

## シールド工法と長大海底トンネル(2)

Shield Tunnelling and its Application  
to Longer Undersea Tunnels, No.2

田中 壬子也\*

### 8. シールドトンネルの構造的な特殊性

シールドトンネルの施工では、シールドのテール内で既に完成されているリングに沿ってセグメントピースを組み立て、最後にキーセグメントを挿入してリングを構成させ、次の掘進にかかる。初めてそのセグメントリングは地山に接し土圧を受けて、軸力とモーメントを発生するようになる。こうして構成された1次覆工トンネルは、それ自身で完成された永久構造物として供用され、時に2次覆工コンクリートを打設して使用されることもあるが、原則的には1次覆工それ自身でトンネル構造物としての耐荷重性・防水性・耐震性を具備することが必要かつ不可欠の条件と考えられてきた。

耐荷重性については、地山荷重がセグメントに作用すると、洪積世あるいはそれ以前の安定した地山では、掘進に伴って地山中にグランドアーチが形成され、土被りの1部がゆるみ荷重として作用することから荷重の軽減をはかることができる。しかし、沖積世あるいは軟弱地山の場合では、全土被り荷重 $\gamma h$ が作用した水圧荷重も全部作用すると考えられ、土圧の水平分については弾性的あるいは塑性的なその地山の性状に応じて算定されるのに対し、水圧は方向性のない点に特徴を

\* 日本シールドエンジニアリング(株)常務取締役

もっている。このように土水圧の作用割合の決定には不鮮明な点があるが、実質的な計算作業では分離、あるいは不分離式によることで現場の実情に合致させている。むしろ問題は継手の存在のために単体の曲げ剛性(EI)の低下( $\eta$ )を考えて、剛性一様( $\eta EI$ )なリングを考えて変形を求め、抵抗土圧を決め、一方セグメント継手もヒンジ性を示すので、モーメントの一部が千鳥組した隣接セグメントを通じて伝達されるため、計算された曲げモーメントより実質的に割増( $\zeta$ )を考えねばならない結果となっている。 $\eta$ と $\zeta$ とはセグメントの種類、継手構造、千鳥組の方法などにより異なった値を示すので、専ら実験的に決めている。通常、 $0.6 < \eta < 0.8$ ,  $0.4 < \zeta < 0.2$ を示している。

この他にセグメントが実質的に多ヒンジ構造であることから、そのピース間継手を回転バネで置き換えたり、リング間の変位をせん断バネで等価させ解析する方法が提唱され、詳細な検討に利用されるようになった。<sup>17)</sup>

このようにセグメントは限られたテール内腔で組み立てる必要から、このような分割生産を余儀なくされ、組み立てられてはじめて完成構造物となるので、セグメントの製作過程での製品精度と施工過程での組み立て精度の双方の成果によって、最終的なトンネル構造物の品質が決定される。したがって、長大海底トンネルの高土水圧に使用されるセグメントについては、その構造設計の内

容はもちろんのことセグメントの製作精度の向上が必要となり、また施工精度を高めることにより、はじめて目的通りの構造躯体を完成させることになる。

以下これらにかかわる諸問題について検討を進めよう。

### 8.1 シールド・トンネルの実績から得られたセグメントの寸法精度

シールドトンネルの2次覆工を施すことにより、セグメントの組み立て面は見ることができないようになり、漏水していたところも2次巻によって止水されてしまうため、1次覆工の寸法精度を調べるには、2次巻を施していないトンネルに限定して調査する必要がある。筆者が属する会社の社内調査資料<sup>18)</sup>によれば、次のような興味深い結果が得られている(昭和58年現在)。調査件数327件中、117件において平均目開き量が0.2mm以上を示し、最大の平均目開き量7.5mm、平均目開き量の平均値は1.79mmで0~1mmの間の平均目開き件数は53件であった。したがって学会標準仕方書に基づく目開き量の限界値1mm以上に抵触すると思われる件数は、327件中64件(117-53)で19.5%に相当する。この統計はまた同時に目開き発生箇所の統計を行っているが、それによると80%が曲線部で発生していると報告されている。したがって上記の目開き量1mm以上を発生しているものも大部分が曲線部で生起しているであろうと推量される。因にトンネル資料の平均径は3.5mである。

