

# 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

原 田 稔<sup>1</sup>・小久保鉄也<sup>2</sup>・出 野 尚<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 関西電力株式会社 土木建築室長 (〒530-8270 大阪市北区中之島3-3-22)

<sup>2</sup>正会員 関西電力株式会社 土木建築室土木保修課副長 (〒530-8270 大阪市北区中之島3-3-22)

<sup>3</sup>正会員 関西電力株式会社 金居原水力発電所建設準備事務所技術課技術係長

(〒529-0402 滋賀県伊香郡木之本町杉野わらべ8 19-1)

上流河道から流送されてくる掃流砂を、ダム貯水池を経ずにダム下流河道へ導くバイパス排砂システムを実際の貯水池に適用する場合、技術的課題の一つに、このシステムの安定性の評価・検証が挙げられる。これは換言すれば、トンネル内土砂水理特性を適切に把握・評価する問題とも言える。このシステムにおけるトンネル内流れは水と土砂の混相流という扱いになるが、本論文では実験的アプローチにより、土砂が急激に流入するなど非定常性が強い場合、負圧を伴う大きな圧力変動がトンネル内で周期的に発生する現象を見出した。また、この現象は流量の変化や局所的な流速の変化に起因するものではなく、急激な土砂流入に起因する堆砂の発生と管路流の巻起およびこの堆砂が系全体のエネルギーを空間的に配分しながら進行していくことに支配されることをシミュレーションによる再現により解析的に説明した。

**Key Words :** *bypass system, bed load transport, hydraulic model study, numerical method*

## 1. はじめに

ダム貯水池は、治水・利水の面で大きな効用を持つ反面、土砂の自然流下を阻害し、堆砂による貯水池の機能低下や貯水池上流域の河床上昇、下流域の河床低下や海岸侵食、また、濁水長期化による貯水池内および下流域の水質問題など広い範囲の問題に関わりを持つ。このようないわゆる貯水池の土砂問題は、現状からみて今後とも看過出来ない問題と位置付けられ、その対策として総合的な土砂対策システムの確立が極めて重要な意味を持つ。このような観点から、著者らはさまざまな土砂対策システムの中でもバイパス排砂システム(図-1参照)が最も自然の理にかなっていると考え、これを奈良県奥吉野発電所の旭貯水池に適用すべく<sup>1)</sup>、土砂水理学的な見地から一連の研究を行っている<sup>2), 3), 4), 5)</sup>。本論文はこのシステムにおけるトンネル内土砂水理特性、特に非定常特性に着目して論ずるものである。

## 2. バイパス排砂システムの貯水池土砂問題対策上の位置付け、技術的課題および本論文の目的所在

ダムの建設によって自然の河道に大規模な貯水池が出現した場合、流水の滞留に伴って水理学的な変化が生じ、ダム建設前と異なった水域環境を呈する

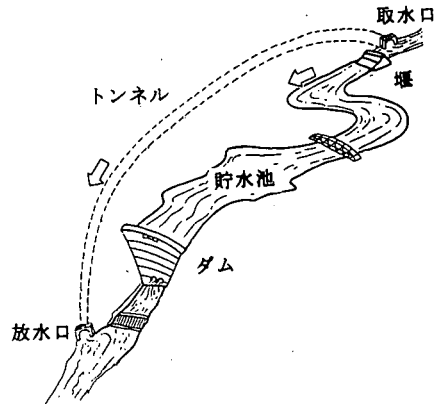


図-1 バイパス排砂システム概念図

ことになる。その結果生じる事象は大別して水質問題と堆砂問題に分けられる。水質問題には冷水問題、富栄養化問題、淡水赤潮問題、濁水長期化問題等があるが、このうち濁水長期化問題が土砂問題として位置づけられる。また、一方の堆砂問題はまさに土砂問題そのものであり貯水池機能そのものはもちろん上下流域に様々な問題を引き起こす。

濁水長期化問題と堆砂問題はともに上流からの流送土砂を貯水池で遮断することに起因するという意味でいわば同種の問題であり、前者は貯水池内で沈降し難い微細粒子、後者は沈降する比較的粗い粒子がその対象となる。

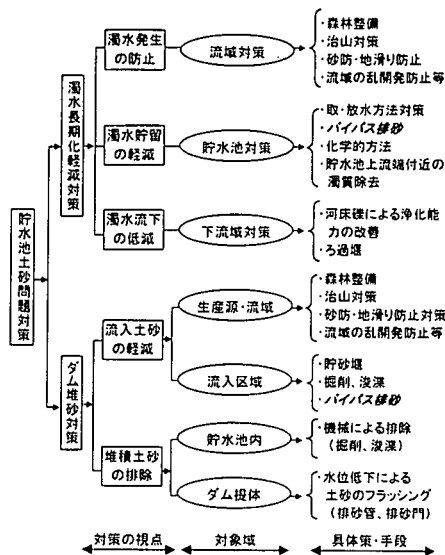


図-2 貯水池土砂問題対策

バイパス排砂システムはこれらを貯水池に流入させることなく下流へ迂回することでこれら問題を回避するシステムである。種々の対策の中での位置づけを図-2に示す。

このシステムは自然の営力を利用し、また貯水池建設以前の河川状況に近づけるという意味で、さらに、同じく自然の営力を利用する方式で著者らが黒部川出し平ダムに適用した<sup>6)</sup>排砂ゲート方式と比較しても水位低下の必要がないという点で、問題解決に対し極めて好ましいシステムであると考えられるが、実際の適用に当たっては、次に挙げるいくつかの技術的課題をクリアしておく必要がある。

#### ①効果の定量的評価

システムを実際に適用した場合の効果、すなわち濁水長期化軽減効果や堆砂軽減効果を事前に十分把握する必要がある。

#### ②システムの機能（通水、通砂機能）

既往の研究事例<sup>7)</sup>のようにウォッシュロードや浮遊砂だけを通水する場合は特段問題はないと考えられるが、掃流砂を通水（通砂）する場合は、トンネル内流況が不安定になる場合がある。また、最悪の場合にはトンネルの閉塞に至りシステムが機能しなくなる可能性もある。

#### ③システムの維持管理

これもウォッシュロードや浮遊砂だけを通水する場合は特段問題はないと考えられるが、掃流砂を通水（通砂）する場合は、磨耗対策について検討が必要となる。

#### ④システムの環境に及ぼす影響

このシステムは貯水池の自然河川に及ぼす影響を

軽減するという意味で基本的にいわゆる自然にやさしいシステムであるが、システム導入前後で上下流の河川環境が変わる可能性は無視出来なく、この点について事前に影響評価しておく必要がある。

本論文はこれら技術的課題のうち、②のシステムの通水、通砂機能を実貯水池スケールに対して検証することを最終目的として、まずトンネル内土砂水理特性（主として非定常特性）について実験的アプローチによりその現象論を明らかにし、続いて数値シミュレーションを用いて現象を解析しようとするものである。

### 3. 従来の研究

バイパス排砂システムは、その機能から言えば、管路により土砂を流送するシステムと位置付けされるが、対象とする土砂によって2種に大別されよう。1つはウォッシュロードのみを対象としたもの、もう1つはそれに加えて浮遊砂、掃流砂をも対象にしたものであり、本論文で扱うところのものである。

前者の場合、バイパストンネルにおける水理特性は水としての扱いであり、既往の研究事例も散見される<sup>7)</sup>ものの、後者の場合、水と土砂との混合体となるため扱う現象がより複雑になり、著者らの知る限り研究事例もみられない。ただし、貯水池のバイパストンネルに限らず水工学の分野を広く見渡せば、管路による土砂輸送問題が石炭の輸送システムや港湾における浚渫土砂の輸送システムに関連して比較的古くから最近に至るまで研究されている<sup>8)・9)・10)</sup>。しかしながらこれらとて管路流のみならず開水路状態、あるいは両者が時空間的に混在するような非定常流れを対象としたものではない。

著者らは、現在まで、バイパス排砂システムに関して、トンネル取水口付近およびトンネル内の土砂水理特性を実験的に検討してきた。そして、オリフィス型取水口を採用する場合、取水口近傍において、取水口全面の水位と、取水口全面への堆砂の進行程度によって、一般に、図-3に示すように、大きく5つの状態が現出され、また、トンネルへの流入土砂量については、取水口部より上流の河道を対象に1次元河床変動モデルを適用することによりほぼ適切に評価出来るという知見を得ている<sup>6)</sup>。また、トンネル内については、定常流時では流量と流砂量に応じて、図-4に示すような堆砂のない開水路流、堆砂のない管路流、堆砂のある管路流の3つの流送形態が現れ、この現象は流水断面を分割する数値モデル<sup>11)</sup>で概ね表現可能であるという知見（図-5参照）を得ている<sup>6)</sup>。

オリフィス部	開水路流	オリフィス流	オリフィス流	オリフィス流	開水路流
流量	小	大	大	大	小
堆砂状況	小	小	進行中	大	大
流入土砂量	中	小	小	中	大
流況模式図	①	②	③	④	⑤

