

トンネル周辺の水抜孔の効果

埼玉大学工学部 正会員 ○佐藤 邦明

〃 〃 学生員 小田部 淳

はじめに

海底トンネル掘削のように高い水圧の下で工事を行う場合、湧水はもとより水圧が施工上、土圧、支保工変形などいろいろな支障をもたらすことは周知のことである。こういった問題は岩盤の力学的性状の把握に加え、水理学的現象の解明と併せ考えることが大切であろう。この湧水、高水圧の緩和、低減を目的とする工法に、グラウト注入による止水、地山強化やトンネル周辺の水抜孔施工が実際に採用される。工学的に、こういった問題を論じる際の基本は、やはり岩盤の中の水理現象、つまり岩盤浸透流を十分把握することにあると思われるが、岩盤内の水の流れは通常の均質多孔体内の流れといくつか違った面をもっており、その一つは岩質・空隙の異方性である。工学上、この岩盤の異方性をもつ水理現象とトンネルなど地下構造物の規模をいかに定量的に評価するか、さらにそれをどうモデル化するかが一つの重要な課題となる。

今回まずトンネル周辺の水理現象をサンドモデルによつて実験的に研究し、つぎに、トンネル周辺に設けた水抜による水圧低減効果について実験、ポテンシャル理論の両面より検討したので報告する。

1. 実験装置と実験方法

今回の実験目的はつぎの二つに分けられ、一つは、実際の岩盤内に掘られたトンネル周辺の流れを基礎的に捉えるため、粒状多孔体（今回の実験では砂）内に設けたトンネル模型のまわりでの水圧分布を測定し、トンネル内が大気圧であることによる流れに及ぼす重力効果を量的に把握すること、他はこういったトンネル周辺に水抜孔を設けた場合、水抜孔の効果を調べることである。そこで、こういった結果にもとづき、水抜孔による水圧低減効果をポテンシャル理論と比較することによつて検討している。

実験に用いた装置は図-1(a)に示したように、内径28.4cm、厚さ3cmの円盤形状地盤モデル、定水位水槽およびマンノメーター板よりなつている。トンネル模型は円盤状地盤モデルの中央に設けられ、実験に用いたトンネルは有孔円筒に金網を張つたもので、直径3cmと10cmの二種類を用いた。円盤状地盤モデルは前面透明アクリル板（板厚20mm）で、裏面に放射状にマンノメーター用コックが240個取付けられ、マンノメーター板にビニールホースで接続される。水圧は図中、最上端のバルブから硬質ビニールパイプにより定水頭槽に導びき、水槽の上下によつて調節された。さらに、トンネル周辺の水抜孔は図-2のように、直径0.4cmのものを、半径2.2cmの円状に配列し、湧水は吐出する形である。なお、地盤モデルへの砂の出し入れは裏面に設けた上下二カ所の有蓋口より行ない、砂は水じめにより均質に充填されるよう配慮した。

実験に用いた砂は粒径加積曲線50%径 $d_{50} = 0.5\text{mm}$ のもので、実験中の目づまりを考慮して、微粒径のものを洗いとつたものを用いた。また、透水係数の測定は図-1の条件1のようにトンネル内に水が満たされた場合の実測より、理論的に逆算して求めた。実験は初め、地盤モデル下端より徐々に水をみだし、空気の混入を防止する方法をとり、全地盤が完全に水で飽和された事を確認した後を開始した。

表一 実験ケース

実験ケースは表1に示したように、水頭（図2中、 $H+H_0$ ）を5種類とし、各々トンネルのみの場合、トンネルの周辺に6本、12本の水抜孔を設けた場合であつた。さらに、上述したトンネル内が大気圧であることによる重力効果を吟味する目的で、これらの実験とは別に図-1中の条件1のよう

$H+H_0$ (cm)	190.0	139.0	103.0	72.0	54.0
トンネル	1-A	2-A	3-A	4	5
トンネル、水抜孔6本	1-B	2-B	3-B		
トンネル、水抜孔12本	1-C	2-C	3-C		

