

## 開水路河床変動解析手法の移動床急勾配管路流への適用性

## Applicability of Open Channel Bed Variation Analysis on A Steep Tunnel

大本雄二\*・宵田千裕\*\*・中山昭彦\*\*\*

Yuji OMOTO, Chihiro YOIDA and Akihiko NAKAYAMA

\*正会員 (株)ニュージェック 西日本事業本部 河川・海岸部 (〒542-0082 大阪市中央区島之内 1-20-19)

\*\*学生員 神戸大学大学院 自然科学研究科 建設学専攻 (〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1)

\*\*\*正会員 ph.D. 神戸大学大学院教授 自然科学研究科地球環境科学専攻 (同上)

Sediment bypass system has been proposed as a countermeasure against sedimentation and turbid effluence that occur in reservoirs over long period of operation. The system allows both bed load and suspended sediment to bypass the reservoir via a steep-sloped tunnel connecting the upstream of reservoir and the downstream river. In order to provide a guide for rational design of such bypass system, the sediment transport mechanism in a steep tunnel has been studied both experimentally and numerically. The phenomenon observed in the experiment indicates highly unsteady flow, but the analysis method for flows in open-channel with movable bed is found to reproduce overall phenomenon. Better representation of the rapidly changing parts of the flow will further improve results.

**Key Words :** bed variation analysis, steep tunnel, pipe flow

## 1. はじめに

ダム貯水池の堆砂対策、濁水対策の1つの選択肢として、バイパス排砂システムが考えられる。これは貯水池の末端付近に取水口を、ダム下流に放水口を設けて、出水時の土砂、濁水を、バイパス水路を用いて貯水池に流入させることなくダム下流に導くものである<sup>1)</sup>。

このバイパス排砂システムを対象土砂で分類すると、ウォッシュロードから掃流砂までの現地で流下してくる全粒径を対象とした、いわゆる掃流砂バイパスと、水路摩耗の原因となる掃流砂をバイパスに流入させないように分派させるいわゆるウォッシュロードバイパスとに分けられる<sup>2)</sup>。水理学的な検討課題をトンネルに限って見た場合、後者の場合は水のみを対象とした設計と同様に扱えるのに対し、前者はより複雑な土砂水理学的な課題—例えば、トンネルの閉塞の有無、土砂輸送能力など—を扱うことになる。

前者を選択した場合、地形条件などからバイパス水路として急勾配のトンネル水路を採用する可能性が高く、かつ、トンネル内掃流力の確保等から開水路流の設計とする場合が多くなってくると考えられる。

掃流砂バイパスを対象とした研究としては、原田らの研究<sup>3)・4)・5)</sup>があり、その中でバイパス水路内への急激な土砂流入がある場合には、開水路流で計画されている水路でもトンネル水路内に土砂が堆積して管・開水路流が

混在する流れ場が形成されるとともに、トンネル内に設計上無視できない程度の負圧が発生する可能性があることが指摘されている。同研究ではその現象、負圧の原因等について定性的な説明を加えているが、設計上重要と考えられる負圧の程度等に対する定量的な評価をするまでには至っていない。

このような掃流砂バイパスの合理的な設計を行うには、管・開水路が混在する流れ場における土砂輸送、移動床現象を表現し得る数値シミュレーションモデルが必要となる。土砂輸送を扱った従来の研究としては、土木分野における管路流土砂輸送の問題<sup>6)・7)・8)</sup>、機械分野におけるスラリー輸送、固液二相流の問題など<sup>9)・10)・11)・12)</sup>があるが、これらは、水平管、鉛直管を対象としたものがほとんどで、かつ、上流端で圧力をコントロールする被圧水路を前提としていて、流水の位置エネルギーを利用した急勾配水路における物質輸送の研究は見られない。また、管・開水路が混在する流れ場における研究は、地下河川、下水分野で、エアーの閉じ込め問題等を対象にいくつかの事例が見られるが<sup>13)・14)・15)</sup>、これらは流水と空気の挙動のみを扱っており、流砂の存在するバイパス排砂システムの研究とは問題を異にする。

そこで、筆者らは管・開水路が混在する急勾配水路における移動床現象を扱える数値シミュレーションモデルの構築を目指し、その最初のステップとして、このような現象を明確にするための移動床水理模型実験<sup>16)</sup>を実施するとともに、実験で観察された管路における移動床

現象に対して、開水路の河床変動計算でよく用いられる解析手法を用いた場合の適用性について検討した。その結果、従来のバイパス排砂の研究では扱われていなかったトンネル内への土砂流入に伴うトンネル内流量の減少について明らかにするとともに、その流量変化も考慮した開水路河床変動計算の手法を管路流に適用することでおおよそその現象の解析が可能であることを示した。

2. 急勾配管路の移動床現象

2.1 水理模型実験概要

既往研究<sup>5)</sup>では、現象を解析するにあたって以下の課題が挙げられている。

- ・トンネル内の現象を支配すると考えられるトンネル流入土砂量が未知量であり、現象の定量評価が難しくなっている。
- ・堆砂高（堆積厚）が急激に変化する部分を含め、抵抗特性の解明が不十分である。
- ・厳密な議論には現象の非定常性に関する検討も必要と考えられる。

