、 $R$  は径深、 $g$  は重力加速度である。水路床勾配  $I_b$  は各実験ケースの実測値を用いた。水路は広幅ではないため、径深の算出には式-2を用いた。式-1における水面形の算出では、本実験は常流を対象としているので、下流端 ( $x=40$  m) に実験値の水深を与え、式-1を  $\Delta x = 0.05$  m として Runge-Kutta 法を用いて上流端まで解き、水面形を求めた。

Case O および Case Z は縦断方向に一様な区間が長いいため、それぞれ未補修区間および補修区間のマンニングの粗度係数を同定することができる。未補修区間（粗面パネル）の粗度係数を  $n_r$ 、補修区間（滑面パネル）の粗度係数を  $n_s$  とする。 $n_r$  と  $n_s$  をそれぞれ 0.0001 刻みに変化させて総当たりの計算を行い、水深計測区間における実測値と計算値との平均二乗誤差 MSE が最小となるような粗度係数  $n_r$  と  $n_s$  を求めた。

未補修区間の粗度係数  $n_r$  は 0.0113、補修区間の粗度係数  $n_s$  は 0.0095 であった。このときの Case O および Case Z における  $x=18 \sim 34$  m の実測値と計算値との平均相対誤差（計算値を基準）は、流量 0.1 m<sup>3</sup>/s のときそれぞれ 0.21 %、0.23 %、流量 0.05 m<sup>3</sup>/s のときは、ともに 0.25 % であった。 $n_r$  と  $n_s$  をフルード相似則にて実際に供用される水路の粗度係数に換算すると、縮尺比が 1/5 の場合、 $n_r$  は 0.0148、 $n_s$  は 0.0124 に相当する。長期供用後であっても未補修のまま存置されるコンクリート水路の壁面の

値、および補修済みの滑らかな壁面の値として、おおむね現実的であると言える。

Case O および Case Z から同定された  $n_r$  と  $n_s$  を用いて、Case A から Case F までの水面形解析を行った。実用面での水理解析においては、流下に従って壁面材料が変化する際には、それぞれのマンニングの粗度係数  $n_r$  と  $n_s$  を与える場合が一般的である。下流端水深は Case O における水深と一致させた。本研究では、一様断面水路を対象としており、流水断面が変化する際に生じる局所損失は考慮せずとも良い。式-1 による計算水位と実測水位とを比較し、従来通り摩擦損失のみで実測値を追従可能か検討した。

## 3 実験結果および流況・水面形の状況

### 3.1 長距離区間にわたる補修による水位低下への効果

全面が補修前の劣化した水路を想定した Case O と、パッチ区間 ( $x=18 \sim 34$  m) がすべて補修された Case Z における縦断水面形を Fig. 4 に示す。Fig. 4-a) は流量 0.1 m<sup>3</sup>/s、Fig. 4-b) は流量 0.05 m<sup>3</sup>/s における実験結果である。各図中には、 $n_r$  と  $n_s$  の等流水深をそれぞれ破線で示した。また、それぞれの水面形の不等流解析の結果を実線で示した。

流量 0.1 m<sup>3</sup>/s のケースでは、Case O、Case Z の水面形は、下流の未補修区間 ( $x=36 \sim 40$  m) においてわずかながら低下背水 (M2) 曲線となっている。 $n_r$  の等流水深 ( $h_{or} = 0.243$  m) に対し、下流端  $x=40$  m の水深は、 $h_d = 0.239$  m であった。それより上流では、Case O の水面形は上流部まで  $n_r$  の等流水深に漸近していくのに対し、Case Z の水面形は、 $x=18 \sim 34$  m の 16m にわたる補修区間において堰上げ背水 (M1) 曲線となり、 $x=18$  m よりも上流部では、再び低下背水 (M2) 曲線となっている。なお、パッチワーク状に補修した実験ケースも含め、すべてのケースで、流れのフルード数は  $Fr = 0.4$  前後であった。