したがってこのような目開きを発生する原因が全てセグメント幅に問題ありとすることはできないが、テーパセグメントには特に注目の必要を認めるとともに、標準セグメントについても、そのシフト幅の精度を中心として検査する方法の確立が望まれる。

## 9. セグメントの素材・品質・精度等について

セグメントは大別して鋼製・ダククイル製・RC製やこれらを組み合わせたコンポジット型等が使用されている。それらは各々使用される原材料についての規格に基づいて材料試験を実施し、外観寸法検査、構造強度試験を行うが、RCにつ

いては型枠生産によっているので、型枠の寸法精度が製品の品質を決める基礎となる。

しかしながら、これらの各種セグメントもこれを高土水圧の環境下で使用するとすると、基礎的な材質についての問題に逢着せざるを得ない。たとえば鋼材については、透水実験から実質的に $k_w=0$ で問題はないが、溶接構造として使用されれば溶接部の瑕疵についての対策が必要であり、ダククイルの場合では、いわゆる「鬆」の存在を否定することはできない。従来もこれに対しては高温タール浸漬によって充填したり、機械仕上げ面に現われた場合には、紅明丹塗装によって解決してきた。<sup>19)</sup> 今日では優れた塗装材一たとえばタールエポキシ等によって代わられているが、いずれものケースで使用圧力の上昇に伴って、簡単にOKと言いきれない素因があり、塗料の塗り上り強度についても格段の上昇を余儀なくされている。殊にRCの場合、コンクリートの透水性の悪い例の数字として $k_w=1 \times 10^{-7} \text{ cm/s} \cdot \text{cm}^3/\text{g}$ 、 $20^\circ\text{C}$ 程度とされているが、この程度の透水性でも広い面積に大きい圧力が作用するときは、 $P=30\text{kg}/\text{cm}^2$ 、セグメントの厚さ50cmで径10mのトンネル50kmからの湧水量を求めると

$$\begin{aligned} Q &= k_w \frac{dp}{dx} \cdot A \\ &= 1 \times 10^{-7} \frac{\text{cm}}{\text{s}} \frac{\text{cm}^3}{\text{gr}} \cdot \frac{30\text{kg}/\text{cm}^2}{50\text{cm}} \times 50\text{km} \times 31.42\text{m} \\ &= 942.6 \text{ l t/s} = 56.5 \text{ m}^3/\text{min}. \end{aligned}$$

とトンネル内湧出水量としては無視できない数量で、丹那トンネルの出水量毎分75トンの約80%に相当する。もちろん全水圧がセグメントの外側に全延長に亘って作用するという仮定も不自然な仮定であるが、セグメント躯体のコンクリートの不透水性を保持するための努力は欠かすことはできない。すなわち、 $k=10^{-7} \text{ cm/s}$ 程度のコンクリートではまだ不十分と考えねばならない。型枠で生産されるセグメントは、型枠の組み付け面等からのセメントミルクの漏出があるとこのような結果を招くので、型枠にセメントミルク漏洩防止策を考える必要があるように感じる。

外観寸法検査の方法については、その大きさが通常の製品と比較して非常に大きいこと、全てのピースを組み付けて初めて構造物となることなどから、個々のピースの検査方法にはいわゆるテン