そこで本研究では、現象を適切に評価するためには、トンネル流入土砂量既知の実験が不可欠と考え、以下に示す実験を行った。

実験装置を図-1に示す。バイパストンネル（アクリル樹脂製）は長さ10m、勾配1/33、断面形状は5cm×5cmの幌型で、トンネル下流には平面規模90cm×180cmの水槽を置き、ポンプにより水を循環させる。上流水槽の取水口部については、投入土砂がタイムラグなくトンネルに流入するように、取水口部前面に摺り鉢状の堰を設けた。

実験は、一定流量を通水し、トンネル上流端からほぼ一様な粒径0.7mmの砂を給砂して、複数の測点において、圧力水頭（ピエゾメーター+マノメーター）、堆砂高（ビデオ）、トンネル水位（ビデオ）を測定した。ピエゾメーターの取付位置は図-1の実験装置の中にあわせて示しているが、圧力値をできるだけ正確に計測することを目的に、1つの断面で2ヶ所のピエゾメーターを取り付

け、三ツ又で接続したものをマノメーターに連結した。取り付け高さは、堆砂の影響を受けず、かつ開水路流のときにも極力圧力を計測するために図の位置を選定した。

実験条件を表-1に示す。Case1について、No1, 3, 5, 7, 9およびNo5-1~5-9の14測点の実験を行った。実験ではトンネル下流端における流量も計測した。

流量は土砂の投入によりトンネル内が開水路流から管路流に遷移しやすい流量を設定した。土砂の投入がない場合、設定流量をトンネルに通水した場合は開水路流である。

また、給砂の条件は、既往研究<sup>5)</sup>において、堰とオリフィスを組み合わせた取水口形状を有するバイパストンネルでは、オリフィス部が開水路流がオリフィス流になるかによって土砂の流入が間欠的になることが報告されており、それをイメージしたものとして、給砂時間では連続的に土砂を投入し、その投入土砂がバイパスから排出された後、上流端からの空気の混入が認められた時に再び給砂を行うようにした（図-2）。

表-1 実験条件

| ケース名  | 流量(l/s) | 給砂量*1<br>(cc/s) | t <sub>1</sub> (s) | t <sub>2</sub> (s)*2 |
|-------|---------|-----------------|--------------------|----------------------|
| Case1 | 2.35    | 125             | 40                 | 約150                 |

\*1 空隙込みの量

\*2 投入した土砂がトンネルから排出されトンネルが開水路流になるまでの時間

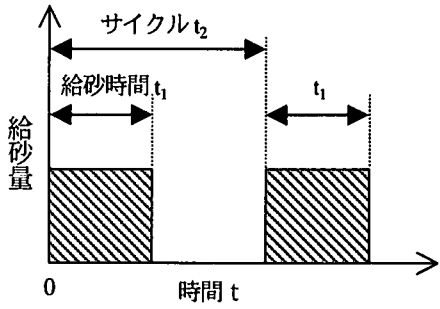


図-2 給砂条件

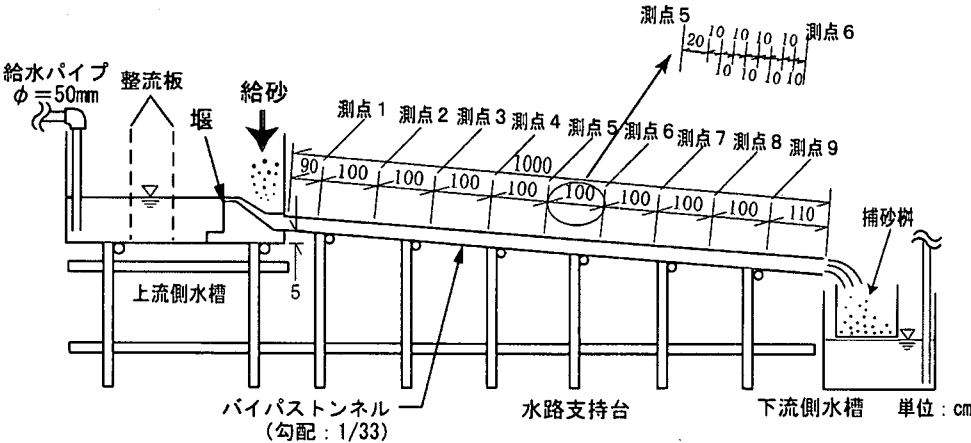
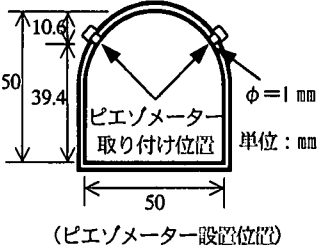


図-1 実験装置



(ピエゾメーター設置位置)

2.2 急勾配管路の移動床現象特性

トンネル内では以下のような現象が観測された。

開水路流状態の水路に、土砂を投入するとトンネル内には土砂が堆積し、管路流が形成される。堆積した土砂は時間とともに部分堆積層流れの状態で流下し、給砂の開始から終了までの間に投入した土砂が帯状の堆積部を形成する。