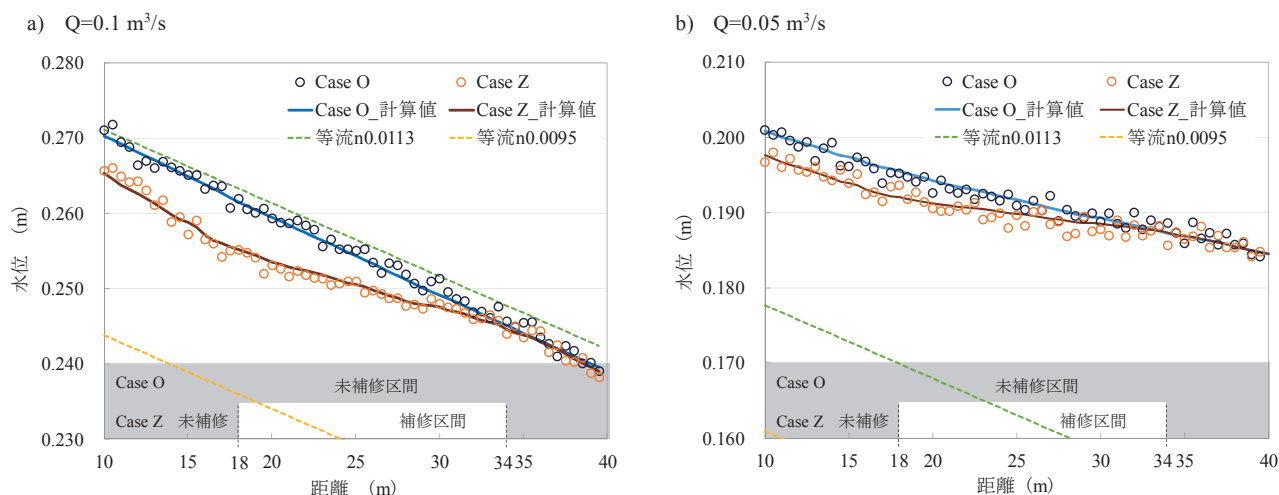
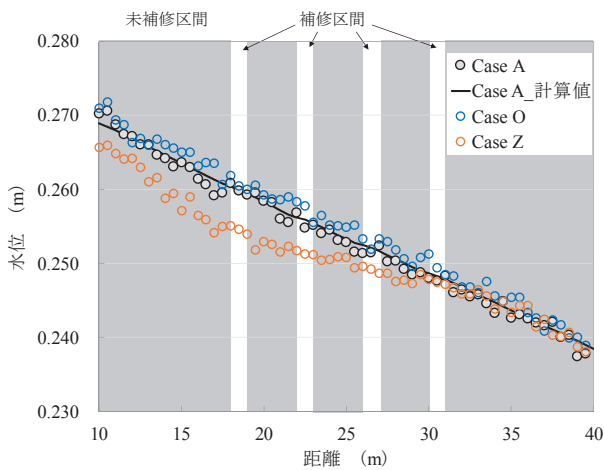
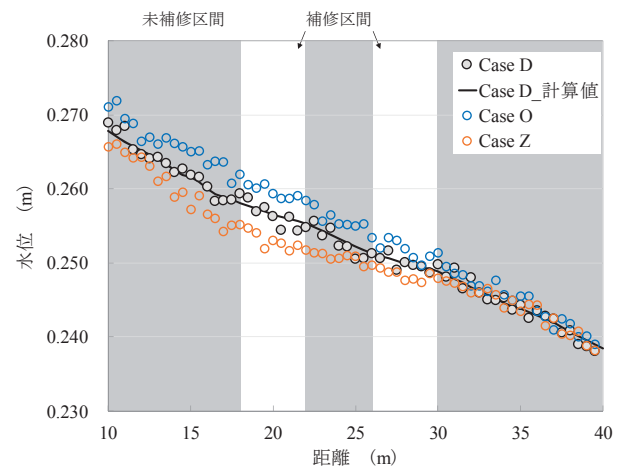
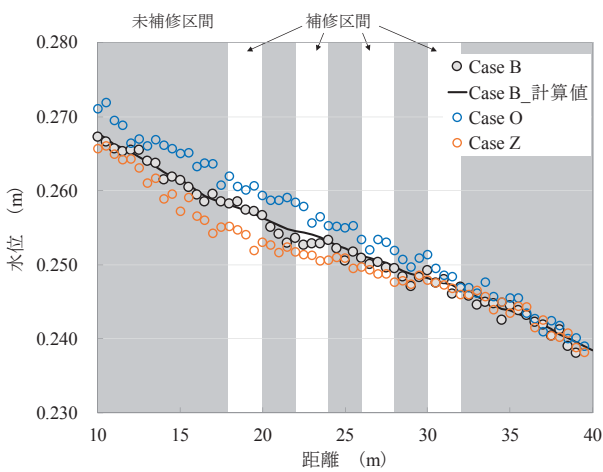