な場合も実験した。

2. 理論式とその性質¹⁾

図-2に示すように、無限に深い地質岩盤中、トンネル半径 R_0 の周辺 R の (x_i, y_i) 点に半径 r_i の水抜孔を配備した場合を考える。いま、水抜孔流量 Q_i で水抜きを行なった時、任意点 (x, y) でのポテンシャル ϕ は線型重ね合せより式(1)で表わされる。ここで、 k ; 透水係数、 P ; 水圧、 ℓ ; 水抜孔長、 C ; 定数、 $n = 1, 2, 3 \dots n$ である。そこで、 $\frac{R_0}{H} \ll 1$ とすれば、

$$\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} \div H,$$

$$\phi = k \left(y + \frac{P}{w} \right) = \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{4\pi\ell} \log \frac{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}{r_i^2} + C, \quad (1)$$

$$\frac{P}{w} = (H_0 + H - y) - \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{4\pi\ell k} \log \frac{H^2}{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} \quad (2)$$

$$\phi_i = k \left(y + \frac{P}{w} \right) = \sum_{i=1}^{n'} \frac{Q_i}{4\pi\ell} \log \frac{r_{ij}^2}{r_i^2} + C, \quad (3)$$

$$\{ (H_0 + H) - (y + \frac{P}{w})_j \} - \varepsilon =$$

$$\sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{2\pi\ell k} \log \frac{H}{r_i} - \sum_{i=1}^{n'} \frac{Q_i}{2\pi\ell k} \log \frac{r_{ij}}{r_i} \quad (4)$$

$y = H$, $(P/w) = H_0$ なる条件より、定数 C が決まり、式(2)のようになる。式(2)において $(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 \geq r_i^2$ であり、これは任意点の水圧を与えるものである。

つきに、水抜流量 Q_i を求めてみる。 i 番目の孔間距離を $r_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$ とすると、 j 番目の水抜孔周辺 (トンネルも含め) でのポテンシャル ϕ_j は式(3)のように書ける。ここで、 $\sum'$ は $i = j$ を除いた総和の意味であり、 $j = 1, 2, 3 \dots n$ である。さらに、水抜孔群は同一の影響半径をもつと仮定すれば、 $H \div \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}$ 、 $(P/w) = H_0 + H$ より、式(4)のようになる。式(4)において、 ε は既設のトンネル工事に起因する長期的なトンネル周辺の水頭低下を表わすものとする。通常、式(4)の $(P/w)_j$

実験条件 1

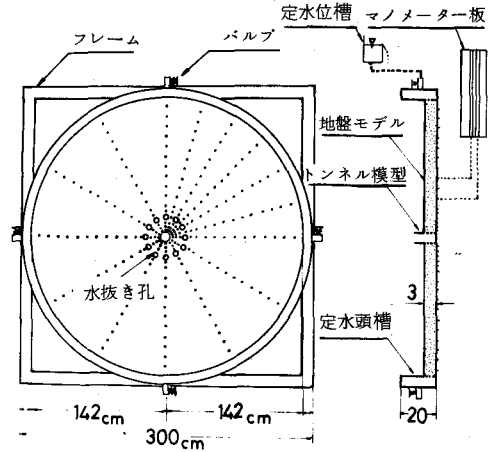
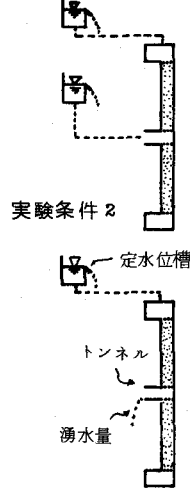


図-1 実験装置の概略と実験方法

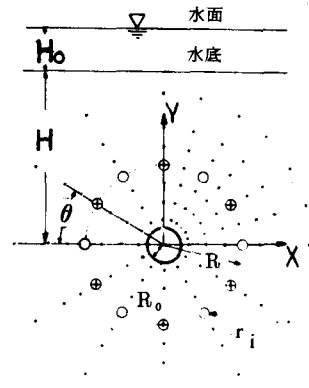


図-2 トンネル周辺の水抜孔配置

は水抜孔やトンネル内で大気圧となれば、零であり、 y_j は孔の高度である。この式は Q_i に関する n 次元の一次連立方程式となり、 Q_i を用いて式(2)を計算すれば水圧分布を求めることができる。