やがて堆砂部の先端が水路下流端に至り、土砂が排出され始め、堆砂部の末端が水路下流端に達して、1 サイクルの土砂が全て排出される。一般に、掃流砂の河床変動では、河床の変化は拡散的な挙動を示すが、本研究の成果は波動的な挙動を示している。この間の測点No1, 3, 5, 7, 9 における定点堆砂高等の変化を図-3 に、堆砂高等の縦断分布の時間変化を図-4 に示す。

トンネル内では土砂の堆積によって負圧が発生し、堆砂の進行とともに圧力が変動しているのがわかる。負圧の最大値は帯状の堆砂の先端付近で、正圧の最大値は堆砂の後端付近で発生しており、堆砂部分の動水勾配は水路勾配より急勾配で、非堆砂部分の動水勾配線は水路勾配より緩勾配となっている。負圧の最大値は、管頂を基準に考えると 10 cmを超えており、管径の 2 倍程度になっている。

圧力変動周期は、堆積層の流下方向の長さに依存していることは明らかである。

図-5 は、Case1 についてトンネル下流端で計測された流量の時間変化である(図中の計算値については後述)。ここでの流量は 10 秒間の測定(バケツによる計測)を 15 秒間隔で計測した。

最初の計測値は、設定流量に対して 60%程度の流量となっているが、これは最初の土砂投入のインパクトにより流量が一時的に急激に減少したものと考える。その後流量は回復するが、通水 70 秒程度では、設定流量の 80%程度の流量になっているが、このころには管全体にわたって完全に管路流が形成される。

図-6 は下流端流量と総損失(取水口上流端エネルギー高-バイパストンネル測点No9 エネルギー高)の関係を整理している。流量の減少は総損失と密接に関連しており、土砂流入に伴って総損失と流量が時間的に変化していることがわかる。

図-7 は圧力変動の振幅 A (最大圧力水頭-最小圧力水頭)と測点との位置関係(トンネル全長 L に対する取水口から測点までの距離 l の比)を、既往研究のデータ(白抜き)と今回の実験(黒抜き)とを比較する形で整理したものである。

傾向として、両研究ともトンネル中央部付近で圧力変動振幅が大きく、取水口、放水口のトンネル両端で小さくなる事が確認できる。これは堆砂の縦断長さが長いほうがエネルギー勾配の急な区間が長くなるためと解釈できる。

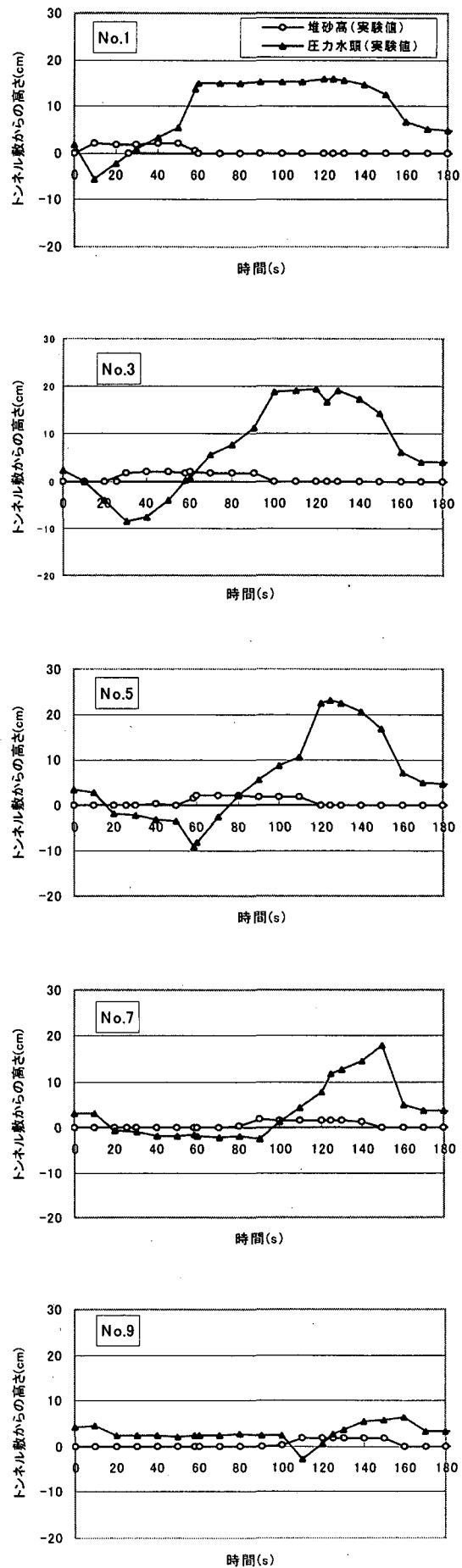


図-3 堆砂高等の経時変化 (Case1 ; 実験値)