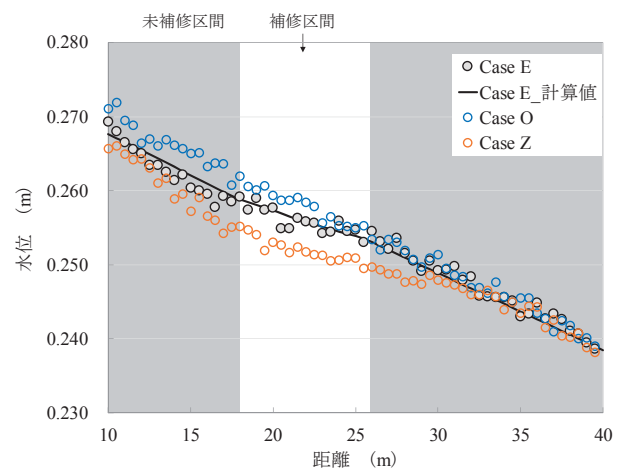
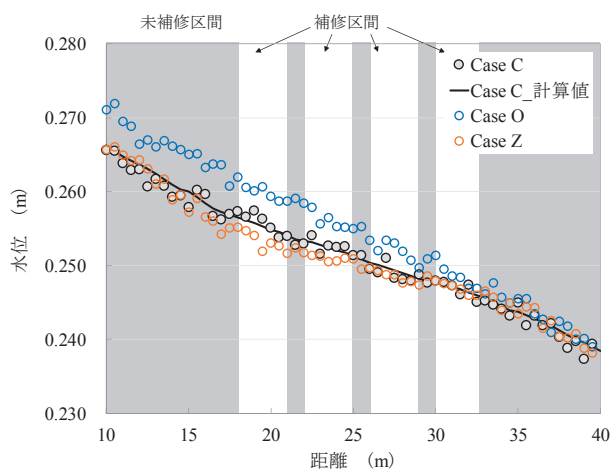
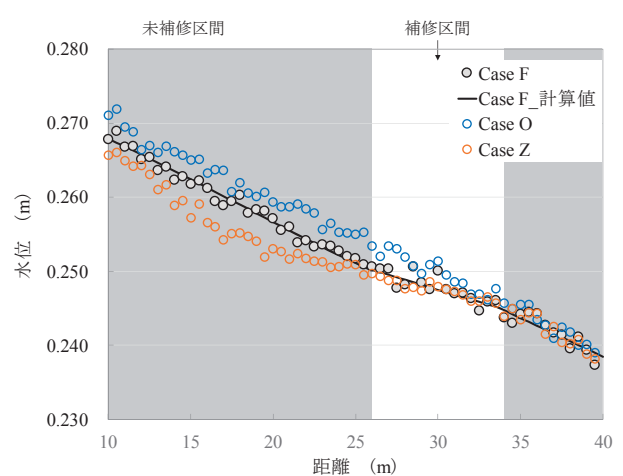


