

粗粒化した河床への置き土が表層礫の移動と流路変動に及ぼす影響

株式会社ウエスコ 非会員○遠藤 稜
 鳥取大学学術研究院 正会員 和田孝志
 鳥取大学学術研究院 正会員 三輪 浩

1. まえがき ダム下流域の河川では土砂供給の停止によって河床低下や河床砂礫の粗粒化，流路の固定化が進行する例がみられる．これらは種々の河川機能の低下の要因となるため，その対応が求められている．これらに対して，礫層に砂が含まれると礫は砂が含まれないときよりも移動し易くなる¹⁾特性を利用して，粗粒化した河床に直接砂を敷設する『覆砂』によって表層礫の移動を促進させる方法が検討されている^{2),3)}．一方，掘削土砂に含まれる粗礫をダム堆砂等の砂と混合し，置き土として侵食・流下させることで粗礫の移動を促進させる基礎的な検討も行われている⁴⁾．本研究では，礫層への砂供給の効果と置き土による砂礫供給の効率性に着目し，粗粒化した礫河床（低水路と高水敷で構成）を対象として，高水敷に設置した置き土の侵食・流送が礫の移動と低水路の変動に及ぼす効果を水路実験によって検討している．

2. 実験方法 実験は，長さ7.67 m，幅0.3 m，深さ0.3 mの循環式可変勾配水路を用いて行った．実験に使用した砂礫は，**図-1**に示すような平均粒径 $d_g=7.1$ mmの礫，平均粒径 $d_s=1.4$ mmの砂Aおよびこの礫と $d_s=0.56$ mmの砂Bを4：1の割合で混合した混合砂礫である．水路には長さ4.5 m，幅0.3 m，深さ0.046 mの移動床部を設置し，その上・下流側に上記の礫をニスで貼り付けた長さ1.8 m，幅0.5 mの固定床部を設置した．移動床部は低水路と高水敷からなり，水路右岸側に底面幅0.1 m，深さ0.02 m，法面勾配1：1の直線低水路を形成した．

図-2は移動床部の砂礫構成である．Type Aは礫のみの河床，Type Bは上述の混合砂礫の表層を粗粒化させた河床である．なお，置き土は砂Aを用いて高水敷に設置することとし，**図-3**に示すように長さ1.35 m，幅0.18 m，高さ0.14 mの置き土を移動床部上流端から下流側0.45～1.8 mの位置に敷設した．実験は，水路勾配を1/100に設定，移動床部に砂礫を充填して低水路を形成し，実験条件に応じて置き土を設置した．

なお，置き土敷設前後の河床面はレーザー変位計を用いて平面的に測定した．金網で移動床部を覆い，所定の流量を確認した後，金網を引き上げて実験を開始した．実験中は移動床部から流出した砂礫を約1～3分間捕捉するとともに，超音波変位計で水面を縦断方向に測定し，停水後に再度河床面を測定した．この手順を各Caseで6～7回繰り返した．また，混合砂礫の実験（Case BU2）では各通水終了後に移動床 $x/L=0.5$ および0.8の位置（ L は置き土上流端($x=0$)から移動床部下流端までの長さ， x は下流側への距離）で高水敷と低水路の河床砂礫を深さ方向に最大粒径（礫の平均粒径）程度の厚さで3