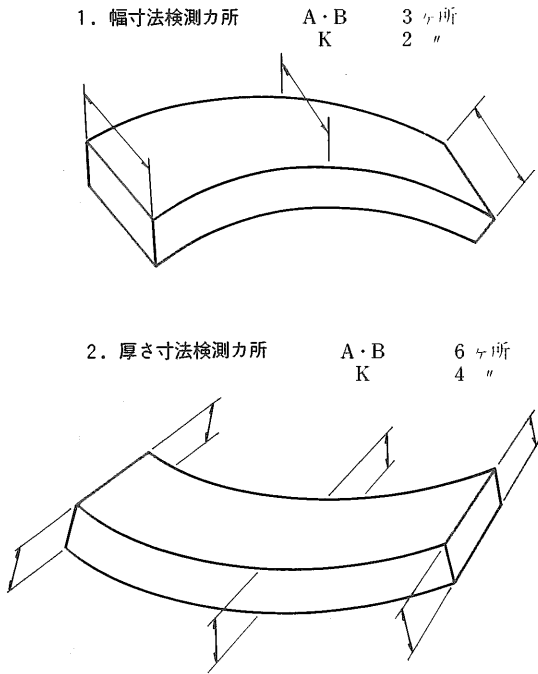


図9.1 外観寸法検査

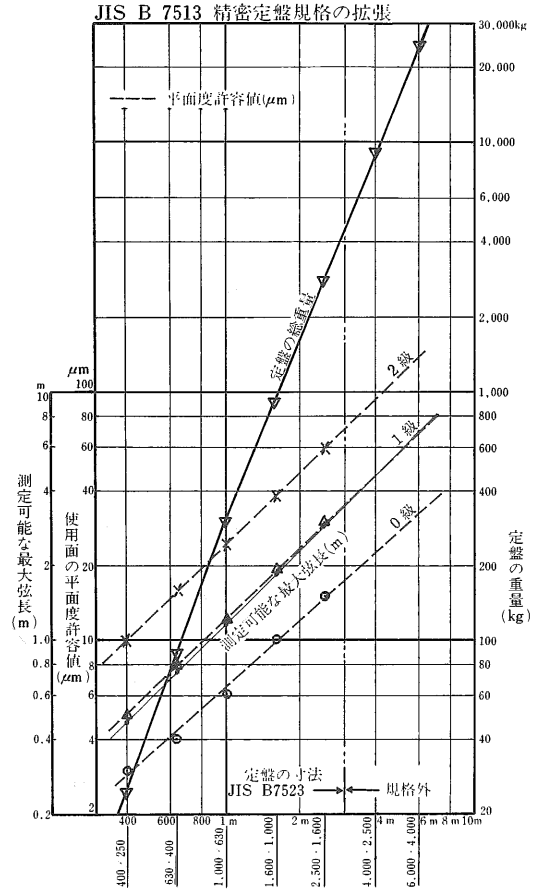


図9.3 面・形状の測定 JIS 8 7513精密定盤規格の拡張 B

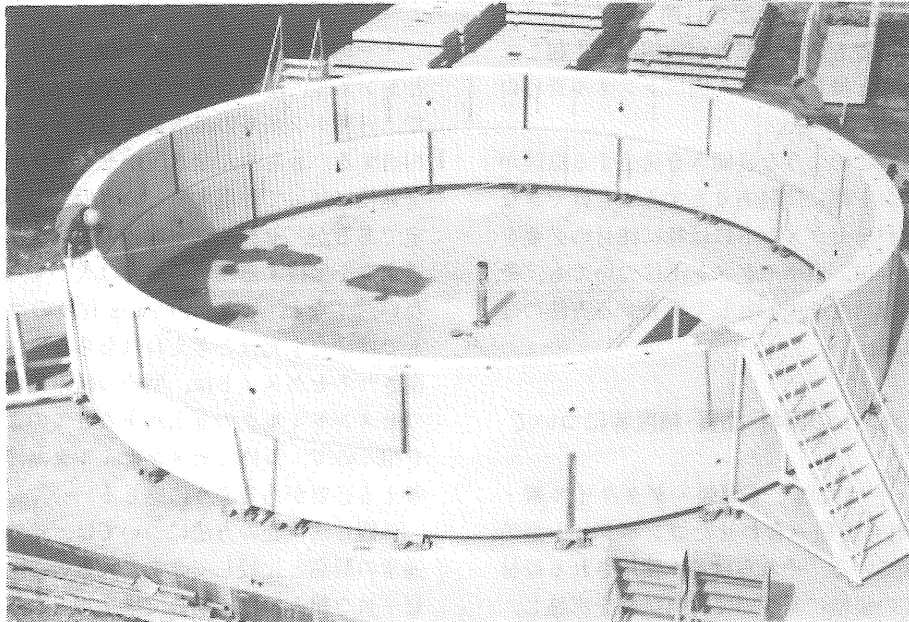


図9.2 リング組立試験

プレートによる検査法が歴史的に採られ<sup>20)</sup>、現在でも主要寸法のチェックはこれによっているのが実情である。あるいはまた、2リング程度を機械定盤上で水平に全円千鳥組して、仕上りセグメントリングの内外径桁高等を寸法検査するリング組み立て試験を実施するのが通例とされている(図9.1,2)。この方法によれば、リング間継手面の平面度をスキミゲージによって検測することもできるが、これを「抜き取り、リングについて行うわけにもいかない。すなわち、300Rに1リングを無作為抽出して計測というわけにもいかない。セグメントの寸法精度の基本をなすものは組み立てられたリングの継手面の真直性にあるので、この両面が完全平行平面上にあるか否かによってその寸法精度が決まり、またシフト幅も確認される。