Fig. 4 長距離区間にわたって補修した場合の水面計の比較  
Comparison of water level profiles when repairing over long distance section  
a)  $Q=0.1$  m<sup>3</sup>/s, b)  $Q=0.05$  m<sup>3</sup>/s



**a) Case A** 補修 1m, 未補修 3m, 4 回繰り返す**d) Case D** 補修 4m, 未補修 4m, 2 回繰り返す**b) Case B** 補修 2m, 未補修 2m, 4 回繰り返す**e) Case E** 補修 8m, 上流部で補修**c) Case C** 補修 3m, 未補修 1m, 4 回繰り返す**f) Case F** 補修 8m, 下流部で補修**Fig. 5** 補修/未補修区間がパッチワーク状に切り替わるような流況下での水面形  
Water surface profiles in the patchwork-like repairing

流量  $0.05 \text{ m}^3/\text{s}$  のケースでは、未補修区間の等流水深は  $h_{or} = 0.148 \text{ m}$  であるのに対し、下流端の堰上げのため、水深は上流部から下流部にかけておよそ  $0.172 \sim 0.184 \text{ m}$ 、フルード数は  $Fr = 0.40 \sim 0.35$  となり、全区間で堰上げ背水 (M1) 曲線であった。

Case O に対する Case Z の水深は、補修区間の上流端である  $x = 18 \text{ m}$  付近において最も低下した。その低下量は、流量  $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$  では、Case O の  $x = 18 \text{ m}$  の実測水深の 4% 程度に相当する。補修による水位の低下の効果を判断するためには、余裕高の設計基準が一つの判断基準になり得る。余裕高の設計では、水深の 10% に速度水頭や波浪高さを加えて安全性を考慮した上で算出する。Case Z のような長距離区間にわたる補修であれば、粗度係数の回復が水面の低下を促し、通水性の回復につながる事がわかる。しかし、 $x = 18 \text{ m}$  よりも上流側が長距離にわたって補修区間であるとして不等流解析を行うと、Case Z の水面形が  $n_s$  の等流水深に漸近するまでには、流量  $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$  ではおよそ  $175 \text{ m}$  を必要とした。実規模に換算すると  $900 \text{ m}$  に及ぶことから、補修区間が相当の長距離に及ばない限り、補修区間の粗度係数で算定される等流水深までは低下しないことがわかる。流量  $0.05 \text{ m}^3/\text{s}$  のように下流側が堰上げられている状況下や、実験対象とした  $1/1000$  よりも緩勾配な水路ではその傾向はさらに顕著となる。通水性の回復を目的に水路の補修を実施する場合には、安易に補修前後の粗度係数に対応する等流水深を比較して水位の低下を評価するのではなく、不等流解析による水面形の追跡をもとに水位低下の効果を評価する必要があることが明らかである。

また、補修区間の上流側が未補修のまま存置されている場合は、補修区間の水面形は再び未補修区間の水面形に漸近していく。Case Z において、 $x = 0 \text{ m}$  よりも上流側を含めて不等流解析を行うと、 $x = 18 \text{ m}$  の地点で最大だった水位差が再び近づくには、流量  $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$  ではおよそ  $150 \text{ m}$  を必要とした。実規模に換算すると  $750 \text{ m}$  にもおよび、補修区間上流側において補修区間のおよそ十倍の距離に渡って水位低下の影響を受けることがわかった。すなわち、このような水位低下の影響を受ける区間内に樋管分水口や取水ポンプ等が存在する場合には、水位変化に応じて取水量等が変化することが考えられる。そのため、補修後の水利用に支障を及ぼさないような配慮についても、不等流解析による影響区間の算定が求められる。