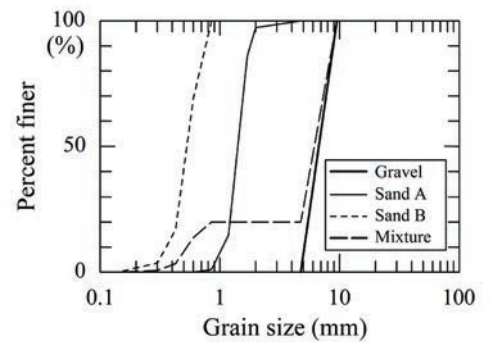


図-1 使用砂礫の粒度分布

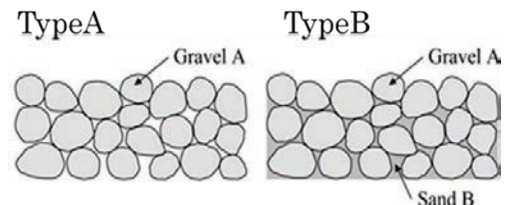


図-2 移動床部の初期砂礫構成（側面）

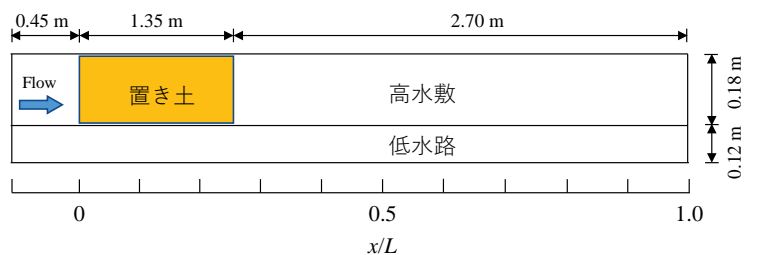


図-3 置き土の配置と諸元（移動床部，平面）

表-1 実験条件

Case	河床構成 Type	置き土	Q (m^3s^{-1})	h_m (m)	τ_{*g}
AN	A	なし	0.018	0.090	0.053
AU	A	あり	0.018	0.089	0.041
BU1	B	あり	0.018	0.090	0.050
BU2	B	あり	0.018	0.087	0.046

キーワード 置き土，砂礫移動，流路変動

連絡先 〒680-8552 鳥取市湖山町南4丁目101 鳥取大学工学部社会システム土木系学科 水工学研究室 TEL0857-31-5284

層分（第1層（表層）～第3層）採取した。実験条件を表-1に示す。表中、 Q は流量、 h_m は移動床部の平均水深（平均水位と平均河床位の差）、 τ_{*g} は礫に関する無次元掃流力である。

3. 実験結果と考察 図-4はCase AN, AU, BU1およびBU2の礫流出量と、Case AU, BU1およびBU2の砂A（置き土）の流出量、さらにCase BU1およびBU2の砂B（混合砂礫の砂成分）の流出量の時間変化を示している。同図より、Case AUはANに比べて礫の流出量が増加していることがわかる。両者の相違は置き土の有無であり、礫の流出に対して置き土が効果を発揮したことを示している。また、同図より、河床に混合砂礫を用いたCase BU1やBU2は一樣礫を用いたCase AUに比べて礫の流出量が大幅に増加していることが分かる。両者の相違は混合砂礫河床に含まれる砂Bの存在であることから、混合砂礫河床において一樣礫河床よりも礫の流出量が増加したのは、置き土による礫の移動に伴って下層の砂Bが露出することで、その砂が周辺の礫の移動を促進させたためであると考えられる。

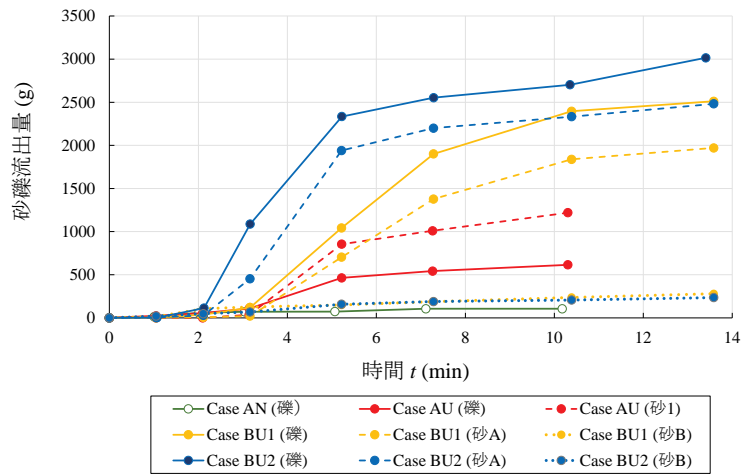


図-4 砂礫流出量の時間変化布

図-5はCase AN, AU, BU1およびBU2の移動床部（置き土設置位置上流端から移動床下流端まで）を縦断平均した河床横断形状の時間変化（通水前（ $t=0$ min）、通水途中（ $t=5$ min）、停水後（ $t=10$ min または $t=13$ min））を示したものである。なお、河床高は通水前の平均河床位からの変動量を礫粒径で基準化した $\Delta z/d_g$ で示している。同図(a)より、礫のみで河床を形成したCase ANでは通水によって低水路の肩部で河床低下、低水路で河床上昇が認められる。しかし、これは通水開始時および停水時の網の上げ下げの影響が現れたものであり、実験の観察では礫の移動はほとんど認められなかった。つぎに、同図(b)より、礫のみの河床に置き土を行ったCase AUでは置き土の効果により高水敷で礫粒径の1.5倍程度の河床低下が見られるとともに、低水路の右岸側（ $y/B=0.8\sim 1.0$ ）には河床上昇が確認でき、置き土の効果によってこのケースの河床変動は置き土のないCase ANに比べて顕著であることがわかる。また、同図(c), (d)より、粗粒化させた河床に置き土を行ったCase BU1およびBU2では置き土による砂Aの河床への供給と下層の砂Bの効果によって高水敷の河床低下に加え、低水路での河床上昇が前述の2ケースと比べてより顕著となっている。