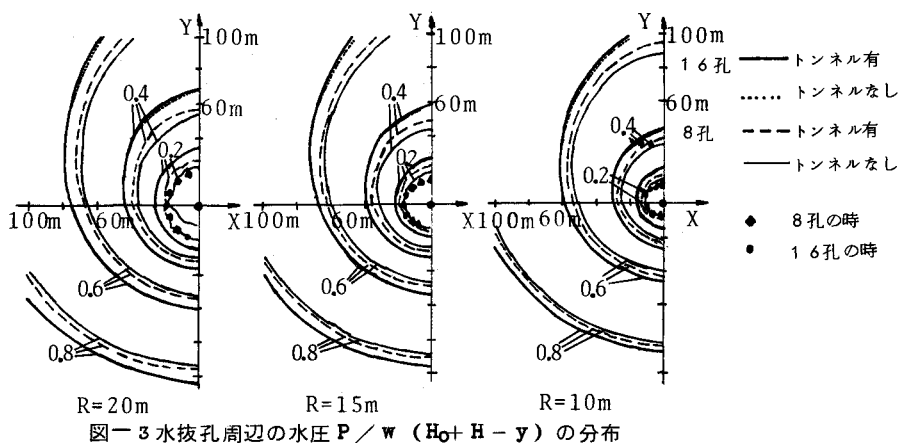


図-3 水抜孔周辺の水圧 $P/w (H_0 + H - y)$ の分布

いま、理論式の性質を吟味しながら、理論的な水抜孔周辺の水圧低減効果を調べてみることにする。式(4)および(2)において、 $\ell k = 1$ 、 $H = 210m$ 、 $r_i = 0.03m$ 、 $\varepsilon = 0$ 、 $H_0 = 15m$ とおき、 $\theta = 2.25^\circ$ (水抜孔16本)、 $\theta = 4.5^\circ$ (8本)、 $R = 10m$ 、 $15m$ 、 $20m$ の場合の各々について、トンネル (半径 $R_0 = 1.5m$) の有無による分布を計算し、比較した。それらの結果を判り易いために、 $P/w (H_0 + H - y)$ で無次元化し、等水圧線で示したものが図-3(a)、(b)、(c)である。 $P/w (H_0 + H - y)$ の値は水抜孔群中心から遠ざかるにつれ1に近くなり、水抜孔、トンネル内で0となるもので y 軸対称である。水抜孔が多いほど水圧低下は著しく、トンネルがある方がない場合よりも、当然水圧低下は大きくなるが、水抜孔自体でかなり水圧低下があるため、あまり影響が大きいことが判かる。これらの場合、水抜流量 $Q_i / \ell k$ は、たとえば、 $R = 10m$ 、16本でトンネルのある場合、孔番号1=19.3、2=19.6、3=21.1、4=22.6、5=25.0、6=26.9、7=29.3、8=30.0 m となり、トンネルの $Q / \ell k = 39.9m$ となる。このように、式(4)では水抜量は孔の高度に従って変わるため、水抜効果も水抜孔下端の方が大きくなっている。

以上のポテンシャル理論より均質岩盤中の水抜効果は十分期待できると言える。しかし、実際の岩盤で異方性のため、どの程度こういった考え方が使えるか現地の地質を十分検討しておかなければ、危険である。

3. 実験結果とポテンシャル理論の比較

まず、トンネルのみの内部が大気圧である場合に、重力効果がどの程度影響するか、また、流れが放射方向のみに起こるかどうかを調べるため、図-1中実験条件1と2の場合を比較したものが、図-4である。図中、上図は $P/w (H_0 + H - y)$ の等圧面を示し、下図はトンネル中心鉛直軸上の水圧の実測値である。(a)図は上述した実験条件1と2を比較したもので、トンネル半径 $R_0 = 1.5cm$ の場合であり、大気圧であるため重力効果によつて分布が偏平になつていくことがわかる。また、(b)図は水頭 $H_0 + H$ を種々変えたもので、全体にトンネ