### 3.2 パッチ補修水路の水面形比較

Fig. 5-a)~f) に、流量  $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$  の各補修パターンにおける縦断水面形を示した。また、前章で得られた  $n_s$  および  $n_r$  を用いて、Case A~Case F における補修パターンについて、それぞれの水面形を不等流解析により算出した。図中の実線で、それぞれの水面形の不等流解析の結果を

示した。それぞれの図中には、比較のため、Case O と Case Z の水面形も同時にプロットした。図中の背景のグレー部分は未補修区間、白抜き部分が補修区間を表している。また、Table 1 に、各実験ケース Case  $k$  ( $k = O, Z, A, B, \dots, F$ ) における 1 回あたりの補修/未補修区間長さ (それぞれ  $L_s, L_r$ )、補修/未補修の繰り返し回数、パッチ区間  $x = 18 \sim 34 \text{ m}$  の補修率 (のべ補修区間長さ/パッチ区間長さ) を示した。

Case A~Case F の水面形の実測値は、いずれも Case O と Case Z との間に存在しており、補修区間がパッチワーク状に切り替わっても、Case Z には及ばないながら、水位低下の効果が生じたことを意味している。実測値と不等流解析による計算値とを比較すると、実測値と計算値とはおおむね一致することがわかる。不等流解析の結果では、流量  $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$  のケースのように等流水深に近い水深の場合、補修区間では堰上げ背水 (M1) 曲線、未補修区間では低下背水 (M2) 曲線と、頻繁に水面形が切り替わる。補修/未補修区間の切り替わり回数が異なっても、パッチ区間における Case A から Case F の各実験ケースの相対誤差は、 $0.26 \sim 0.37\%$  の範囲にあり、同程度であった。また、Case O, Case Z と明確な差がなかった (Table 1)。流量  $0.05 \text{ m}^3/\text{s}$  においても同様であった。すなわち、補修/未補修区間の設置パターンの違いによらず、不等流解析の結果は実測値を精度良く再現可能であると言える。

Case A, Case B, Case C は、パッチ区間の補修比率が異なる実験ケースであり、補修比率と水位低下効果の関係を比較検討できる。補修区間長さが  $1 \text{ m}$  と短い Case A や、逆に、未補修区間長さが最も短い Case C では、粗度係数が変化した影響が水面勾配として明確になる前に再び粗度係数が戻ってしまうため、実測値における補修区間と未補修区間の水面勾配の差異は不明瞭であった。し

**Table 1** 各実験ケースにおけるパッチワーク補修の概要、不等流解析との相対誤差およびエネルギー損失の比較  
Comparison of patchwork repair specifications, relative error of water depth and energy loss in each experiment case

	補修 区間長さ $L_s$ (m)	未補修 区間長さ $L_r$ (m)	繰返し 回数	補修率 (%)	水深の平均 相対誤差 ( $x = 18 \sim 34 \text{ m}$ ) (%)	$\frac{\Delta E_O - \Delta E_k}{\Delta E_O - \Delta E_Z}$ (%)
$Q = 0.1 \text{ m}^3/\text{s}$						
Case O	0	16	0	0	0.21	0
Case A	1	3	4	25	0.26	26.0
Case B	2	2	4	50	0.37	48.8
Case C	3	1	4	75	0.26	73.6
Case D	4	4	2	50	0.37	48.4
Case E	8	8	1	50	0.31	58.2
Case F	8	8	1	50	0.27	52.5
Case Z	16	0	1	100	0.23	100
$Q = 0.05 \text{ m}^3/\text{s}$						
Case O	0	16	0	0	0.25	0
Case A	1	3	4	25	0.28	25.1
Case B	2	2	4	50	0.27	50.2
Case C	3	1	4	75	0.25	75.3
Case D	4	4	2	50	0.27	51.2
Case E	8	8	1	50	0.23	51.6
Case F	8	8	1	50	0.27	48.2
Case Z	16	0	1	100	0.25	100