図-6はCase BU2の実験に対して $x/L=0.3$ （置き土設置直下流付近）、 0.5 （移動床中流部）および 0.8 （移動床下流部）における河床横断形状を、図-5と同様に通水前、通水途中および停水後で比較したものである。同図より、高水敷については置き土設置直下流付近と移動床中流部で河床低下が顕著であるが、下流部ではほとんど変化していないことがわかる。一方、低水路については、河床は置き土設置直下流付近ではほとん

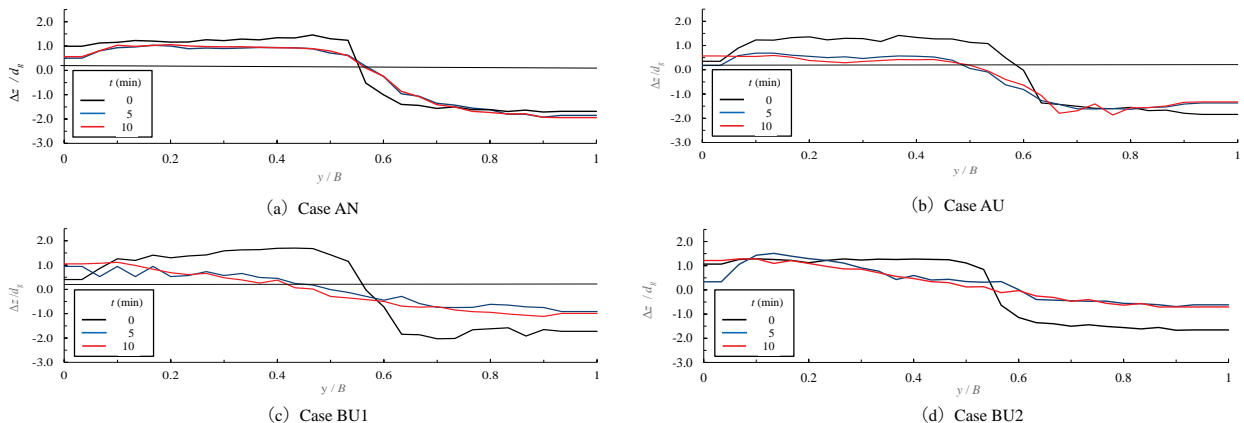


図-5 移動床部の河床横断形状（縦断平均）

ど変化は認められないが、中流部から下流部に向かうにつれて徐々に上昇し、下流部では高水敷も含め河床の平坦化傾向が認められる。以上のことから、侵食された置き土は高水敷の礫移動を活発化に寄与して河床侵食を促進させるとともに、その一部は高水敷の礫と混合してより下流の低水路に堆積すると考えられる。高水敷に覆砂を行った類似の実験³⁾でも高水敷の侵食と低水路への砂礫の堆積は生起しているが、覆砂ではこれらが覆砂区間全域にわたって認められたのに対して、置き土では置き土位置より下流での高水敷の侵食とさらに下流での低水路への砂礫の堆積現象となって現れる。これは、置き土による流路変動の特徴であると捉えることができ、さらに系統的に検討することによって、流路制御法の検討につながる可能性を示唆している。なお、低水路の河床の回復（低水路に堆積した砂礫の移動による河床低下）について、堆積土砂によって形成された河床が十分に侵食されない状態で安定化していることから、本実験の範囲では河床の回復傾向は認められない。これは、低水路に堆積した砂礫に占める砂の割合が礫を流送するほど大きくないためであると推察され、置き土量を変化させた実験を行うことによってその効果は明確になるものと考えられる。