図-3 取水口付近の流況（模式図）

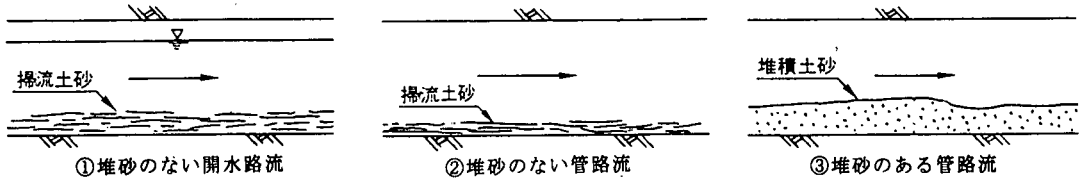


図-4 トンネル内の流況（模式図）

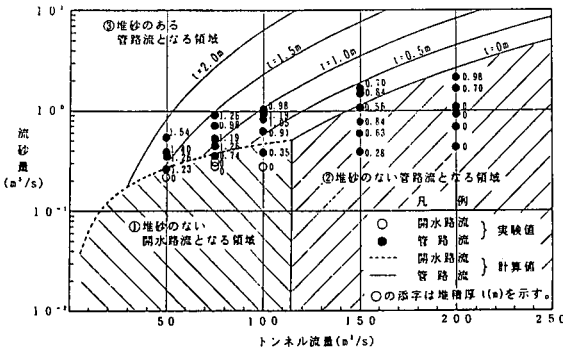


図-5 流量～流砂量～堆砂高の関係（勾配 1/34）

#### 4. バイパストンネル内の非常常土砂水理特性

著者らは以前、後述の模型を用い、実際のハイドログラフを想定した流量、流砂量を与えることにより、トンネルの通水・通砂実験を実施した。この際、取水口部において流量の低減過程で、オリフィス流から開水路流になり、その時にトンネルへの流入土砂量が急増し、トンネル内が開水路流～負圧・正圧を伴う管路流、堆砂を伴う流れ～伴わない流れが、場所的・時間的に混在・遷移する流れになるという現象を観測する<sup>2)</sup>とともに、これはハイドログラフの微妙な形状に起因する土砂の流入速度に影響を受けること<sup>3)</sup>、およびこの現象は、同じ流量、流砂量の条件に対して、堆砂のない開水路流と堆砂のある管路流の2つの状態が存在し、どちらの状態になるかは取水口付近の局所的な条件に支配されることを意味する<sup>5)</sup>、と結論づけている。

そこで、この現象をさらに解明すべく、フルード

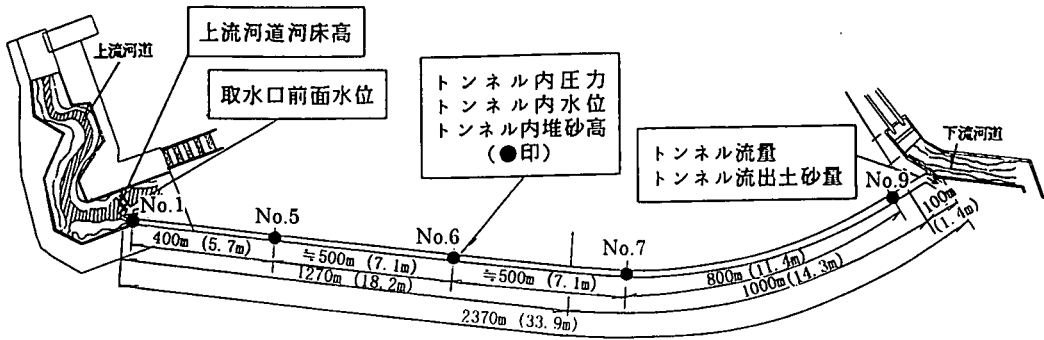
の相似則を基本とする以下の移動床水理模型実験を実施した。

#### (1) 実験方法

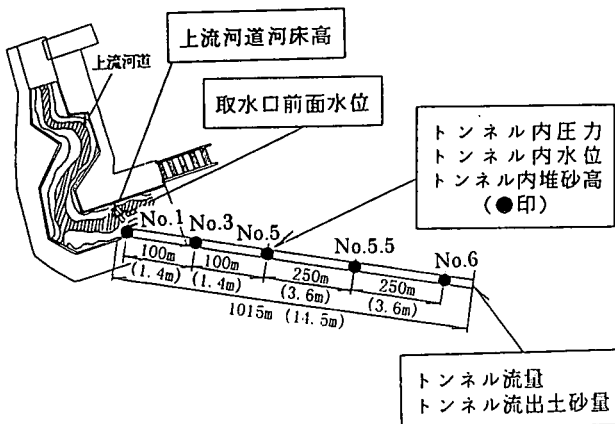
##### a) 模型装置

著者らが計画したバイパストンネルは高さ、幅とも3.8mの梶型断面で全長約2.4km、トンネル勾配約1/34である。トンネル設計流量は120 m<sup>3</sup>/sで、濁水長期化軽減効果とシステムの経済性の最適化から決定されている<sup>4)</sup>。取水口直下流河道には、貯水池のHWLと同じ標高の天端を有した堰を設け、概ね120 m<sup>3</sup>/sまでの河川流量は、全量バイパストンネルへ、これ以上の流量はこれを越えた分を貯水池へ流入させるバイパス優先の分流方式としており、その構造はオリフィス構造としている。

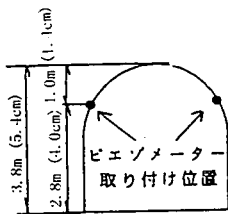
模型の再現範囲は、取水口部を含めた上流河道部約0.7km、バイパストンネル部約2.4km、吐き口部を含めた下流河道部約0.3kmであり、縮尺は無歪みの1/70で、上下流河道はモルタル仕上げ、バイパストンネルはアクリル製である。取水口およびトンネルの各測点にはビデオカメラおよびピエゾメーターを配置することにより、河床高、水位、その他流況を連続観測するとともにトンネル内流量や流出土砂量も計測している。また、ピエゾメーターは各測点に2カ所配置し、この2つを三つ又管で結合して1つのマンメーターに連結することにより、安定した圧力値が得られるよう配慮した。さらにトンネル延長の現象に与える影響を見るべくトンネル延長が全長の1/2の模型も作成した。図-6、表-1に模型装置の概要を示す。



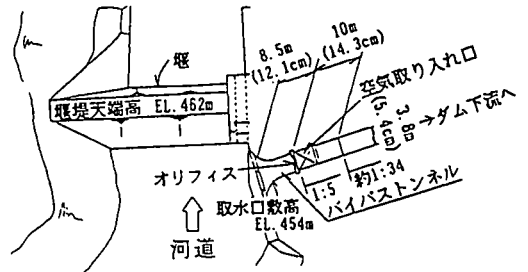
(a) 全長模型



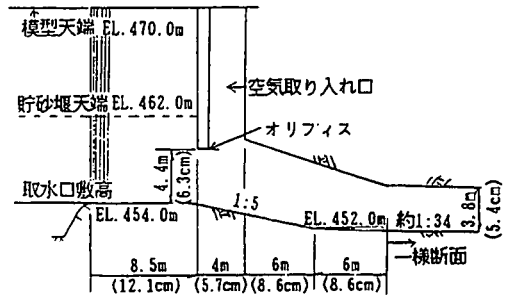
(b) 半長模型



(e) トンネル断面図



(c) 取水口部平面図



(d) 取水口部縦断面図

図-6 模型装置 (数値は原型値 (模型値))

表-1 模型装置と水理量の原型値と模型値

諸元	原型値	模型値
バイパストンネル高さ	3.8 m	5.4 cm
幅	3.8 m	5.4 cm
長	2,370 m	33.9 m
勾配	約1/34	約1/34
上流河道再現範囲	700 m	10 m
下流 "	300 m	4.3 m
既往最大流量	560 m <sup>3</sup> /s	13.7 l/s
トンネル設計水量	120 m <sup>3</sup> /s	2.9 l/s
平均粒径 d	49 mm	0.70 mm
	137 mm	1.95 mm
河道部 $u_c$ (50m <sup>3</sup> /s時)	31cm/s	3.7 cm/s
砂粒Re数(=u <sub>c</sub> d/ν)	1.5 × 10 <sup>4</sup>	約30

### b) 実験方法

実験は移動床実験である。実験砂はおおよそ一様な粒径の砂 (比重 2.65 の粒状大理石) でその粒径は現地対応のもの (平均粒径 0.7 mm) と粒径の現象に与える影響を見るべくより大粒径のもの (平均粒径は 1.95 mm) でこれは移動限界摩擦速度が上記の 2 倍相当) の 2 ケースを設定した。図-7 に粒度分布を示す。

実験は上流河道部を貯砂堰天端から 1/60 の勾配でほぼ満砂状態に整形した後、図-8 に示すような 2 流量で構成されたモデルハイドログラフを通水した。この 2 流量は、現象に与える影響が大きいと