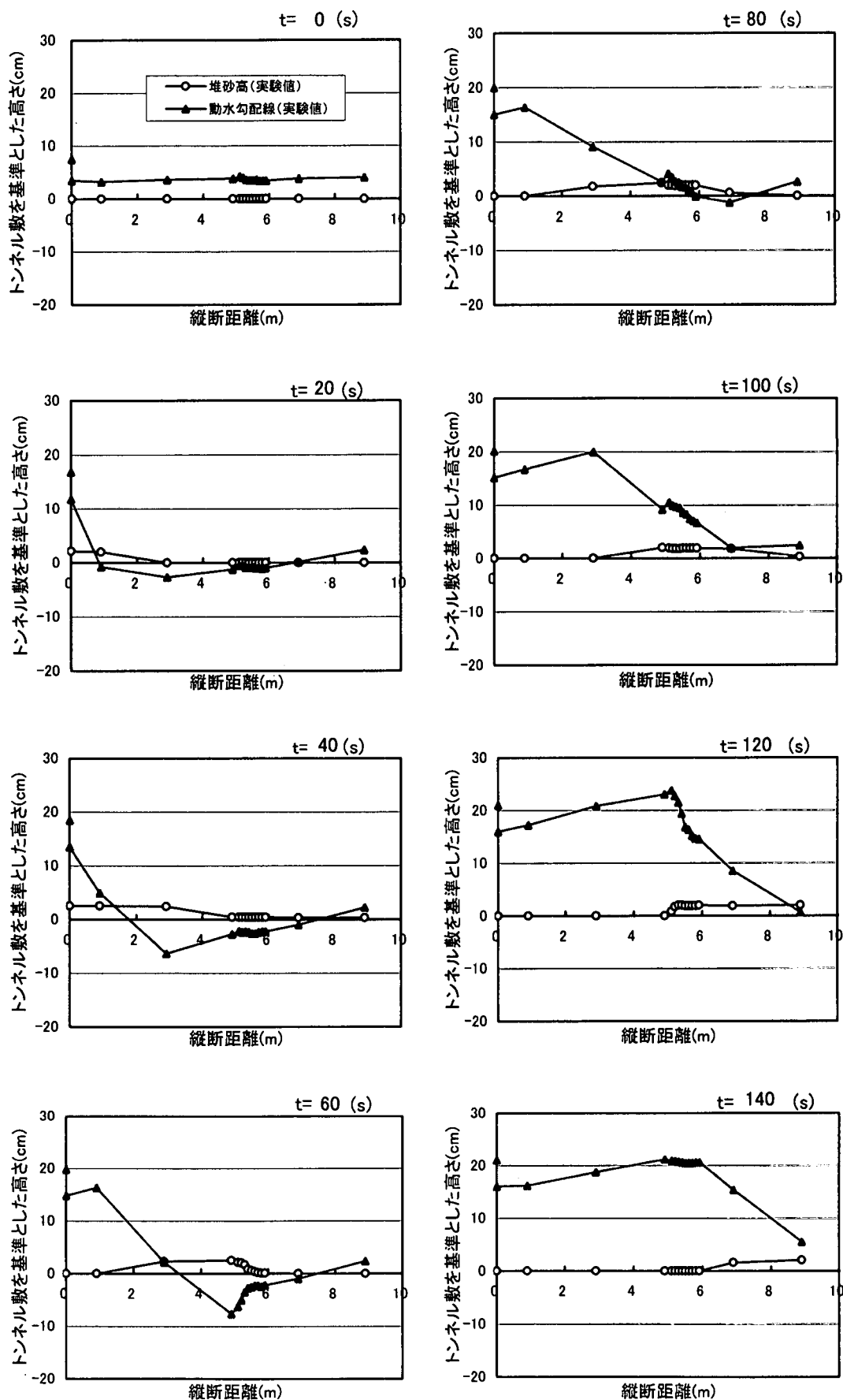


図-4 圧力水頭等の縦断分布の時間変化(Case1;実験値)