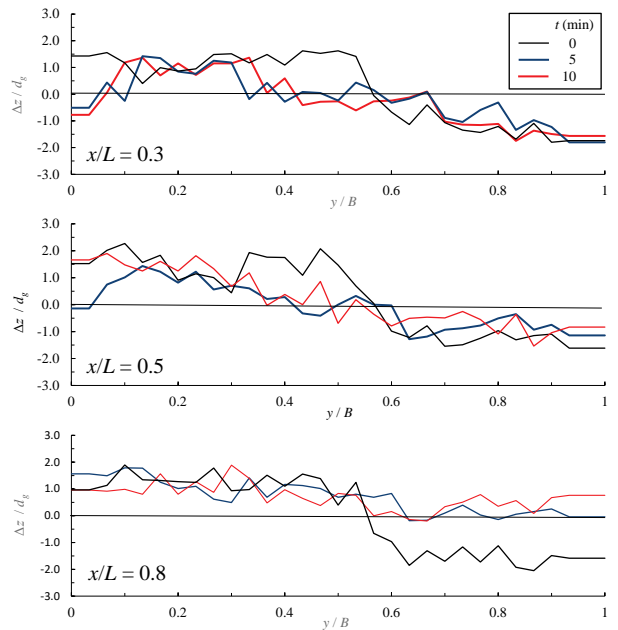
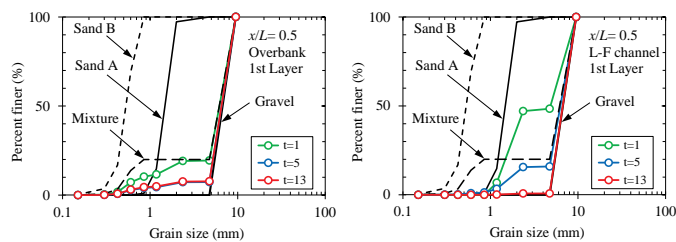
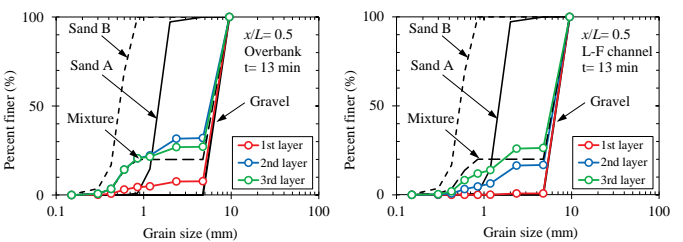


図-6 河床横断形状 (Case BU2 ; $x/L=0.3, 0.5, 0.8$)

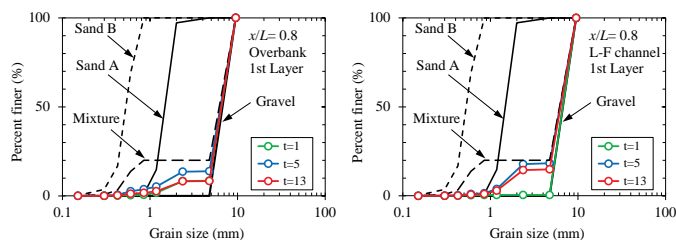
図-7 および図-8 はそれぞれ Case BU2 の実験で得られた河床表層粒度の時間変化および実験最終段階の河床鉛直方向の粒度分布を示している。まず図-7 より、移動床部中流部 ($x/L=0.5$) では $t=1$ 分時点で高水敷は置き土の砂 A の含有状態から徐々に粗粒化傾向を示し、低水路は $t=1$ 分時点ではより多くの砂 A が供給・堆積するがその後粗粒化が進行していることがわかる。一方、移動床下流部 ($x/L=0.8$) では高水敷、低水路とも実験を通して一定程度の置き土の砂 A の含有が認められ、その状態で安定している。とくに、図-6 の $x/L=0.8$ における低水路の河床上昇は高水敷の河床侵食に伴って供給された砂礫の堆積と低水路上流からの砂礫輸送によるものであるが、砂 A および砂 B の減少によって河床侵食は抑制されたと考えられる。なお、全体の傾向として $t=5$ 分以降の粒度分布の変化は小さく、これは図-4 の砂礫流出量にも関係しており、本実験では砂礫移動と河床変動は $t=5$ 分程度で概ね安定に至ったと判断される。なお、図-8 より、最終段階では



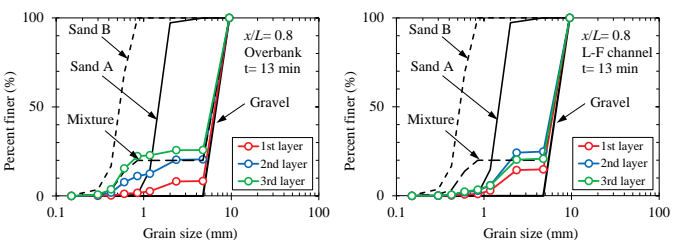
(a) $x/L=0.5$ (左：高水敷，右：低水路)