かし、それでも Case O と Case Z の間に水面形が現れていることから、補修/未補修区間の切り替わりが短距離でも、それに応じた水位低下の効果は現れることを示している。補修による水深の低下（平均流速の増加）は、水面形として明確に現れなくとも、摩擦抵抗は粗度係数の低下により減少していることが確認できた。一方で、補修区間が 2 m 間隔以上の Case B, D, E, F においては、実測値の補修区間の水面勾配は未補修区間の水面勾配と比べて明らかに緩勾配であり、補修区間における水位の低下が確認された。すなわち、Fig. 1 のように壁面補修を単発的に 1 スパンのみで施工したとしても、粗度係数の変化に応じて Case B のように水位低下の効果は現れることが確認できた。

各実験ケースにおける補修/未補修区間の水面勾配の流況現象について、特にパネル切り替わり部における流況を詳細に観察した。パネル切り替わり部において水面の変動が生じることも予想されたが、実際には、補修/未補修区間の区間長さの違いや切り替わり回数の違いによらず、明瞭な水深の変動や波立ち、交叉波などの現象は見られなかった（Fig. 6）。よって、補修/未補修区間のパネルの厚さを揃えた通水断面が様な水路であれば、全区間におけるエネルギー損失は、摩擦損失のみと想定でき、局所損失を考慮する必要はないと考えられる。

以上のことから、補修/未補修区間のパッチワークのパターンによらず、摩擦損失のみを考慮した不等流解析によって、水面形の再現が可能と言える。

### 3.3 パッチ区間の摩擦損失

解析による水面形が実測値を精度良く再現可能なことから、各ケースの計算値をもとに、パッチ区間の摩擦損失を検討した。壁面補修の長さや切り替わり回数が、パッチ区間の上下流間の全水頭差に及ぼす影響を比較検討した。

各実験ケース Case  $k$  ( $k = O, Z, A, B, \dots, F$ ) における、パッチ区間上流端  $x = 18$  m と下流端  $x = 34$  m 間の全水頭差  $\Delta E_k$  を不等流解析による計算値を用いて算出した。未補修水路（Case O）のエネルギー損失  $\Delta E_O$  と補修水路（Case Z）のエネルギー損失  $\Delta E_Z$  との差を基準として、パッチワーク状の補修によって生じるエネルギー損失の低減

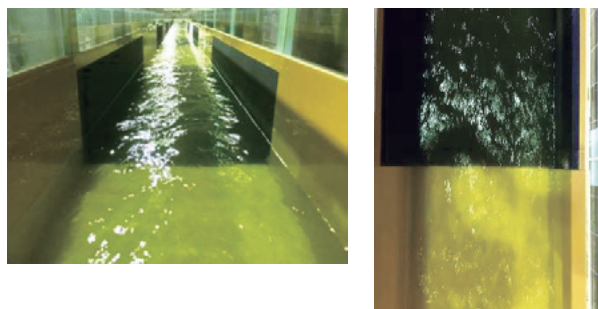


Fig. 6 補修/未補修区間の切り替わり部における流況  
Flow regime in the boundary of the repaired/non-repaired section

の効果を式-3 で評価した。

$$\frac{\Delta E_O - \Delta E_k}{\Delta E_O - \Delta E_Z} \quad (3)$$

Table 1 に示した式-3 の値は、パッチ区間 ( $x = 18 \sim 34$  m) の補修率とほぼ一致していた。このことから、検討対象区間のうちの補修区間の総延長を決めることで、水位の低下量を見積もることが可能となることがわかる。