表-2 実験ケース (数値は原型値に換算)

ケース名	土砂粒径 (cm)	トンネル再現長	ハイドログラフ	
			Q <sub>1</sub>	Q <sub>2</sub>
4W-P1	4.9	全長(2,370m)	560 m <sup>3</sup> /s	90 m <sup>3</sup> /s
4W-P2	"	"	180 m <sup>3</sup> /s	90 m <sup>3</sup> /s
4W-P3	"	"	180 m <sup>3</sup> /s	110 m <sup>3</sup> /s
4W-P4	"	"	180 m <sup>3</sup> /s	45 m <sup>3</sup> /s
4W-P5	"	約半(1,050m)	560 m <sup>3</sup> /s	90 m <sup>3</sup> /s
4W-P6	"	"	180 m <sup>3</sup> /s	90 m <sup>3</sup> /s
4W-P7	"	"	180 m <sup>3</sup> /s	110 m <sup>3</sup> /s
4W-P8	"	"	180 m <sup>3</sup> /s	45 m <sup>3</sup> /s
4W-M1	13.7	全長(2,370m)	180 m <sup>3</sup> /s	90 m <sup>3</sup> /s
4W-M2	"	"	180 m <sup>3</sup> /s	45 m <sup>3</sup> /s
4W-M3	"	"	560 m <sup>3</sup> /s	30 m <sup>3</sup> /s
4W-M4	"	約半(1,050m)	180 m <sup>3</sup> /s	90 m <sup>3</sup> /s

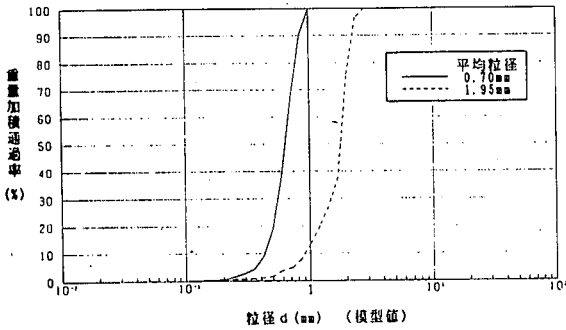


図-7 実験砂粒度分布図

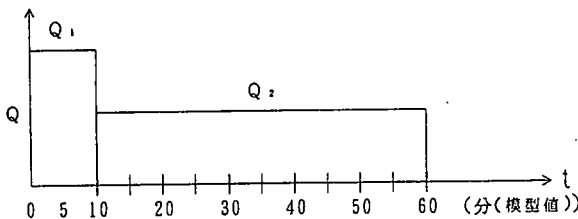


図-8 2流量で構成されたモデルハイドログラフ

考えられるオリフィスが切れる前後の流量, すなわち  $120\text{ m}^3/\text{s}$  をはさむ2流量を選定することにより4ケース設定した. 流量の変化は約1分間(模型値)で行った. 表-2に実験ケース一覧を示す. なお給砂は模型上流端で行い, 量は現地の河床勾配の再現性がよいことを確認した上で佐藤・吉川・芦田の式(土研式)により計算される量の15%増しとした.

## (2) トンネル内の土砂挙動と圧力変動

図-9, 10に, 4W-P2, P4, P6, P8の実験から得られた圧力水頭, 堆砂高, トンネル水位の各測点における経時変化を示す. これらの値は各測点のトンネル敷からの高さで示している. なおこれらの値および時間は原型における現象として理解しやすいよう模型での測定値をフルードの相似則で原型に換算して示している(図中の10mは模型での14.3cm, 1時間は模型での7.2分). これらの図から, 判読されることを列挙すると以下のようである.

### a) 圧力の変動

変化後の流量が  $90\text{ m}^3/\text{s}$  であるケース4W-P2, P6では, 流量変化後土砂が急激にトンネルへ流入することにより通常は開水路で流下するところが満管流となり, 各測点とも流量変化後から圧力水頭が低下しはじめ, 負圧ピーク値を抑えた後, 正圧に転じ, 負圧ピーク値と同程度の絶対値を持つ正圧

ピーク値となり, それが何波か継続するという圧力変動現象がみとれる. その変動周期は4W-P2で約2時間(模型値で約14分), 4W-P6で約1時間(模型値で約7分)と比較的ゆっくりとした変動となっている. これらの圧力変動は流量変化を模型値で約1分で行っていることを考えると, 流量急変に伴う急激な圧力変化とはその周期の長さからみて異なった現象であることが推測される.

一方, 流量変化直後にトンネル全長で開水路となるもののすぐ堆砂が連続して形成される4W-P4, P8では流量変化後に圧力が大きく低下し負圧になるが, その後は小刻みな正圧域での変動となり, P2, P6で見られるような大きな振幅のゆっくりとした周期でかつ大きな負圧を伴うような圧力変動はみられない. 4W-P4, P8で見られる小刻みな圧力変動は堆砂高の小刻みな変動に伴う速度水頭の変動や流量変動に伴う圧力の非定常現象に起因することが推察される.(ただし本論文ではこれ以上言及しない.)

### b) 圧力変動の振幅と測点位置

長い周期の圧力変動が発生する4W-P2, P6のケースでは, 測点によってその振幅が異なる. すなわちトンネル中央部付近で最も大きく, 上下流にいくに従って小さくなる傾向がある.