このような考え方に基づくとき、各ピースの寸法検査を経済的に実施する方法は、精密定盤(B7513)上にシフト幅面を静置することにより、その底面の平面度を検査し、続いてその天幅面(上面)の平面度を平面定規を用いて検査することにより、データム平面に対する面の平行度公差を検することができる(図9.4)。さらにセグメント端部フランジ面の直角度を直角標準器(B7523-8, B7526等)を用いてその公差を求め、最後にフラ

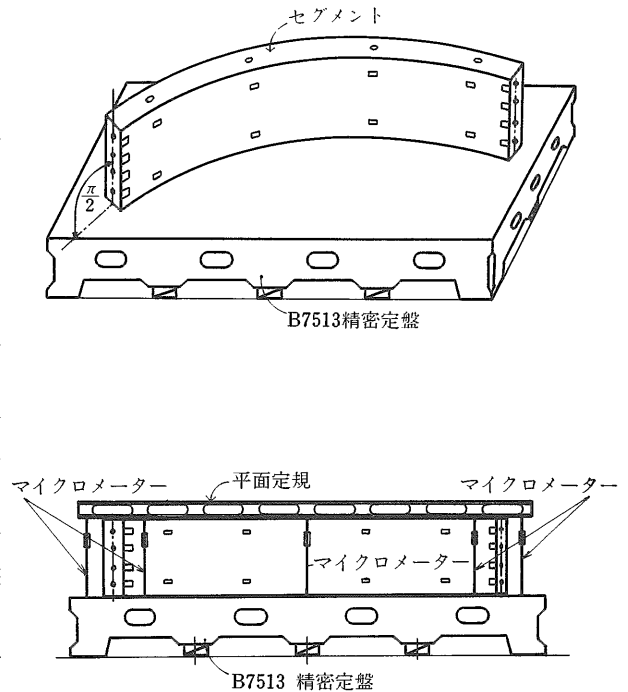


図9.4 定盤による検測

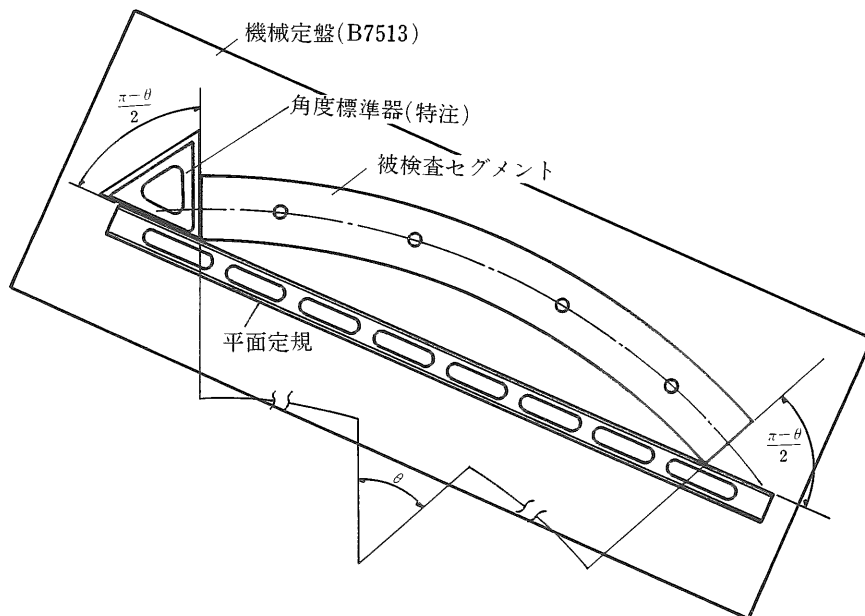


図9.5 ピース間継手面の検査法

ンジ面間の夾角を角度標準器（図9.5）を用いて検測し全計測を完了する。

この計測に使用する精密定盤は、JIS 標準による規格品では弧長 4 m 級のピースに対しては寸法不足のため特注品を製作する必要もある。図9.3はこの関係を示す。同図によれば、定盤寸法は 4,000×2,500、平面度は 1 級で充分であるが、被検測品が重いので、定盤は側面に窓を設けて中央リブ面を足付して水平調整を容易にする必要がある。合せ楔は鋼製でないという意味がない。<sup>21)</sup>