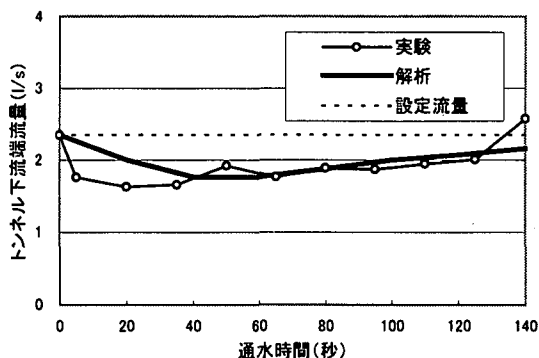


図-5 トンネル下流端流量の時間変化

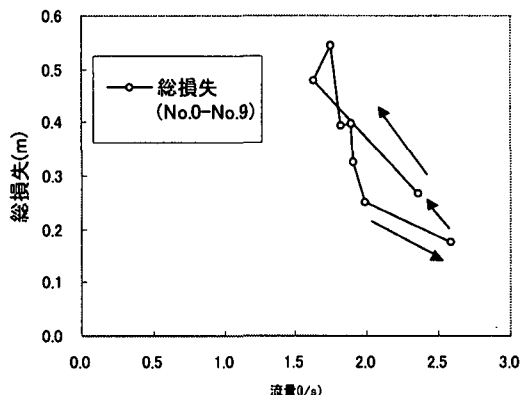


図-6 流量と総損失の関係

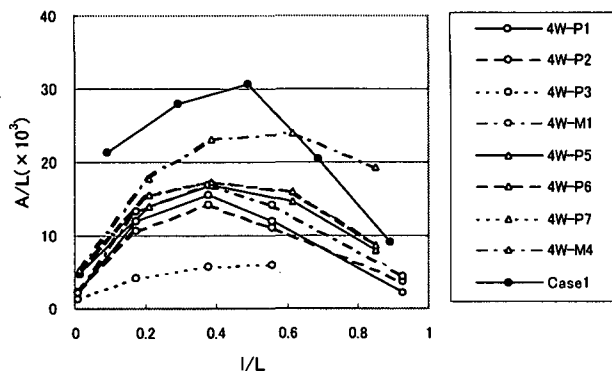


図-7 圧力変動振幅と測点位置の関係

### 3. 河床変動解析

#### 3.1 開水路における河床変動計算

河床変動計算の数値解析は、運動方程式と連続式、ならびに流砂の連続式を連立して、直接的に差分法等で解かれることが多い。一般に河床形状の変化に対する流れの応答は速く、河床の変化の速度は流れの変化速度に比べて遅いため流れは河床形状を固定して、不定流計算・不等流計算を行って求め、この流れ場を用いて河床変動の非定常計算を行うことが多い<sup>17)</sup>。このような方法によって行われる河床変動計算を、「擬似定常」を仮定した河床変動計算と呼ぶこともある<sup>18)</sup>ようである。筆者らが用いている開水路の河床変動計算モデルは、流れ

と河床形状を交互に計算し、流れを不等流計算によって求めるものをベースにしている。

#### 3.2 管路を対象とした河床変動計算

今回の管路を対象とした河床変動計算手法の適用性を検討するにあたっては上記開水路における方法に準じて以下の方法を用いた。計算は管路流が形成された状態を対象にした。

##### (1) 基礎方程式

水の連続式、エネルギー方程式は一次元定常流の下式を用いた。

$$\frac{dQ}{dx} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{d}{dx} \left( \alpha \frac{V^2}{2g} + \frac{P}{\rho g} + Z \right) + \frac{dh_l}{dx} = 0 \quad (2)$$

ここに  $Q$ : 流量,  $x$ : 流下方向距離,  $V$ : 断面平均流速,  $\alpha$ : エネルギー補正係数,  $g$ : 重力加速度,  $P$ : 圧力,  $\rho$ : 密度,  $Z$ : 基準面からの高さ,  $h_l$ : 損失水頭

流砂の連続式、流砂量式 (芦田・道上式) は以下のようである。

$$\frac{\partial Z_s}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \cdot \frac{1}{B} \cdot \frac{\partial}{\partial x} (q_B \cdot B) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{q_B}{\sqrt{(\sigma/\rho-1)gd^3}} = 17\tau_{*s}^{3/2} \left(1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_{*s}}\right) \left(1 - \frac{u_{*c}}{u_{*s}}\right) \quad (4)$$

ここに  $Z_s$ : 河床高,  $t$ : 時間,  $\lambda$ : 空隙率,  $B$ : 掃流幅,  $x$ : 流下方向距離,  $q_B$ : 単位幅掃流砂量,  $\sigma$ : 砂粒子の密度,  $d$ : 粒径,  $\tau_{*c}$ : 無次元限界掃流力,  $\tau_{*s}$ : 無次元掃流力,  $u_{*c}$ : 限界摩擦速度,  $u_{*s}$ : 摩擦速度 (添え字  $s$  は堆砂部が支配する領域の意)

##### (2) 計算方法

各断面の管路流の水理量の算定にあたっては、芦田ら<sup>9)</sup>の方法に従った。すなわち、管内の抵抗を壁面部と底面部が支配する領域に分割して考えるモデル (図-8) を適用し、壁面部は滑面の抵抗則、底面部は粗面の抵抗則を用いた。具体的には、ある時間、ある断面に対して流量  $Q$ , 1つ前の計算時間の河床高  $Z_s = Z_0 + Z_s$  (すなわち流積  $A$ ,  $A_s$  領域の潤辺  $S_s$ ) が与えられるので、以下の(5), (6), (7)式を連立させて、エネルギー勾配  $I$  を定めた。すなわち(2)式における  $dh_l/dx = I$  である。

ここで  $A_b$ ,  $A_s$  領域の平均流速  $V$  および  $I$  が等しいという仮定を用いている。

$$R_p S_p + R_s S_s = A \quad (\text{断面分割式}) \quad (5)$$

$$\frac{V}{u_{*p}} = 3.0 + 5.75 \log_{10} \left( \frac{u_{*p} R_p}{\nu} \right), \quad u_{*p} = \sqrt{g R_p I}$$