また、不等流解析による水面形追跡の結果と同様に、補修/未補修区間のパッチワークのパターンによらず、補修区間長さのみで水位低下効果が決まることがわかった。Case B, Case D, Case E, Case F は、未補修が 50% と同じながら一回の補修区間の長さが異なる実験ケースである。これらのケース間においては、式-3 の値に明確な差は現れなかった。すなわち、個々の補修区間の長さが異なっているとしても、検討対象区間のうちの補修区間の総延長が同じであれば、水位の低下量も変わらないこととなる。流量  $0.05 \text{ m}^3/\text{s}$  における Case E と Case F との比較においては、堰上げによる水深の違いが補修区間上流側の水位低下効果に影響を及ぼすか否かを確認したが、両者に明確な差は生じなかった。溢水などに対して水深の低下を目的に水路壁面の補修を行う際には、溢水箇所の下流側にかけて補修していく必要があるが、その補修箇所は必ずしも連続的でなくともよいことが示唆された。

以上のことから、補修工事の計画の際には、水位の低下に必要な補修区間の総延長を求め、劣化の激しい箇所から優先的に補修していくことで、効果的に水位の低下を見込むことができると考えられる。

## 4 結 言

本研究では、水路壁面の補修を実施する際の、水面形の解析による水利用・水理機能診断の必要性を述べてきた。溢水等の通水性の低下への対策として、水位を低下させる効果を最大限に発揮するためには、水路断面形状をできる限り変化させない水路壁面の補修が必要となることから、一様断面水路を対象とした数理模型実験を実施した。長期供用後であっても未補修のまま存置されるコンクリート水路の壁面と補修済みの滑らかな壁面がパッチワーク状に混在して補修された水路を想定し、粗度係数の減少が水位低下に及ぼす効果を評価し、以下の結果を得た。

水路断面形状が同様であれば、補修/未補修区間の切り替わり部分において、明瞭な波や渦の発生は生じず、エネルギーの局所損失は生じなかった。そのため、通常的不等流解析によって水面形を算出でき、その結果は、補修/未補修区間の区間長さや切り替わり回数の違いによらず、実測値の水面形を精度良く再現できた。補修による水位低下の効果は、補修/未補修区間の区間長さや切り替わり回数の違いによらず、補修区間の総延長に応じて

現れる。すなわち、補修箇所は必ずしも連続的である必要はなく、劣化の激しい箇所から優先的に補修していくことで効果的に水位低下の効果を見込めることがわかった。補修の位置や範囲を種々に変えた不等流解析の結果は、水理縦断面図等に明示して、水利用性能・水理性能についての定量的な比較検討(中田ら, 2015)に活用できるため、総合的な「健全度」の評価につなげていくことが望まれる。

ただし、これらの結果は水路断面形状が一樣な、最も理想的な条件下での水位低下効果の検証であり、現地における補修工事の設計・施工に際しては、現地特有の不均一性に対する課題や留意点が挙げられる。

補修工法によって水路断面が減少する場合、粗度係数の回復による水位低下の効果と断面変化によるエネルギーの局所損失の影響の大小については不明確である。壁面補修を1スパンのみに施工した際に、粗度係数が小さくなったとしても、エネルギーの局所損失が発生し、通水性能が確保できない場合もありうる。あるいは、その際の1回あたりのエネルギー損失は流れの全水頭に対してわずかであったとしても、頻回に断面変化が生じると、その積算は大きく影響を及ぼす可能性がある。同様の懸念は、パイプラインの目地補修に用いられる止水バンドにも指摘されており、エネルギー損失の評価が進められている(松田ら, 2016)。今後、パッチワーク状の補修工事により通水断面が頻繁に変化した際のエネルギー損失の評価については、系統的な水理実験等によって明らかにしていく必要がある。

現地における補修工事の設計においては、不等流解析に必要とする補修前後の水路壁面の粗度係数をそれぞれ得る必要がある。そのためには、壁面の凹凸の直接計測から粗度係数を推定する手法(中矢ら, 2008; 太田垣ら, 2012)や、現地踏査による粗度係数の同定手法(藤山ら, 2017)などが利用できる。現地水路では、本実験とは異なり、大小様々な粗度係数の水路壁面が出現することが予想される。水路壁面の劣化原因について摩耗を促進させる要因等を特定し、適切な補修対策を実施する必要がある。