### c) 圧力変動の周期とトンネル長

4W-P2とP6を比較すれば明らかのようにト

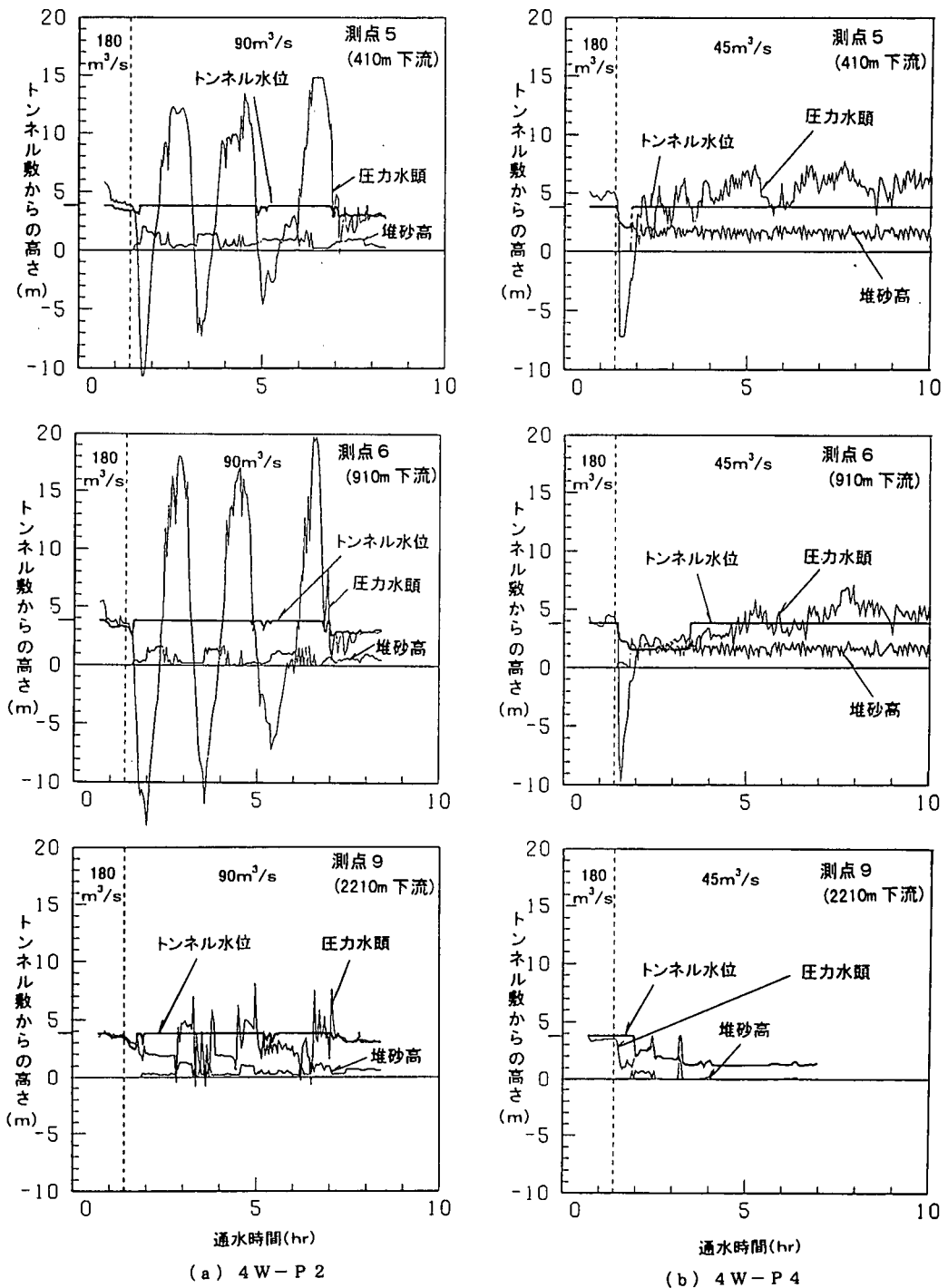


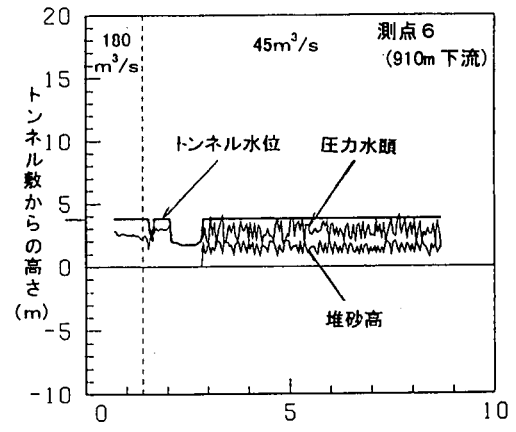
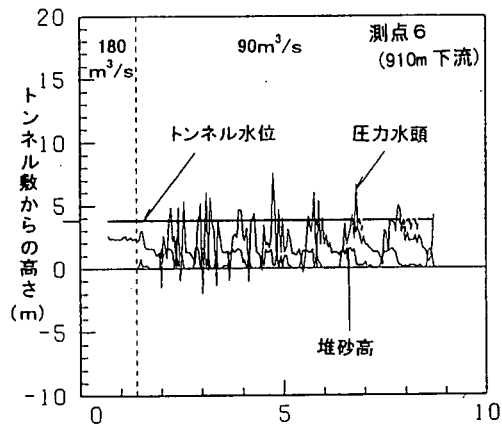
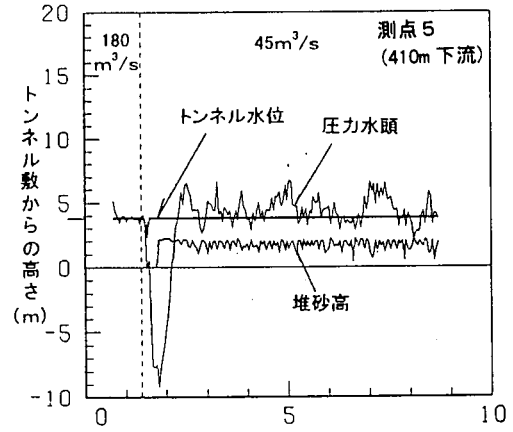
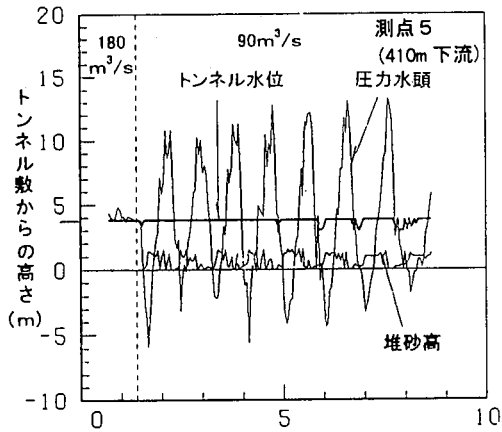
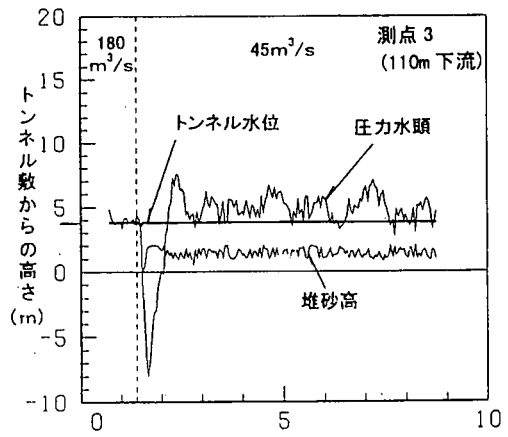
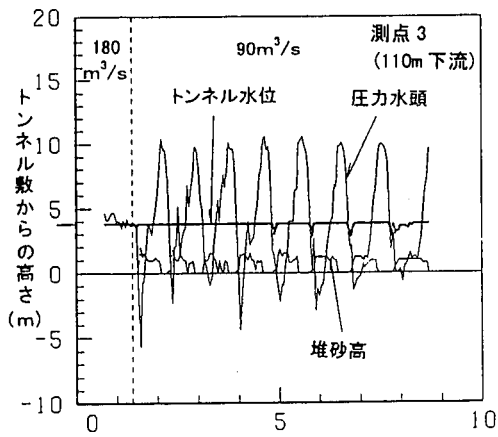
図-9 圧力水頭等経時変化 (全長模型: 4W-P2, P4)

ンネル長が短いほうが圧力変動の周期は短く、トンネル長が全長の場合の4W-P2では周期がおおよそ2時間であるのに対し、半長の場合の4W-P6ではおおよそ半分の1時間程度となっている。すな

わち、圧力変動の周期はトンネル長との関係が大きいことがうかがえる。

d) 圧力変動と堆砂高の関係

圧力変動の波形が明確に出ている4W-P2とP



通水時間(hr)  
(a) 4W-P6

通水時間(hr)  
(b) 4W-P8

図-10 圧力水頭等経時変化 (半長模型: 4W-P6, P8)

6のケースを見ると、その波形は堆砂高と深い関わりがあることがわかる。すなわち、各測点に堆砂層の先端が到達したときに最大負圧となり、堆砂層の終端が通過するときに圧力が最大正圧を示す。これ

はトンネルの長短に拘わらず認められ、また堆砂層の形状が明瞭でない場合には、圧力の波形が乱れる傾向にある。

### (3) トンネル内圧力縦断分布の経時変化

2 流量で構成されたハイドログラフを通水した場合の代表ケースとして4W-P2について圧力水頭および堆砂高の実測値とこれらをもとに通水断面の変化に伴うエネルギー損失を考慮した上で推定した動水勾配線、さらに速度水頭を考慮した上で推定したエネルギー線を経時変化的に図-11に示す。なおこの図において堆砂高はビデオによる観察に基づいているが、堆砂が連続的に存在しているように記載している区間においても必ずしも切れ目なく堆砂しているわけではない。またこの堆砂高には堆砂部の上を掃流状態で流送されている土砂の厚みを含んでいない。

図-11を用いて、圧力変動現象とそのメカニズムを経時変化的に次のとおり説明することができる。(時間A)

まず流量変化する前は、トンネル流量は約 $120 \text{ m}^3/\text{s}$ であり、底層に土砂の移動を伴った管路流または管路流に近い開水路流で、場合によってはそれらが混在した状態ともなるが、堆砂はなく、圧力も負圧となっていない。

(時間B)

このような初期状態から、流量を低減すると取水口前面の水位が下がり、取水口部でオリフィス流から開水路流に遷移し、取水口前面でのデルタの崩れ、掃流力の増大によりトンネル流入土砂量が著しく増加する。そして多量に流れ込んだ土砂は、取水口下流のトンネル内で堆砂する。このときこの堆砂領域より下流では、流量低減期の水面の擾乱、流送土砂量の非定常性が存在するため、開水路と管路が混在した流れとなる。やがて堆砂部の堆積高が大きくなり満管流となる。そのことにより、堆砂領域より下流では上流からの空気の供給がなくなり(水流と逆方向のためか下流からも供給されず)、本来開水路で流れる流量であるにも拘わらず管路流が形成される。

また、堆砂部は流積が小さいため流速が大きく、かつ水路床が砂礫によって構成されるため、エネルギー勾配、動水勾配が約 $1/15$ とトンネル勾配( $1/34$ )より大きくなる。そして堆砂部下流の上流からの空気の供給がなくなった非堆砂領域では、満管流のため流積が大きかつ水路床が砂礫でないためにエネルギー勾配、動水勾配が約 $1/41$ とトンネル勾配より緩くなる。このときトンネル下流端は大気圧であるため、トンネル下流端からの距離に応じて負圧の絶対値が大きくなり、堆砂領域の先端(下流端)で最大負圧となる。

(時間C)

その後も土砂流入が継続して、流量変化時に取水

口下流に形成された堆砂は下流に進行し、流入土砂量の微妙な変化に伴い途中切れ目ができる場合があるものの概ね連続的に堆砂領域が下流に伸延した状態となる。

このとき、堆砂領域より下流の動水勾配は流量と密接な関係にあり、流量と堆砂の進行に対応して最低圧力の値が決まる。また、堆砂のある区間の動水勾配は流量及び堆砂高と相互に関係し合っており、堆砂高が大きくなり動水勾配が大きくなると(流入土砂量があまり変化しなければ)流砂能力が増大して砂堆高が小さくなる関係にあり、これは逆に動水勾配を小さくする方向に働く。さらに、トンネル取水口部のエネルギー高さは、トンネル流量、流砂量、及びトンネル部の抵抗(砂堆高等)と相互に影響しあって決定されるが、この時点では取水口部のエネルギー高さはあまり変化せず、河道部の堆砂勾配が緩くなっているため流入土砂量は減少する。これが堆砂高、動水勾配の低下をもたらすので堆砂区間長の増加の割には取水口部エネルギー高さは上昇しない。このように時間Cにおいては、流量、流砂量、堆砂の形成と動水勾配が相互に関連し合い、取水口部のエネルギー高さがあまり変化しない状態でトンネル出入り口の標高差で約 $70 \text{ m}$ の全エネルギーが縦断変化的に調整され、最もバランスのとれた状態が自動的に見い出される過程にあると考えられる。