(a) $x/L=0.5$ (左：高水敷，右：低水路)



(b) $x/L=0.8$ (左：高水敷，右：低水路)



(b) $x/L=0.8$ (左：高水敷，右：低水路)

図-7 河床表層の粒度分布の時間変化 (Case BU2)

図-8 最終段階の河床鉛直方向の粒度分布 (Case BU2)

高水敷と $x/L=0.5$ の低水路の各層の粒度構成は通水前と概ね同様であり、置き土による礫移動は収束に近いことを示している。 $x/L=0.8$ の低水路は表層を含め第3層まで砂Aを一定量含んでいることから、高水敷や低水路上流からの砂礫の流入・堆積による河床上昇の侵食抑制と均衡していると考えられる。

最後に、置き土が低水路の幅と深さに与える影響について考察する。図-9(a)～(d)は4種類の実験における低水路の幅と深さの時間的変化を示したものである。幅と深さは窪ら³⁾に倣って図-10のように定義した。図中、青線は縦断平均した初期河床高、赤線は各停水時の河床高である。なお、 z 軸は置き土を設置していない状態の移動床部の平均河床高を基準 ($z=0$) としている。 y 軸 ($z=0$) と河床形状の交点から右岸側壁までの距離を低水路幅 W とし、 y 軸と $y/B=0.8$ 地点における低水路床との距離を低水路深さ D としている。なお、添え字の0は通水前の初期値を表す。さて、図-9(a)より、礫のみの河床で置き土を設置しないCase ANでは、低水路の幅と深さはほとんど変化しないことわかる。また、同図(b)より、礫のみの河床に置き土を設置したCase AUは、低水路幅は増加傾向にあるが、低水路深さは若干の増減は認められるが明確な変化傾向は見られず、概ね初期の低水路深さを維持している。さらに、同図(c), (d)より、CaseBU1では通水開始後3分程度以降に低水路幅の拡幅が認められるが、CaseBU2では通水開始直後の一時的な低水路幅の縮小以降は初期と同程度で変化している。ただし、図-5、図-6で示したように、このケースでは初期平均河床位よりも高い部分が侵食されて低水路は拡幅しており、現象としてはCase BU1と共通している。低水路幅の定義については現象をよりの確に捉えるよう再度検討が必要である。一方、低水路深さはともに通水開始から2分程度 ($0 < t \leq 2$) で堆積が著しい。CaseBU1では6～7分頃に低水路が侵食され、深さが若干回復していることがわかる。一方、CaseBU2では低水路は侵食されず当初の堆積が維持されていることがわかる。以上のように、混合砂礫では同条件でも流路変動状況に相違が認められ、その解釈が若干複雑である。今後この点も考慮した検討が必要である。

最後に、置き土が低水路の幅と深さに与える影響について考察する。図-9(a)～(d)は4種類の実験における低水路の幅と深さの時間的変化を示したものである。幅と深さは窪ら³⁾に倣って図-10のように定義した。図中、青線は縦断平均した初期河床高、赤線は各停水時の河床高である。なお、 z 軸は置き土を設置していない状態の移動床部の平均河床高を基準 ($z=0$) としている。 y 軸 ($z=0$) と河床形状の交点から右岸側壁までの距離を低水路幅 W とし、 y 軸と $y/B=0.8$ 地点における低水路床との距離を低水路深さ D としている。なお、添え字の0は通水前の初期値を表す。さて、図-9(a)より、礫のみの河床で置き土を設置しないCase ANでは、低水路の幅と深さはほとんど変化しないことわかる。また、同図(b)より、礫のみの河床に置き土を設置したCase AUは、低水路幅は増加傾向にあるが、低水路深さは若干の増減は認められるが明確な変化傾向は見られず、概ね初期の低水路深さを維持している。さらに、同図(c), (d)より、CaseBU1では通水開始後3分程度以降に低水路幅の拡幅が認められるが、CaseBU2では通水開始直後の一時的な低水路幅の縮小以降は初期と同程度で変化している。ただし、図-5、図-6で示したように、このケースでは初期平均河床位よりも高い部分が侵食されて低水路は拡幅しており、現象としてはCase BU1と共通している。低水路幅の定義については現象をよりの確に捉えるよう再度検討が必要である。一方、低水路深さはともに通水開始から2分程度 ($0 < t \leq 2$) で堆積が著しい。CaseBU1では6～7分頃に低水路が侵食され、深さが若干回復していることがわかる。一方、CaseBU2では低水路は侵食されず当初の堆積が維持されていることがわかる。以上のように、混合砂礫では同条件でも流路変動状況に相違が認められ、その解釈が若干複雑である。今後この点も考慮した検討が必要である。