### 10. セグメントの継手面の間隙と漏水

完工されたシールド・トンネルの品質を決定する要因として、構造設計強度が満足されることはもちろんであるが、セグメントが工場製産品であることとともに、現場施工の良否にも多大の関連を持つが、使用されるセグメントの仕上がり寸法制度や止水剤の品質寸法も非常に重要な要因となっていることは周知のところである。

セグメントの寸法許容差はトンネル標準仕方書（シールド編）に示されているが、土圧水圧とも

に従来の常識を越える超高土水圧に対応する場合、従来の考え方によっては解決し難い色々の問題に逢着する。以下それらのうちの重要と思われる点について検討を試みよう。

#### (1) 継手面の間隙と漏水

セグメントは組み立てによってその継手面にはその許された誤差に基づく間隙が発生する。たとえばシフト幅に対して鑄鉄製の場合、許容製作誤差として ±0.5mm とされている。したがって、最悪の場合、+0.5mm と -0.5mm の差 1 mm が目違いとして生ずる可能性がある。このような間隙を通して地下水が外水圧によって流入した場合、どのような結果となるであろうか。

ある一定の間隙を保った平行面の間隙を通しある圧力が作用したとき流れる 2 次元の非圧縮定常流を算出するため、図10.1のような流れを考える。2組の平行平板の中の流れの方向を x 軸に定め、これに直角に y 軸を定め、y 軸に沿っての x 方向流速 u の変化を求める。この場合 x 軸に沿っての流れの連続性より<sup>22)</sup>、

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 0 \tag{10.1}$$

表10.1 セグメントの寸法許容差表

(単位: mm)

種 類 項 目	鋼製セグメント				鑄鉄製セグメント <sup>4)</sup>				コンクリート系セグメント				
	セグメント厚さ (主桁高さ)(a)	±1.5				+3.0 -1.0 <sup>3)</sup>				+5.0 -1.0 <sup>3)</sup>			
セグメント幅 (b)	±1.5				±0.5				±1.0				
弧 張 (c)	±1.5				±0.5				±1.0				
ボルト孔ピッチ (d:d')	±1.0				±0.5				±1.0				
各部の肉厚 (e)	— <sup>2)</sup>				-1.0 <sup>3)</sup>				-1.0 <sup>3)</sup>				
1) 水平組立て時の真円度	セグメントリングの大きさ外径 2R <sub>0</sub> (m)	2R <sub>0</sub> <4	4≦2R <sub>0</sub> <6	6≦2R <sub>0</sub> <8	8≦2R <sub>0</sub> <12	4≦2R <sub>0</sub> <6	6≦2R <sub>0</sub> <8	6≦2R <sub>0</sub> <8	8≦2R <sub>0</sub> <12	2≦2R <sub>0</sub> <6	4≦2R <sub>0</sub> <6	6≦2R <sub>0</sub> <8	8≦2R <sub>0</sub> <12
	ボルトピッチサークル径	±7	±10	±10	±15	±5	±7	±8	±12	±7	±10	±10	±15
	外 径	±7	±10	±15	±20	±7	±10	±15	±20	±7	±10	±15	±20

注 1) 水平組立て時の真円度はセグメントリング 2 段積みとして測定する。  
 2) 鋼材の各部肉厚は JIS G 3192、3193、3194 に規定された鋼材公差による。  
 3) 鑄鉄製セグメントおよびコンクリート系セグメントで -1mm は局部的な肉厚減少の限界を示したものである。  
 4) 機械仕上げの場合の精度を示したものであるが、鑄放して機械加工を行わない場合は鋼製に準ずる。

また、その加速度についても

$$\frac{Du}{Dt} = u \frac{\partial u}{\partial x} = 0$$

となるから Navier-Stokes の方程式

$$\frac{DV}{Dt} = F_0 - \frac{1}{\rho} \text{grad } p + f$$

は

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}, \quad \frac{\partial p}{\partial y} = 0$$