(時間D)

しかし、やがて堆砂先端がトンネル中央部付近に至ると、トンネル下流端が大気圧でかつ非堆砂領域、堆砂領域の動水勾配がほぼ一定の状態のため取水口部の水位が上昇し、取水口前面のオリフィス部が開水路流からオリフィス流に変化することにより、取水口前面の掃流力が低下して流入土砂量が減少し、堆砂領域上流に、エネルギー勾配の緩い非堆砂領域が形成される。

(時間E, F)

土砂の流入があった時間に形成された堆砂領域は、終端(上流端)の土粒子が先端(下流端)に移動する形でほぼその長さを維持しつつ全体に下流に進行していく。このとき堆砂領域のエネルギー勾配、その上下流の非堆砂領域のエネルギー勾配は各々トンネル勾配より急、緩の状態ではほぼ一定であるため概ね堆砂領域の先端が最も圧力が小さく、終端が最も圧力が大きくなる。ただし圧力の最小値(負圧の最大値)は、堆砂領域の流下とともに大気圧に近づく形で減少し、一方、堆砂上流端の圧力の最大値は増加する。

(時間G, H)

その後、堆砂領域がトンネル下流端に達すると、



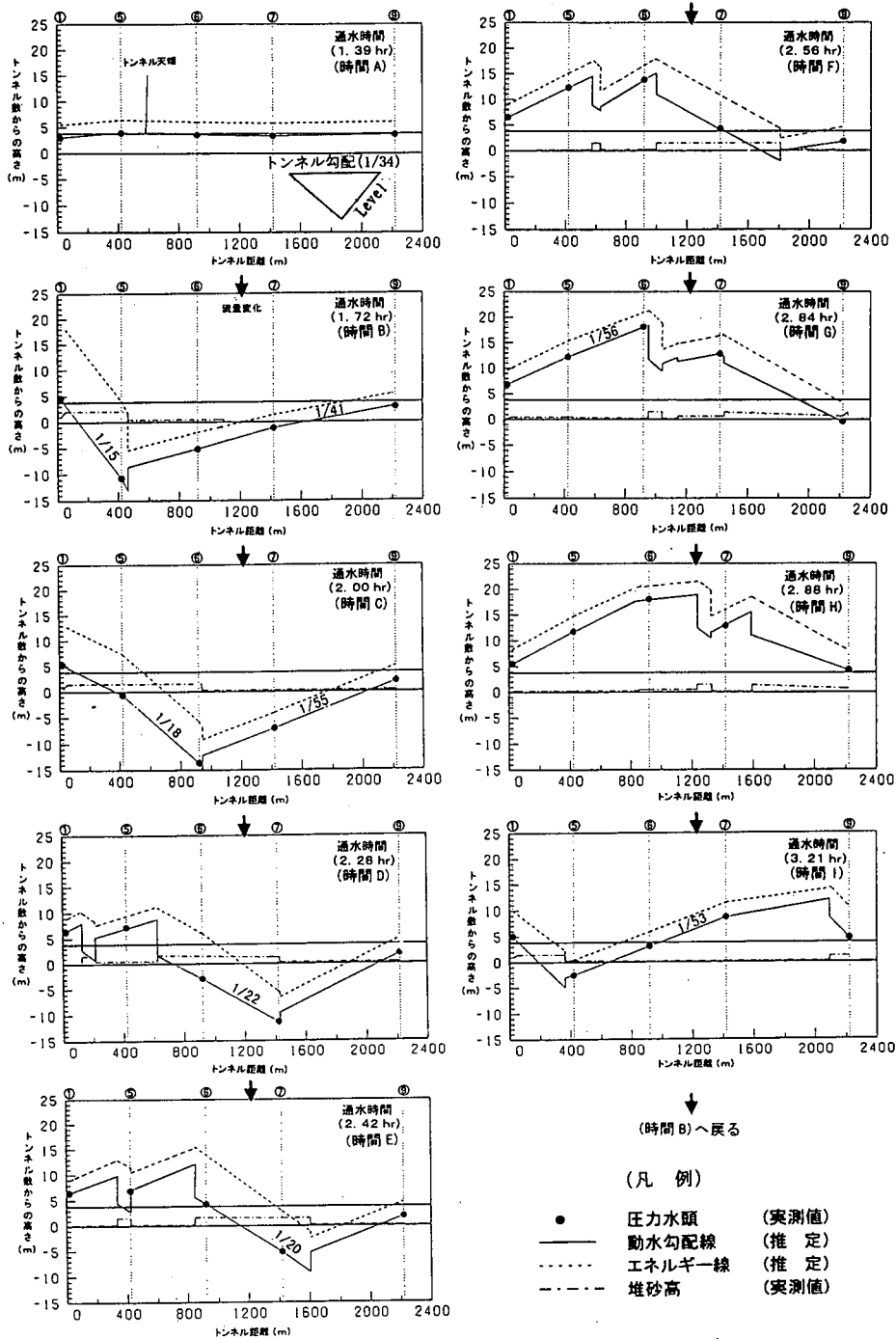


図-11 トンネル内圧力水頭、堆砂高等縦断分布 (4W-P2)

土砂がトンネル下流端から排出され、堆砂領域長が短くなる。

(時間 I)

しかしそのような状態になると、堆砂領域より上流の非堆砂領域のエネルギー勾配はトンネル勾配よ

り緩い状態でほぼ一定のため、取水口部前面の水位が低下し、再びオリフィス部はオリフィス流から開水路流に遷移する。このことにより、オリフィス流となっていた状態のときに取水口部前面に貯まった土砂が、掃流力の増加によりトンネル内に再び流入

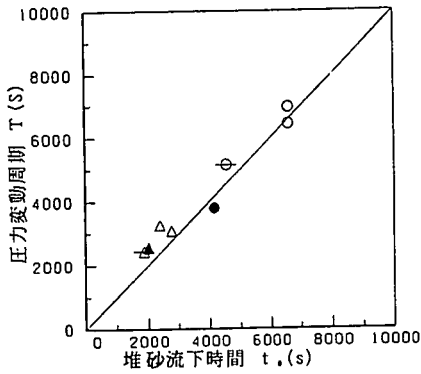


図-12 圧力変動周期と堆砂流下時間

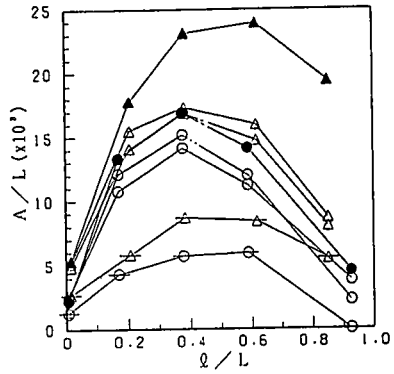


図-14 圧力変動の振幅と測点位置

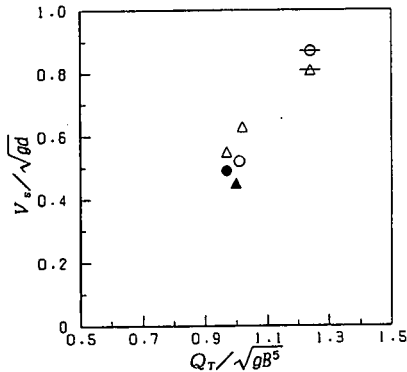


図-13 堆砂進行速度とトンネル流量

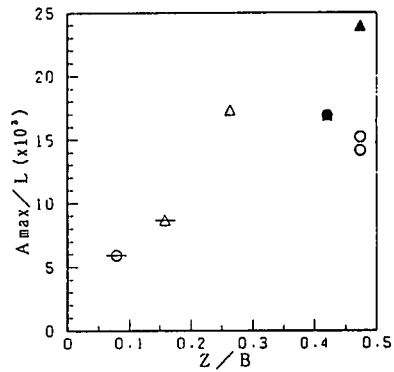


図-15 圧力変動の振幅と初期河床高

表-3 図-12～15の凡例

記号	ケース名	トンネル長	粒径 (mm)	流量	
				m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /s
○	4W-P1	全長	49	560	90
	4W-P2			180	90
⊖	4W-P3	全長	49	180	110
				4W-P5	560
△	4W-P6	1/2	49	560	90
				4W-P7	180
●	4W-M1	全長	137	180	90
				4W-M4	180