( $A_p$ 領域の流速の式) (6)

$$\frac{V}{u_{*s}} = 6.0 + 5.75 \log_{10} \left( \frac{R_s}{k_s} \right), \quad u_{*s} = \sqrt{g R_s I}$$

( $A_s$ 領域の流速の式) (7)

ここに  $Q$ : 流量,  $A$ : 堆砂高を考慮した流積,  $V$ : 断面平均流速,  $R_p \cdot R_s$ :  $A_p \cdot A_s$ 領域の径深,  $S_p \cdot S_s$ :  $A_p \cdot A_s$ 領域の潤辺,  $k_s$ : 相当粗度 (粒径使用),  $\nu$ : 動粘性係数,  $I$ : エネルギー勾配である。

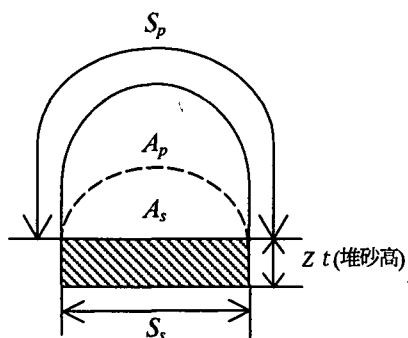


図-8 断面分割説明図

また系全体の計算では, 下流端における圧力値を大気圧として固定し, 各断面のエネルギー勾配を積分してエネルギー線を算定した。各時間における流量は, 実験におけるトンネル上下流端の総損失量を既知量として, 計算における総損失量が実験の総損失量と等しくなるように繰り返し計算により  $Q$  を算定した。ただし計算では, 流量変化 (損失変化) が滑らかになるように, 流量の平滑化を行っている。

#### 4. 開水路河床変動解析の適用性

図-5 に, トンネル下流端流量の実験値と計算値の比較を示している。

図-9, 10 に, 実験結果の整理である図-3, 4 と同様の形で計算結果を示す。

流量の計算結果は全体的に実験の傾向を示すが, 実験初期の流量が一時的に大きく減少する通水 40 秒程度までのずれが大きい。これは実験では, 土砂投入初期には開水路流の状態であるのに対して計算は管路流を前提としていることによるものと考えられる。しかしながら完全な管路流が形成されてからは実験値と計算値は整合が見られる。

また, 負圧の大きさの程度や, 圧力変動の時間変化, 堆砂高やその進行状況も, 概ね再現できているものと判断できる。したがって, ここで適用した計算方法でも管路の移動床現象を大略表現できていると判断できる。

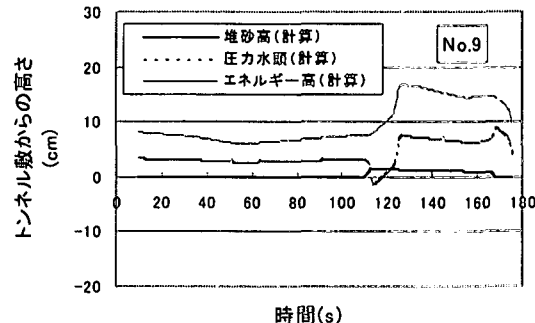
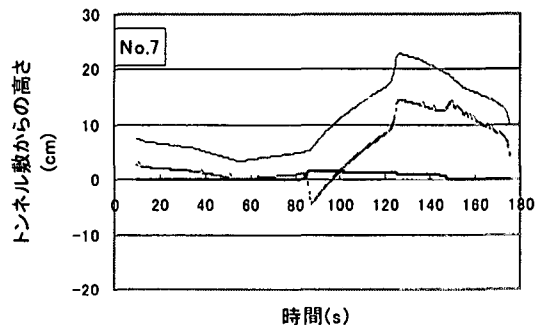
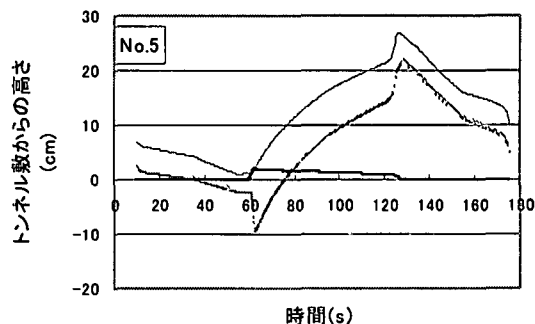
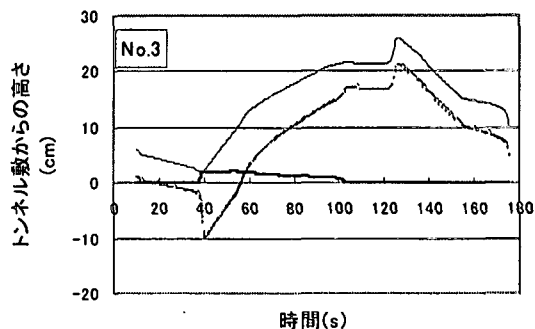
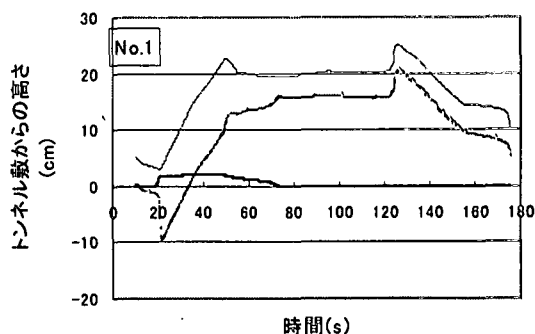