となり、 $u$  は  $y$  のみの、 $p$  は  $x$  のみの関数となり、第1式に境界条件を与えて積分すると、

$$u = -\frac{h^2}{2\mu} \frac{dp}{dx} \left\{ 1 - \left(\frac{y}{h}\right)^2 \right\}$$

となり、 $u$  の方向は  $\frac{dp}{dx}$  が圧力降下の方向に流れ

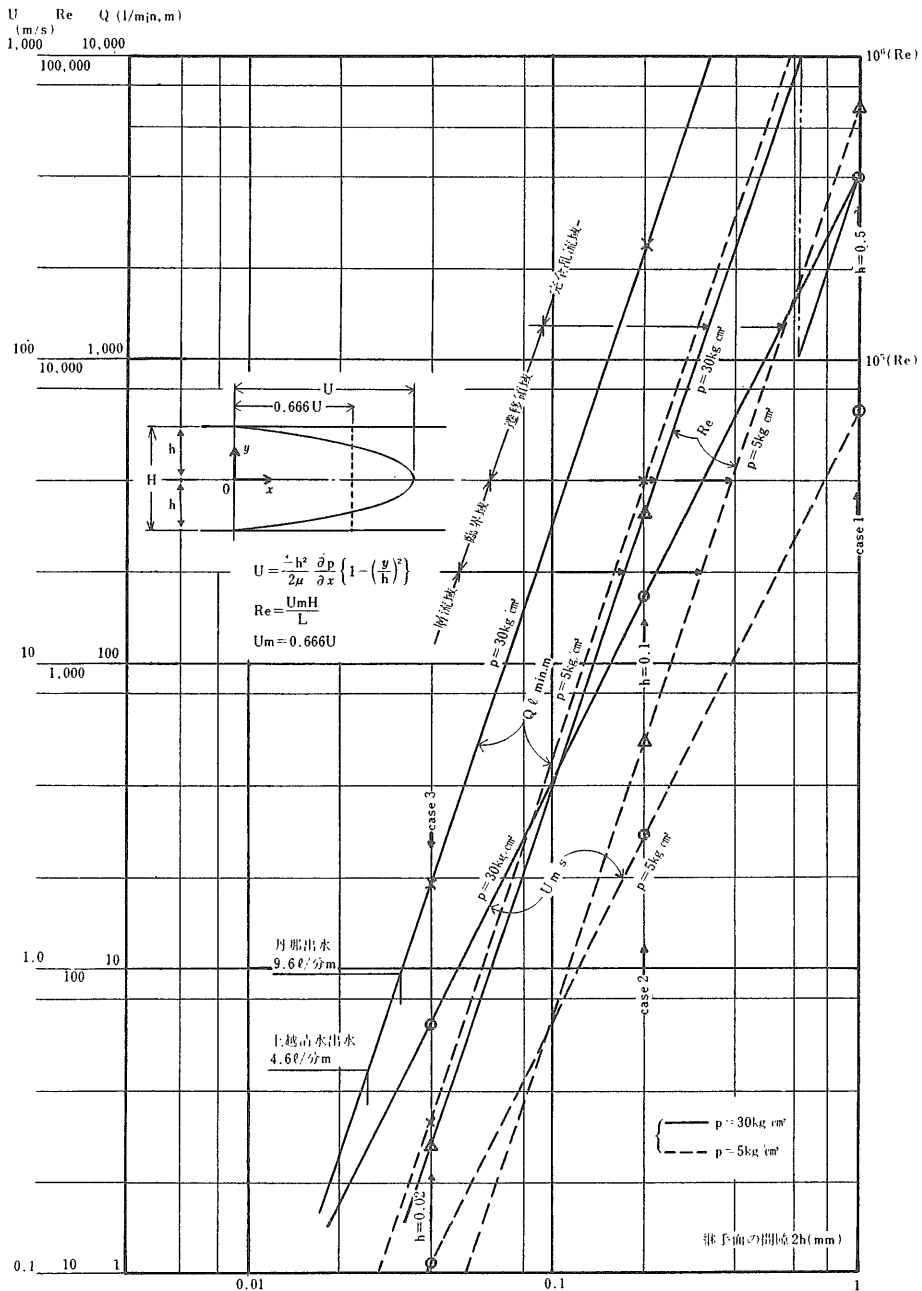


図10.1 間隙 2h からの 2次元流

ることから (一) が付き、速度分布は放物線式となり、なおかつ圧力勾配に比例する。すなわち 2 次元 Poiseuille の流れとなる。

$h=0.5, 0.1, 0.02\text{mm}$  の場合の水 ( $20^\circ\text{C}$ ) の流れについて試算すると;