し始め、トンネル内で堆砂が再び形成され、堆砂領域の先端付近に最大負圧が発生する。

これらの現象は、管路流において堆砂領域と非堆砂領域のエネルギー勾配が異なり、これがトンネル上下流端のエネルギー高さがほとんど変化しないこととあまって、エネルギー線の不均衡をトンネルの長さの範囲内で收拾させている現象ともいえる。

このような解釈によって上述の(2)で述べた圧力変動に説明を与えることができ、圧力の変動は堆砂領域の動きに支配されていると考えられる。

#### (4) トンネル内土砂挙動と圧力変動特性

圧力変動は流入土砂量の増大による堆砂の形成とその進行によるものであることを述べた。

ここでは、負圧を伴う比較的ゆっくりとした周期の圧力変動が認められた4W-P1, P2, P3, P5, P6, P7と4W-M1, M4の結果を用いて、土砂挙動と圧力変動現象を整理する。

##### a) 圧力変動の周期Tと堆砂流下時間t\_sの関係

図-12は、圧力変動の平均周期Tと、取水口下流で形成された堆砂領域がトンネル下流端に至るま

での時間t\_s(これを堆砂流下時間と呼ぶものとする)を比較したものである。

明らかに両者は合致し、圧力変動現象が堆砂領域の移動に支配されていることがわかる。すなわち、圧力変動の周期は、堆砂流下時間と合致し、堆砂流下時間はトンネル長が与えられれば堆砂の進行速度で除することにより算定されるので、結局、圧力変動周期は堆砂の進行速度に規定されている。

##### b) 堆砂進行速度V\_sとトンネル流量Q\_Tの関係

図-13には、粒径dで無次元化した堆砂領域の進行速度V\_sとトンネル幅Bで無次元化した流量Q\_Tの関係を示している。この図より次のことが示唆される。まず、 $Q_T / \sqrt{gB^5}$ が決まると $V_s / \sqrt{gd}$ はほぼ同様の値を示す。すなわち、トンネル流量が一定条件の下では堆砂領域の進行速度と粒径は正の相関(堆

砂進行速度は粒径の2乗根に比例)の傾向にある。次に $Q_T/\sqrt{gB^3}$ と $V_s/\sqrt{gd}$ も正の相関の傾向があり、粒径が同一の条件では流量の増大に伴い堆砂領域の進行速度も比例的に増大することが分かる。

### c) 圧力変動の振幅Aと測点位置 $l$ の関係

図-14は、トンネル長 $L$ で無次元化した圧力の時間変動の振幅Aと、同じくトンネル長 $L$ で無次元化した取水口から測点までの距離 $l$ の関係を示している。図より、トンネル長、土砂粒径が変化してもおおよそトンネル中央部で振幅が大きく、トンネル上下流にいくに従って小さくなることを示している。これは、トンネル中央部付近に堆砂領域の先端がさしかかった時に最大の負圧が発生し、その後同付近に堆砂領域の後端がさしかかった時に最大の正圧が発生するという図-9、10、11でみられる知見と符合するものと考えられる。

### d) 圧力変動の振幅 $A_{max}$ と初期堆砂高 $Z$ の関係

図-15は、トンネル長 $L$ で無次元化した圧力変動の最大振幅 $A_{max}$ とトンネル幅 $B$ で無次元化した初期堆砂高 $Z$ との関係を示している。ここで初期堆砂高とはトンネル内への土砂流入の後、流況の局所的な乱れが収まり、目視で堆砂が形成されたと判断された時のその高さである。図より変化後の流量が $90\text{ m}^3/\text{s}$ のグループ(4W-P1, P2, P5, P6, M1, M4)が $110\text{ m}^3/\text{s}$ のグループ(4W-P3, P7)より初期堆砂高さが大きいこと、また、初期堆砂高さが大きいほど振幅も大きくなる傾向がみとれる。このように初期堆砂高さと振幅が正の相関を有す傾向にあることは、前述の(3)における(時間B, C)の記述とも符合するものである。

## 5. 上流河道～トンネル内を対象とした河床変動数値シミュレーションモデル

著者らは以前、バイパス上流河道部河床変動モデルおよびトンネル内土砂輸送能力モデルの検討を行い、実験結果を検証データとしてモデルを構築した<sup>5)</sup>。今回は、この2つのモデルを結合し上流河道部からバイパストンネル内までの河床変動計算を扱う一体モデルの構築を図る試みを行う。なお、今回取り扱う現象は流量変化に起因する管路内圧力変動現象ではあるが、上述のとおり、圧力変動の周期は比較的ゆっくりとしていること、流量変化そのものは土砂の急激な流入を惹起するといういわば間接的な原因と考えられること、圧力変動は管路内堆砂の進行と密接に関係していることから移動床の通常の検討と同様、不等流計算を時々刻々行うこととする。

## (1) モデルの構築

河道部とトンネル部のそれぞれの河床変動モデルについてその概要を示すと以下のとおりである。

### a) 河道部河床変動モデル

上流河道では河川流量が増加し、取水口部が開水路流からオリフィス流となることにより貯砂堰および取水口部が堰上げられ、これにより貯砂堰上流まで河川の堆砂が進行し、流量低減時に取水口部が再び開水路流となるとデルタが崩壊し多量の土砂が流下する。また河床低下時には滞筋が取水口の位置(右岸側)に支配され、このため滞筋が固定された形で河床低下がみられる。この現象を次のようにモデル化した。

#### ① 掃流砂量式

掃流砂量式として土研式、芦田・道上式、芦田・高橋・水山の式を用いて適用性の検討を行ったところ、河川の粗度係数を $n=0.03(\text{m}^{-1/3}\cdot\text{s})$ とした土研式の適用性が最も高く、堆積、侵食ともほぼ実験結果を再現することができた。

#### ② 河床変動モデル

侵食時に滞筋が固定される現象がみられたため、河道を横断方向に分割し、実験で得られた流量と水面幅の関係をj用いて滞筋を設定し、その滞筋を固定させて河床変動を模擬するモデルを構築した。

#### ③ 下流端水位

下流端水位はバイパス取水口部の影響を受けており、実験で得られた河川流量～トンネル流量～取水口部水位の関係をモデル化して与えた。

### b) トンネル部河床変動モデル

トンネル流量～流砂量～トンネル内堆積高の関係(図-5参照)を検証データとして、以下のモデルを構築した。

#### ① 開水路時

開水路時の水理量の算定には、マンニングの等流公式を適用し、流砂の有無によらず実験で得られた流砂を伴う開水路時の粗度係数を用いることとした。

#### ② 管路時

トンネル内水位がトンネル内堆砂によりトンネル天端以上となる場合には管路流として水理量を計算した。管路流における水理量については芦田・江頭らの管内の抵抗を壁面部と底面部の摩擦に分割して考えるモデル<sup>11)</sup>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ることとした。

#### ③ 掃流砂量式

実験結果に近い結果が得られることを確認した上で土研式を採用した。

### c) 一体モデル

上流河道部とバイパストンネル部との接合部につ

いては、以下のように連続させた。

①オリフィス部開水路時

オリフィス部が開水路流となる場合には全流量がトンネルに流下する。上流河道部は堆砂状況次第で常流あるいは射流となり、一方トンネル内はその勾配から射流となる。そこで、上流河道部が常流となる場合にはオリフィス地点で限界水深を与え不等流計算を行い、また上流河道部が射流となる場合には上流河道部、トンネル部とも等流水深を与えることとした。

②完全オリフィス時

取水口部のオリフィスが完全オリフィス状態の場合には、トンネル流入量と貯砂堰越流量の流量配分を取水口上流水位が等しくなるように計算しトンネル流量を算定した。またオリフィス上端を支配断面としてトンネル内水位を計算した。

③もぐりオリフィス時

トンネル内堆砂によりオリフィス下流側水位がオリフィスの上端を越える場合には、もぐりオリフィスとして流量配分を算定することとし、②と同様試算的にトンネル流量を求めた。

なお、流量配分比と流砂量配分比の関係は別途1/30の縮尺で実施した実験から得られた図-16に示す結果が川合・芦田<sup>1,2)</sup>の提案式(1)で得られる結果と概ね合致していることを確認した上で、

$$\kappa g = 1.5 \kappa \quad (1)$$

ここに、 $\kappa g$  : 流砂量のバイパスへの配分比  
 $\kappa$  : 流量のバイパスへの配分比  
 の関係を用いる。

(2) 実験再現シミュレーション

上記モデルを用い、2種類の流量で構成されたハイドログラフにおける実験現象の再現を試みた。すなわち、実験スケールの諸元で条件設定および計算を行い、実験値と計算値とを比較した。ただし、両者の比較においては、実験縮尺1/70に対するフルード則による換算縮率関係を用い、表示は原型値スケールで行っている。

対象としたケースは、圧力変動現象が顕著であった4W-P2である。

a) 計算条件

初期河床高は、実験と同様に取水部がEL.462mで、そこから上流は1/60の河床勾配の満砂状態とした。

またトンネル部の計算においては、堆砂していることによりエネルギー勾配が急勾配で算定され、その先端が負圧となり、そこから下流が緩勾配のエネルギー勾配となるが、その部分において負圧となる