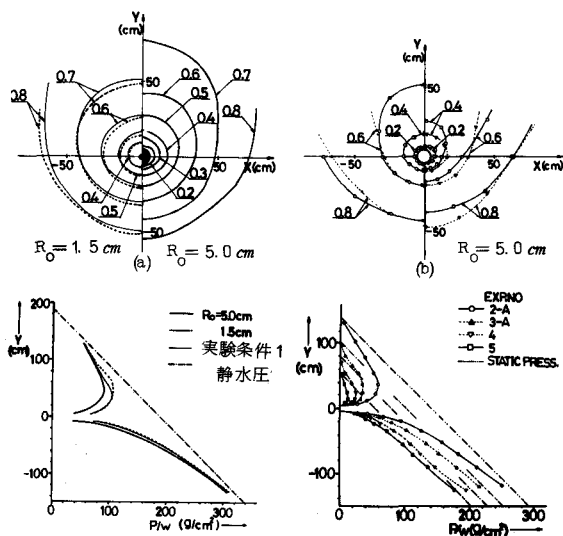


図-4 トンネル周辺の水圧分布

表一 2 水抜孔流量の計算と実測の比較

EXP, NO	1-A		1-B		2-A		2-B		3-A		3-B	
H+Ho	190.0 cm				139.0 cm				103.0 cm			
	EXP	COMP	EXP	COMP	EXP	COMP	EXP	COMP	EXP	COMP	EXP	COMP
TUNNEL	53.9	14.9	31.7	7.36	34.7	11.0	25.3	5.42	26.3	8.04	18.2	3.98
DH- 1	3.19	4.95	2.62	3.02	3.10	2.95	1.95	1.73	2.00	1.47	1.32	0.76
2			3.59	3.27			2.66	1.98			1.94	1.02
3	2.68	6.26	2.04	3.97	2.02	4.27	1.36	2.68	1.39	2.78	0.87	1.71
4			6.45	4.92			5.12	3.63			3.93	2.66
5	7.14	8.89	6.33	5.86	6.38	6.89	5.03	4.58	5.23	5.41	4.23	3.61
6			7.07	6.74			5.94	5.27			4.55	4.31
7	7.16	10.2	6.36	6.76	6.47	8.20	5.53	5.53	5.40	6.73	4.58	4.56
8			7.46	6.74			6.36	5.27			5.56	4.31
9	6.31	8.89	5.73	5.86	5.83	6.89	4.54	4.58	4.40	5.41	3.68	3.61
10			4.49	4.92			3.38	3.63			2.59	2.66
11	3.25	6.26	4.60	3.97	2.65	4.27	1.79	2.68	1.83	2.78	1.23	1.71
12			3.28	3.27			2.45	1.98			1.84	1.02
TOTAL	29.7	36.2	60.0	59.3	26.5	33.4	46.1	43.5	20.3	24.6	36.3	31.9

ル周辺で分布が偏平で、特にトンネル上端でこの効果が顕著となり、下端では重力効果は少ないように思われる。しかし、流れそのものが完全に放射流ではなく、半径方向と接線方向の流れが存在することは確かであり、実際のトンネルでも、支保上の設計、坑内崩落など何らかの関係をもつものと考えられ、今後この種の実験を数多く試みる必要があろう。

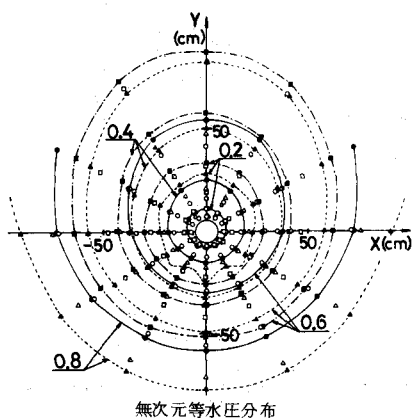
表一 3 トンネル内の浸透流量

EXP, NO	1-A	2-A	3-A	4	5
EXP	70.0	46.6	32.3	27.8	18.4
COMP	40.4	29.6	21.8	15.3	11.6

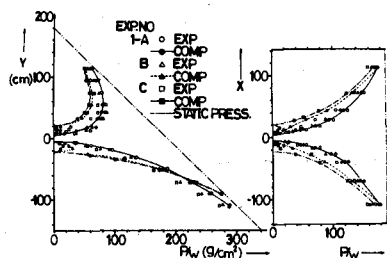
(cc/sec)

つぎに、水抜孔を設けた場合の流量の実測と計算値を比較したものが、表2.3であるが、透水係数 k は先にのべた図-1中実験条件1より算出した結果、 $k=3.77 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ であつた。計算結果と実測値はある程度一致しているが、透水係数の直接測定が出来ないこともあつて、十分な精度とはいひ難い。しかし、傾向は全体に理論と実測で一致していると言える。