$$\left. \begin{array}{l} \text{水の粘性 } \mu \text{ (NS/m}^2\text{)} \quad 1.002 \times 10^{-3} \\ \text{動粘性 } \nu \text{ (m}^2\text{/s)} \quad 1.004 \times 10^{-6} \end{array} \right\}$$

$$\left( L = \frac{\mu}{\rho} \right)$$

であるから、

case 1  $h=0.5\text{mm}$  セグメント厚  $0.9\text{m}$

$$\text{水圧 } 30\text{kg/cm}^2 (5") \quad \frac{dp}{dx} = \frac{30\text{kg/cm}^2}{0.9\text{m}}$$

$$u = 407.6 \cdot \left\{ 1 - \left( \frac{y}{h} \right)^2 \right\} \text{ m/s} \\ (67.6)$$

$$\text{Re} = 406,780 \quad (67,790)$$

$$Q = 294,000 \text{ l/min.m} \\ (49,000)$$

case 2  $h=0.1\text{mm}$  セグメント厚同じ

水圧同じ

$$u = 16.38 \cdot \left\{ 1 - \left( \frac{y}{h} \right)^2 \right\} \text{ m/s} \\ (2.73)$$

$$\text{Re} = 3,253 \quad (542)$$

$$Q = 2,368 \text{ l/min.m} \\ (394.6)$$

case 3  $h=0.02\text{mm}$  セグメント厚同じ

水圧同じ

$$u = 0.652 \cdot \left\{ 1 - \left( \frac{y}{h} \right)^2 \right\} \text{ m/s} \\ (0.108)$$

$$\text{Re} = 26.03 \quad (4.33)$$

$$Q = 18.86 \text{ l/min.m} \\ (3.14)$$

のようになる。これを図示すると図10.1の曲線のようになる。

またこの流れが径14mのトンネルのセグメント継手面の50%に発生したと考えた場合、その水量を試算してみると、

$$\text{case 1} \quad 294,000 \text{ l/min.m}$$

$$\text{case 2} \quad 2,368 \text{ l/min.m}$$

$$\text{case 3} \quad 18.86 \text{ l/min.m}$$

となり、case 1, 2とも実用上許し得ない数字で、乱流域となる。case 3でも、この数字は吾邦最大

の出水とされている丹那出水  $9.6 \text{ l/min.m}$  の約2倍に相当する。したがって case 3といえども、実用上は許し難い水量の域にあることは明白であると判断される。

以上の計算は示方書55条の漏水防止処置 (シーリング材等) なしに求めたものである。

以上の考察から結論付けられることは、

①シーリング材の重要性が新ためて認識され、その機能が絶対不可欠であること。

②その寿命はまたそのトンネルの供用期間を通じて保持されなければならないこと、

③セグメントの継手面の間隙は理論的には  $0.01\text{mm}$  程度以下であることが望ましいが、現実問題としてこれをどう考えるべきか。殊に(3)への対応は、実質的にセグメントの継手面には間隙があってはならないことを意味し、その機械的な仕上げ精度の問題あるいは止水材の問題とは別に、何らかの材質によってその空隙を充填し、なおかつその材質はそこに作用する高土圧高水圧が作用しても充分これに耐え得る性質のものであることが要求されることとなろう。(つづく)

## 参考文献

- 16) 日本下水道協会・土木学会：シールド工用標準セグメント、昭57改訂版
- 17) 村上・水泉：シールド工用セグメントの継手の挙動について、土木学会論文集 NO. 296, 1980. 4
- 18) シールドトンネルの止水に関する調査報告書、58. 9. JSE
- 19) Hewett Johannesson: Shield Compressed Air Tunneling Chap. III
- 20) 同上 P.111.
- 21) JISハンドブック機械計測1986. 28, 機械要素1986. 5
- 22) 機械工学基礎講座：非圧縮流体の力学、生井他、理工学社