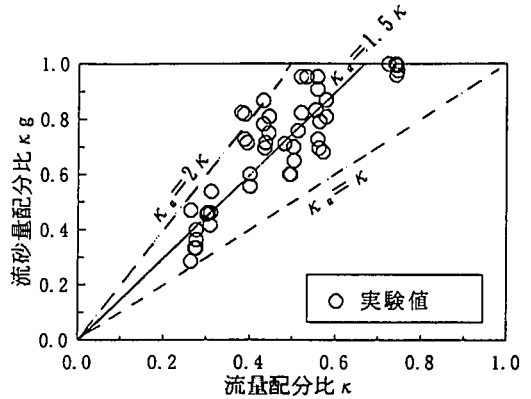


図-16 流量配分比と流砂量配分比

表-4 計算条件

項目	内容
対象範囲	上流河道部 取水口より約400m 31断面 バイパストンネル部 約2370m 61断面 計92断面
使用流砂量則	上流河道部、トンネル部とも土研式
初期河床	河床勾配1/60の満砂状態
流量時系列	180m <sup>3</sup> /s : 約1時間24分(計算値10分) 90m <sup>3</sup> /s : 約6時間58分(計算値50分)
下流端水位	トンネル下流端等流水深もしくは満管水位
マニングの粗度係数	河道部 n=0.030(計算値 n=0.015) トンネル部 壁面n <sub>w</sub> =0.018、河床面n <sub>b</sub> =0.030 (計算値 n <sub>w</sub> =0.0085、n <sub>b</sub> =0.015)
粒径	49mm(計算値0.7mm)の単一粒径
上流端給砂量	実験供給量
空隙率	λ=0.40
砂礫の比重	σ=2.65
水路幅	模型による実験則 B(m)=7√Q(m <sup>3</sup> /s)

場合は、本来開水路流となる流量(水だけの定常流では90m<sup>3</sup>/sという流量は開水路流である)でも圧力が大気圧に回復しないかぎり管路流の計算を行うこととした。計算条件を表-4に示す。なお、計算は模型レベルに対して行ったが、この表の数値はフルードの相似則により原型値に換算して示している。

b) 計算結果

圧力水頭の計算値と実験値をトンネル内各点における経時変化として図-17に、縦断分布として図-18に示す(図中の数値は原型値に換算)。

各点の経時変化を示す図-17をみると、圧力変動の周期が計算値の方が長く、最大圧力(正圧)が小さめに算定されているとともに、2波目以降のずれが大きい。また、実験では図-9に示すように高さに不規則な変動を伴った堆砂が断絶的に形成されてその間隔をほぼ同じに保ちながら活動的に下流へ伝わるが、計算ではこの点が再現できていない。このように計算値は必ずしも実験値とは合致していな

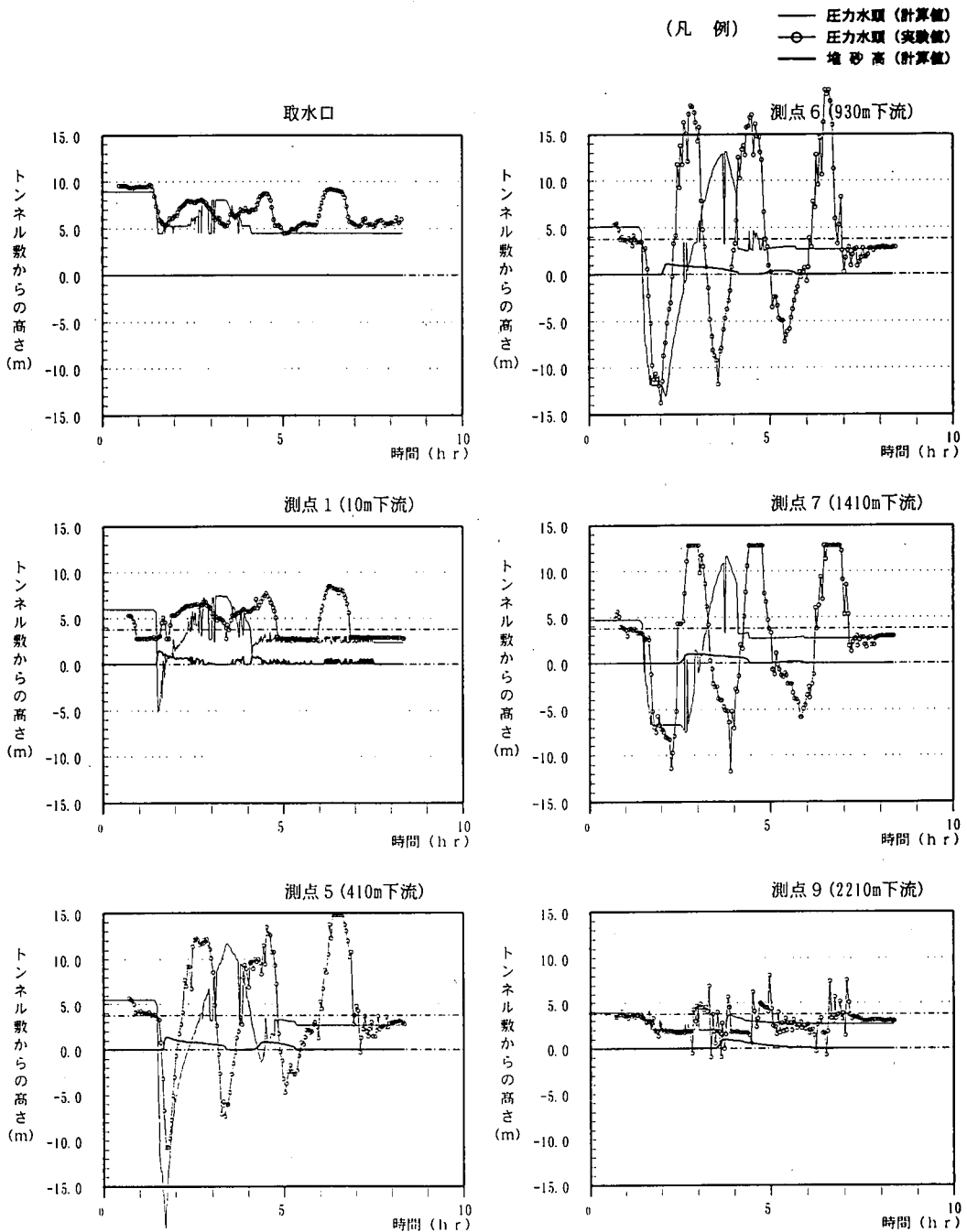


図-17 圧力水頭等経時変化

いが、流量変化後の最初の大きな負圧発生現象は比較的よく再現できているといえる。

また、圧力水頭の縦断分布を示す図-18は、図-17において示されるように負圧のピーク発生の時刻に実験と計算ではずれが認められるため（特に

2波目）、実験の時刻（図中T<sub>m</sub>）と計算の時刻（図中T<sub>cal</sub>）を若干ずらして表示しているものの、1波目の圧力変動が生じ、それが下流に伝播する様子が比較的良好に再現出来ていると考えられる。

(凡例) — 圧力水頭 (計算値)  
 ○ 圧力水頭 (実数値)  
 — 堆砂高 (計算値)