4. あとがき 本研究により、置き土を設置することで下流河道における礫の移動性が活発化し、流路変動に影響を及ぼすことが示された。ただし、同じ条件でも低水路の変動は異なる結果が得られており、より詳細な検討が必要である。また、置き土の設置方法や置き土の粒度構成が流出土砂量や流路変動に及ぼす影響についても今後検討を進める必要がある。

参考文献 1) Ikeda, H.: Flume experiments on the causes of superior mobility of sediment mixtures, *Annual Report of the Institute of Geoscience* 10, University of Tsukuba, pp.53-56, 1984. 2) 三輪 浩, 山田啓太郎: 粗粒化河床への覆砂による礫の移動と流路変動, 河川技術論文集, 第24巻, pp. 89-94, 2018. 3) 窪 修平, 三輪 浩, 藤田 岳, 和田孝志: 粗粒化した礫河床における礫の移動と流路変動に及ぼす覆砂の効果, 土木学会論文集 (水工学), Vol.77, No.2, pp. I_733-I_738, 2021. 4) 三輪 浩, 木下真旺, 和田孝志, 梶川勇樹, 今津 勉: 置き土の侵食・流送に及ぼす設置条件の影響予測と現地河川への適用, 河川技術論文集, 第27巻, pp. 457-462, 2021.

参考文献 1) Ikeda, H.: Flume experiments on the causes of superior mobility of sediment mixtures, *Annual Report of the Institute of Geoscience* 10, University of Tsukuba, pp.53-56, 1984. 2) 三輪 浩, 山田啓太郎: 粗粒化河床への覆砂による礫の移動と流路変動, 河川技術論文集, 第24巻, pp. 89-94, 2018. 3) 窪 修平, 三輪 浩, 藤田 岳, 和田孝志: 粗粒化した礫河床における礫の移動と流路変動に及ぼす覆砂の効果, 土木学会論文集 (水工学), Vol.77, No.2, pp. I_733-I_738, 2021. 4) 三輪 浩, 木下真旺, 和田孝志, 梶川勇樹, 今津 勉: 置き土の侵食・流送に及ぼす設置条件の影響予測と現地河川への適用, 河川技術論文集, 第27巻, pp. 457-462, 2021.

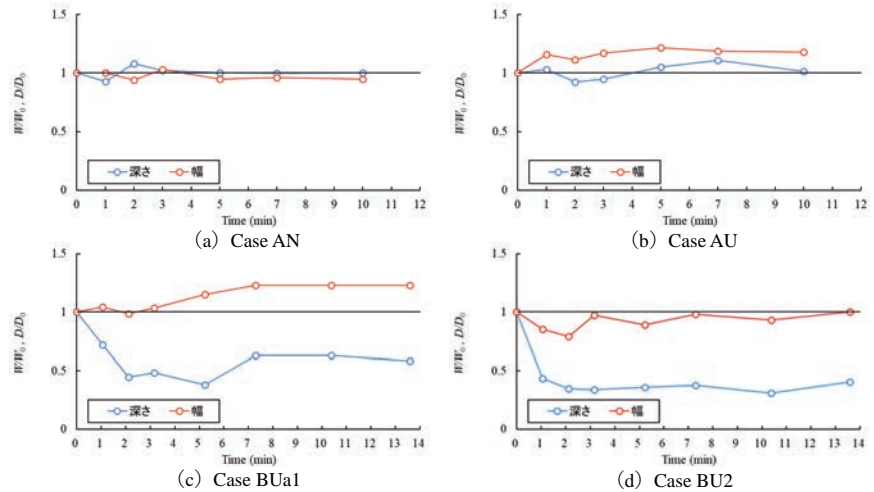


図-9 低水路の幅と深さの時間変化

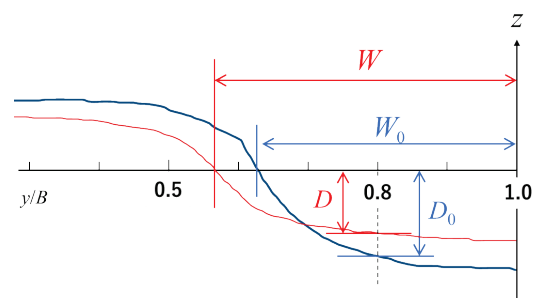


図-10 低水路の幅と深さの定義