図-9 堆砂高等の経時変化 (Case1 ; 計算値)

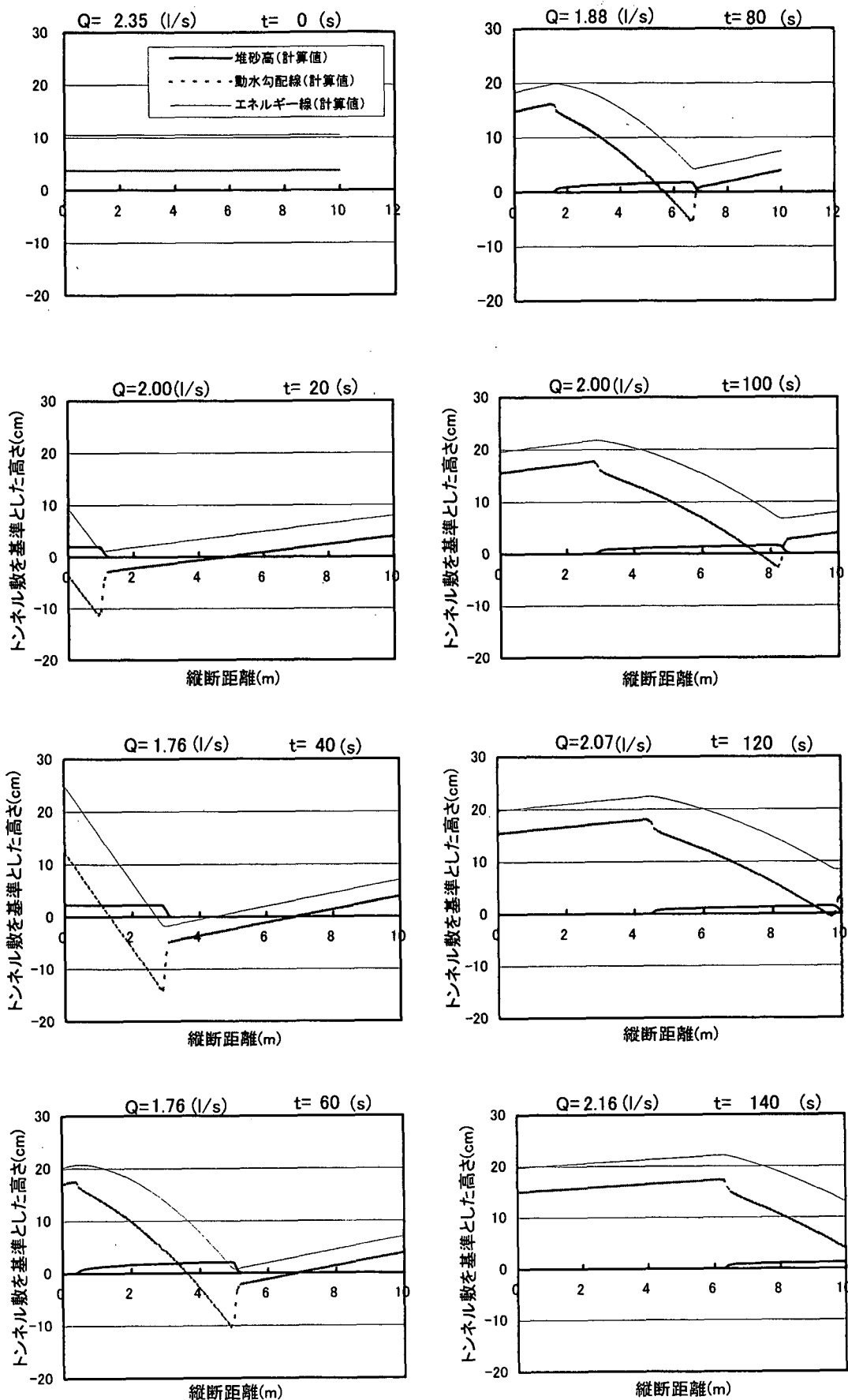


図-10 圧力水頭等の縦断分布の時間変化(Case1; 計算値)

しかしながら、以下の理由によりトンネル内の流量の時間的変化を考慮できる計算モデルの構築は重要と考えられる。

すなわち、今回は開水路流から管路流に遷移する現象は扱わずに、管路流が形成されている状態を対象としているが、管路内での堆砂層の形成が管路流を諸起し、それが圧力変動現象のきっかけになっていることを考えると、非定常性の強い土砂投入時の現象を的確に表現する必要があること、さらに、本研究ではこのようなバイパス水路の閉塞の有無<sup>19)</sup>を解析的に見出すことも念頭に置いていることによる。また、堆砂高が急変する堆砂の先端や終端での損失特性等については差異が見られ、今後詳細な検討を要する。