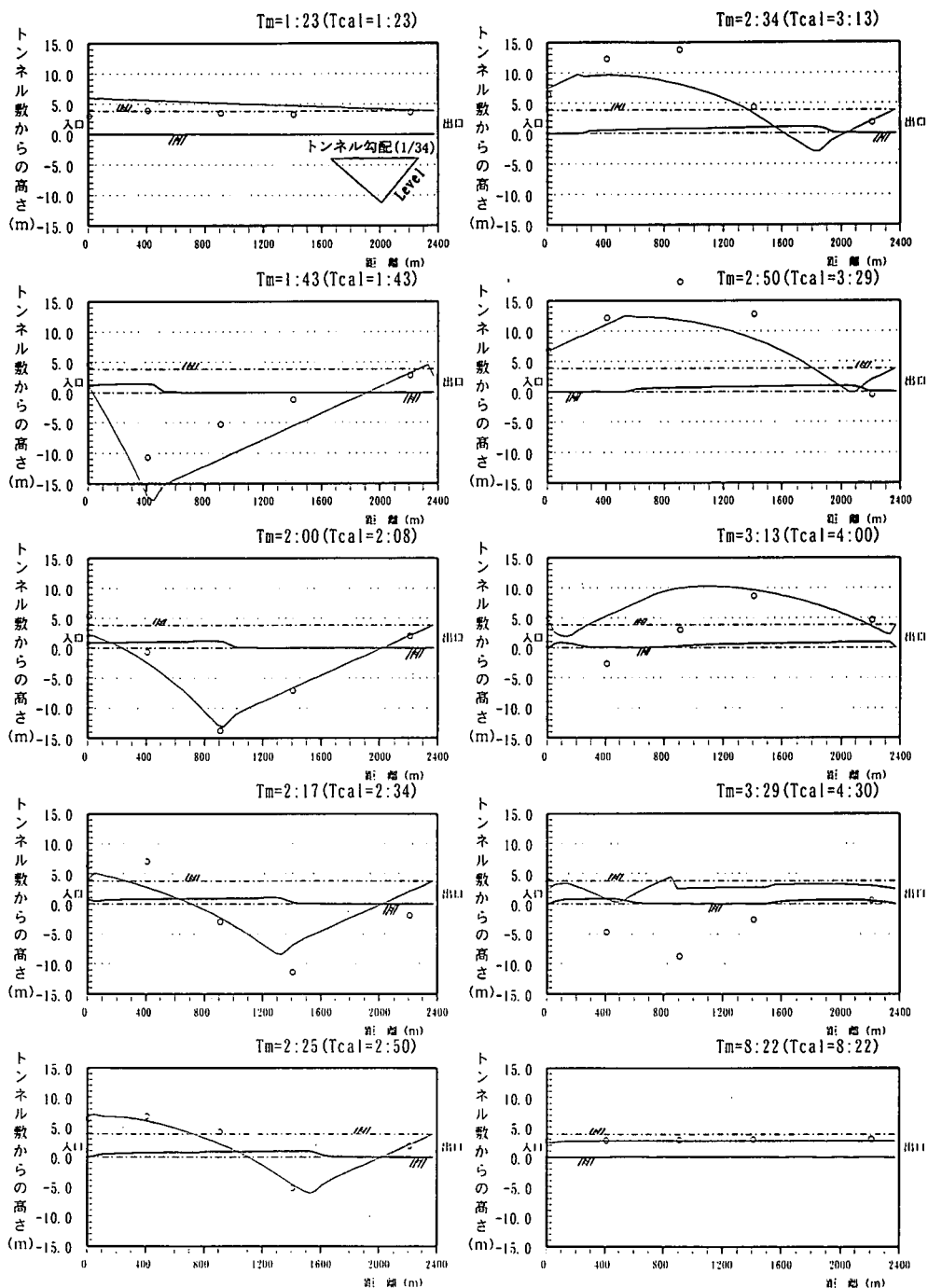


図-18 トンネル内圧力水頭等縦断分布

以上のように、トンネル内の堆砂の形成、進行および堆砂高の変動と圧力変動特性とは密接な関係にあり、トンネル内の河床変動の再現性、特に管路内

に発生した堆砂が形や高さを維持しながら進行する現象の再現性を向上させることがさらに良好な再現の鍵となると考えられる。

このように計算において圧力変動の周期等改善の余地はあるが、圧力変動のメカニズムは説明できる結果となっており、実験で観測された圧力変動は、土砂の急激な流入による堆砂の発生および進行によって引き起こされるもの、すなわち堆砂の有無による動水勾配の差異によるものであると言える。

### c) モデルの適用性

2種類の流量で構成されたモデルハイドログラフの実験結果を模型スケールで再現する計算を行って、モデルの適用性の検討を行った。その結果、圧力値の2波目以降については発生時刻のずれがあるなど再現性は良くないものの、流量変化直後の最初の大きな負圧発生現象はよく再現できている。2波目以降の再現性が悪い点については、その原因は詳細には不明であるが、一因として、トンネル内への流入土砂量は実際にはばらつきがあるが、モデルではこれを再現できていないことや、あるいは取水口前面水位に与える影響が大きいトンネル内抵抗の表現方法に課題があることが推察される。この点を含め細部の再現性については一部課題を残すものの、土砂の急激な流入に起因して発生する最大負圧レベルをほぼ定量的に再現できている点で、このモデルの適用性は評価できるものと考えられる。

## 6. 結 語

本研究では、上流河道から流送されてくる掃流砂をダム貯水池を経ずにダム下流河道へ導くバイパスシステムについて、その全体を表現した模型により、まず実験的に土砂水理現象とその特性を把握することに努めた。次いで、上流河道部とトンネル部をそれぞれ対象とした河床変動モデルを取水口部で結合することにより土砂流送システム全体を模擬するシミュレーションモデルの構築を行い実験で見いだされた現象の再現を試みた。

得られた結果をとりまとめると次のとおりとなる。

- (1) バイパスシステム全体、すなわち、上流河道～バイパストンネル～下流河道部を表現した模型を用いて非定常流時のトンネル内土砂水理特性を調べた。その結果、河川流量が急変的に低減し、これにより土砂が急激にトンネル内に流入した場合、負圧を伴う大きな圧力変動が比較的ゆっくりした周期でトンネル内に発生する可能性があることを示した。
- (2) さらに、流量を急減させ、土砂を急激に流入させる実験を種々実施することによりこの現象を詳細に解明した結果、圧力変動自体は、流量の変化や局所的な流速の変化に直接的に起因するものでなく、取水口下流付近での急激な土砂流入によりトンネル

内で堆砂が発生し、これに伴い管路流が惹起され、この堆砂が系全体（トンネル両端）のエネルギー損失（差）一定という制約内で空間的なエネルギー配分を行いながら、いわば系全体の圧力バランスをとるかのよう進行していくことに支配されることを示した。

(3) 最後に上流河道からトンネル内までを対象としたシミュレーションモデルについて、このモデルの適用性を実験結果の再現性において述べた。その結果、既存の移動床抵抗則、掃流砂量式および河床変動式等を適切に組み合わせ構築したシミュレーションモデルは圧力変動の周期性の再現等に一部課題を残すものの、これにより、概ね実験における圧力現象を再現することができた。この意味で、実験で確認された圧力変動は、堆砂部と非堆砂部とのエネルギー勾配の差異と堆砂進行による管路流特有のエネルギー水頭の空間的配分に起因することを検証することができたといえる。

なお、今後の課題として、トンネル内の堆砂の進行と圧力の周期的変動をより忠実に表現出来るモデルへの改良や本システムを普遍的に適用する場合の問題、例えばトンネル径をより縮小させた場合の閉塞限界等を含めた土砂水理特性のさらなる解明が挙げられる。

**謝辞：**本研究の実施に当っては、京都大学名誉教授 芦田和男先生、京都大学教授高橋保先生、立命館大学教授江頭進治先生のご指導を得ている。また、実験や解析の実施については（財）河川環境管理財団大阪研究所、（株）ニュージェックの協力を得ている。これら各位に深く謝意を表する次第であります。

### 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) 原田稔, 出野尚, 芦田和男: 湛水池に流入する濁水・土砂の排出方法に関する一方策, 土木学会関西支部年次学術講演会, 概要集, 1995.
- 3) 斉藤憲, 大本雄二, 原田稔, 芦田和男, 戸田圭一: 貯水池のバイパストンネル排砂に関する実験的研究, 土木学会第50回年次学術講演会概要集, 2-A, pp.422~423, 1995.
- 4) 原田稔, 寺田昌史, 出野尚, 葛岡昌基: 貯水池のバイパス排砂システムによる濁水長期化軽減効果の検討, 水工学論文集, 第40巻, pp.613~618, 1996.2.
- 5) 原田稔, 芦田和男, 出野尚, 大本雄二: 貯水池のバイパストンネル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, 第40巻, pp. 813~818, 1996. 2.
- 6) Kokubo, T., Itakura, M. and Harada, M. : Predicting methods and actual result on flushing of accumulated deposits from Dasidaira Reservoir, ICOLD 19th, Q. 74, 1997.
- 7) 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的検討, ダム技術, NO. 108, pp. 24~34, 1995.
- 8) Durand, R. : Proc. 5th Cong. IAHR (Minneapolis), pp. 89~103, 1953.
- 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) 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, 第40巻, pp. 831~836, 1996. 2.
- 11) 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, 京大防災研年報, 第31号, B-2, pp. 489~506, 1988.
- 12) 川合茂, 芦田和男 : 固定床開水路分流における流量, 流砂量配分比に関する実験的研究, 土木学会論文集, 第405号, II-11, pp. 139~146, 1989. 5.

(1997. 7. 24受付)

## HYDRAULIC PROPERTIES OF SEDIMENT TRANSPORT IN THE TUNNEL OF SEDIMENT-BYPASS SYSTEM OF A RESERVOIR

Minoru HARADA, Tetsuya KOKUBO and Takashi DENO

When a bypass tunnel is practically applied to a reservoir for the purpose of transporting bed load past the reservoir, the verification of its hydraulic stability must be considered. In this paper, by an experimental investigation a phenomenon is observed in a tunnel that great pressure variations with suction are periodically occur in the case of highly unsteady situation such as an abrupt change of sediment discharge. Moreover, by the use of a numerical simulation method, it is found that the phenomenon is due not to the variation of flow discharge nor local flow velocity but to the occurrence of deposited layers and the phase change from open channel flow to pipe flow, as well as to the progress of deposited layers with the spatial re-distribution of the total energy head between the inlet and outlet of the system.