溢水に至る通水性の低下事例として、水路壁面への藻類の繁茂による通水阻害があげられる。藻類の壁面への付着による通水阻害は、構造的には問題となりにくいものの、施設管理者や耕作者にとって切実な課題である。藻類による粗度係数の増加と水路断面の減少の両面の影響とともに、劣化した水路壁面には藻類が付着しやすくなるなどの、複合的な要因が考えられる。藻類の生育環境や灌漑期間中の生育量の季節変化などにも留意しつつ、適切な水利用が確保できるような施工範囲を選定する必要がある。

また、水路壁面の補修による水位低下の影響は、補修区間の上流側の相当の長距離区間に波及する。樋管分水口や取水ポンプの付近においては、適正な水位の確保が

施設の水利利用・水理機能の発揮の条件である。そのため、補修工事を計画する際には、前期事業計画時の水利施設周辺の水位・エネルギーとの整合性に留意しつつ、水利利用に支障のない水位が確保できているか留意が必要である。構造機能と水利利用・水理機能との相互関係に留意し、有効かつ合理的な補修区間・工法の選定をすることが望ましい。

## 引用文献

- 藤山 宗, 樽屋啓之, 中田 達, 嶺田拓也, 伊藤祐二, 靱井和朗(2015):パッチ状の水路補修が開水路の通水性に関する水理機能に及ぼす影響評価, 農業農村工学会論文集, 297, II\_35-II\_41
- 藤山 宗, 伊藤夕樹, 長野浩一, 樽屋啓之, 中田 達, 伊藤祐二, 靱井和朗(2017):評価板を用いたコンクリート開水路の粗度係数の推定, 農業農村工学会論文集, 85(2), II\_97-II\_102
- 松田亮二, 田中良和, 浪平 篤, 中田 達, 樽屋啓之, 猪迫耕二(2016):止水バンド施工による損失水頭の評価方法について, H28年度応用水理研究部会講演会要旨集, 45-49
- 中田 達, 藤山 宗, 樽屋啓之, 田中良和(2013):非灌漑期におけるコンクリート水路の水理機能診断について, 水土の知, 81(1), 27-30
- 中田 達, 藤山 宗, 樽屋啓之, 中 達雄(2015):ネットワーク構成要素に着目した水路の水利利用・水理機能診断プロセス, 水土の知, 83(10), 39-42
- 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, 23-28
- 太田垣晃一郎, 長谷川雄基, 鈴木哲也, 松本伸介, 佐藤周之(2012):三次元画像解析によるコンクリート水路表面粗度の測定手法に関する研究, 農業農村工学会論文集, 280, 7-13

---

原稿受理 平成29年11月7日



## Investigation by Hydraulic Model Experiment on Recovery of Flow transmissibility in Partial Repaired Patchwork-like Channel

NAKADA Toru\*, NAMIHIRA Atsushi\*\*, TARUYA Hiroyuki\*\*

\*Coastal Hydraulics Engineering Unit, Division of Hydraulic Engineering

\*\*Irrigation and Drainage systems Unit, Division of Hydraulic Engineering

### Abstract

Hydraulic model experiments and non-uniform flow analysis were conducted to clarify the influence of the decrease of roughness coefficient on the water surface profiles and energy loss according to the installation pattern of the repair section, assuming the intermittent repaired channel. Regardless of the length of repaired sections nor frequency of switching repaired / non-repaired sections, local loss of energy did not occur in the boundary of the both sections, and it was found that the water surface profiles can be calculated accurately by conventional non-uniform flow analysis. To avoid flooding, it is necessary to determine the total repair length required for water surface recovery by conducting a hydraulic analysis beforehand. In designing and constructing a repaired channel, it is effective to repair preferentially the part with severe deterioration from the downstream side of the overflow point.

**Key words:** *Hydraulic design, Roughness coefficient, Wear of concrete wall, Repaired channel*