## 5. おわりに

本研究は、急勾配管路の移動床現象に着目した水理模型実験を実施して、堆砂高が縦断方向に大きく変化する場合の管内圧力変動現象について考察を加え、トンネル流入土砂量が既知の条件でのトンネル内河床変動計算を実施した。水理実験からは、このような圧力変動を伴う現象では流量減少を伴うことを明らかにした。また、ここでの河床変動計算は、開水路の場合と同様の解析であるが、現象の大略的な把握はこの方法でも可能であることが明らかになった。しかしながらトンネル水路内の土砂水理特性をより適切に理解するには、現象に関する非定常性等を考慮していく必要があることが示唆される結果を得た。

今後は、堆砂高が縦断方向に大きく変化する部分での損失特性、管内抵抗則と管内流量についてより厳密な検証を進めるとともに、管・開水路が混在する流れ場を対象とした非定常のトンネル内河床変動モデルを構築し、バイパス排砂システムの合理的設計に対する基礎資料を提示していく予定である。

**謝辞：**本研究を実施するにあたり、従前研究データの使用を快諾頂いた関西電力(株)土木建築室の方々、実験等に御尽力頂いた神戸大学 細川茂雄助教授、藤田一郎助教授、市成準一技官、工学部学生諸氏、ならびに(株)日本工業試験所 谷美智成氏に謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 寺田昌史, 原田稔, 芦田和男: 貯水池のバイパス排砂システムの計画について, 土木学会第 50 回年次学術講演会概要集, 2-A, pp.418-419, 1995.
- 2) 例えば, 柏井条介, 本田敏也: 土砂バイパス施設分派部の水理検討, ダム技術 No108, pp.24-34, 1995.
- 3) 原田稔, 寺田昌史, 出野尚, 大本雄二: 貯水池のバイパス排砂システムによる掃流砂排出システムに関する

実験的研究, 水工学論文集 vol.40, pp.813-818, 1996.

- 4) 原田稔, 小久保鉄也, 出野尚: 貯水池のバイパス排砂システムにおけるトンネル内土砂水理特性, 土木学会論文集 No600/II-44, pp.69-84, 1998.
- 5) 原田稔: 貯水池のバイパス排砂システムに関する研究, 京都大学学位論文, 1998.
- 6) 芦田和男, 江頭進治, 中島智彦: 水平管路における土砂輸送形態と流砂機構, 京大防災研究所年報 第 31 号 B-2, pp.489-506, 1988.
- 7) 栗原崇, 鈴木幸一, 池辺健作: 水平管路における摺動層流れの実験, 水工学論文集 vol.40, pp.831-836
- 8) 辻本哲郎, 蔵重俊夫, 北村忠紀, 岡田敏治: 堆積層を伴う円管内の掃流砂, 水工学論文集 vol.38, pp.653-658, 1994.
- 9) 野田佳六: 土砂の管路輸送, 第 22 回水工学に関する夏期研修会講義集 A-3-1~16, 1986.
- 10) 摺動層を伴う流れにおける圧力損失—水平管内二相流における粒子群の挙動に関する研究 (第 5 報), 日本鉱業会誌 vol.103 No1188, pp.101-107, 1987.
- 11) 劉双科, 高橋弘: 水平管内気液固三相流における粒子挙動に関する研究, 水工学論文集, vol.40, pp.825-830, 1996.
- 12) 南川久人, 富山明男, 赤對秀明, 坂口忠司: 鉛直管内粗大粒子系固液二相流への局所相対速度モデルの適用, 混相流シンポジウム'99 (第 18 回) 講演論文集, pp.41-44, 1999.
- 13) Charles C.S.Song, M.ASCE, James A.Cardle and Kim Sau Leung: Transient Mixed-Flow Models Storm Sewers, Journal of Hydraulic Engineering, Vol.109, No.11, pp.1487-1503, 1983.
- 14) 鮎川登, 梅田博志, 三戸孝延, 後藤正典: 空気が閉じ込められている地下放水路の流れの数値計算, 土木学会論文集 No635/II-49, pp.41-48, 1999.
- 15) Akhilesh Kumar JHA, Juichiro AKIYAMA and Masaru URA: FREE-SURFACE-PRESSURIZED FLOW SIMULATIONS BY F.D.S. SCHEME, Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE, Vol.44, pp.503-508, 2000.
- 16) 大本雄二, 宵田千裕, 中山昭彦: バイパス排砂システムの土砂輸送特性について, 土木学会第 56 回年次学術講演会概要集 II-098, pp.196-197, 2001.
- 17) 水理公式集[平成 11 年版], P.176, (社)土木学会, 1999.
- 18) 西本直史, 森明巨, 板倉忠興, 田原達人: FDS 法による 1 次元河床変動解析, 土木学会論文集 No677/II-55, pp.103-113, 2001.
- 19) 大東秀光, 加藤雅広, 増田覚: 貯水池土砂バイパストンネルの堆砂進行条件について, 土木学会第 55 回年次学術講演会概要集 II-255, 2000.

(2002 年 4 月 19 日受付)