さらに、水抜孔を設けた場合の無次元等水圧線、およびトンネル中心鉛直、水平水圧を示したものが、図-5, 6, 7である。これらの結果より、まず、水圧全体について言えば、理論計算値の方が実測のそれより水圧低減効果が大きく表われ、実際には水圧の低下が計算ほど大きく起こらない傾向となつている。特に、トンネル上端でこの傾向が強く、トンネルより離れるとある程度理論は実測に一致する。この理由として、大気圧によるトンネル周辺の流れの特異性、トンネル、水抜孔付近の乱流による Darcy 則の適用性などの問題があると思われるが、いずれにしてもポテンシャル理論を用いる限りこの種の問題を解決することは出来ない。しかし、一応工学的に見て、トンネル周辺に水抜孔を設けることによつて、水圧低減効果は期待できることは確かで、トンネル周辺ではトンネル自体の湧水によつてもかなり水圧は軽減されていることが判か



無次元等水圧分布



鉛直水圧分布

水平水圧分布

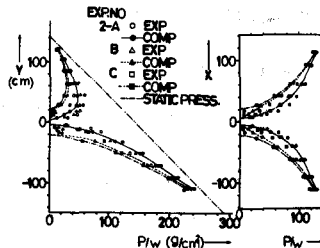
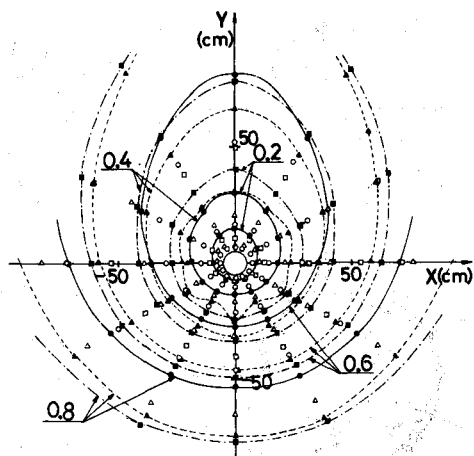
図一五 水抜孔による水圧低減効果 (1-A, B, C)

る。トンネルあるいは水抜孔内で大気圧という条件で計算を進めると、ポテンシャル解析は出来るにしても実際の浸透流では、たとえば、堤体浸透で浸潤面があらわれるように、重力効果によつて必ず流れに不連続性が表われる。このことが実験と理論の差異を生むものと判断され、實際上、こういった事を念頭において水抜効果を検討しなければならない。

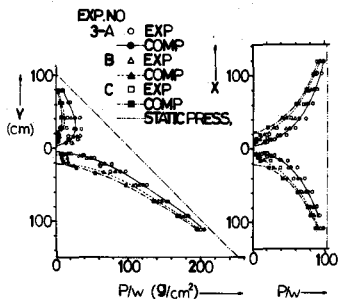
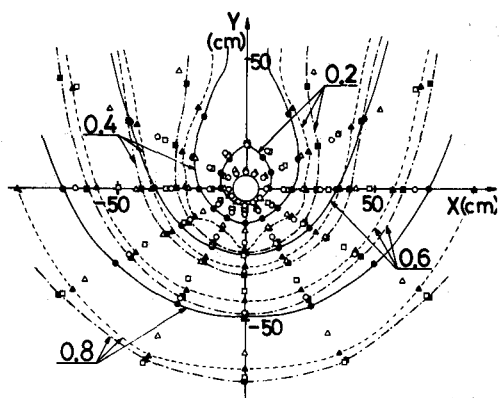
以上の事は室内実験の場合に限らず、つぎにのべる現地実測でも認められる。

現地実測とポテンシャル理論を比較するため、青函トンネル竜飛方先進導坑330m付近の試験坑で昭和48年～49年に日本鉄道建設公団によつて行なわれた結果を参照してみる。³⁾ 図-8は式(2)、(4)により、水抜孔19本の場合の理論と実測を比較したものである。この場合、 $l=17m$ 、 $H=212m$ 、 $H_0=20m$ 、 $e=34m$ 、 $R=6.9m$ 、 $r_1=0.03m$ 、 $k=4.626 \times 10^{-7} m/s$ (ルジオンテストより求めた値)を用い、水抜孔を1、2、3孔開放した水圧分布が示されている(トンネルなし)。図-8(a)は静水圧分布の実測と理論値を示し、岩盤の異方性のため必ずしも同心円状ではないが、全体に一致している。

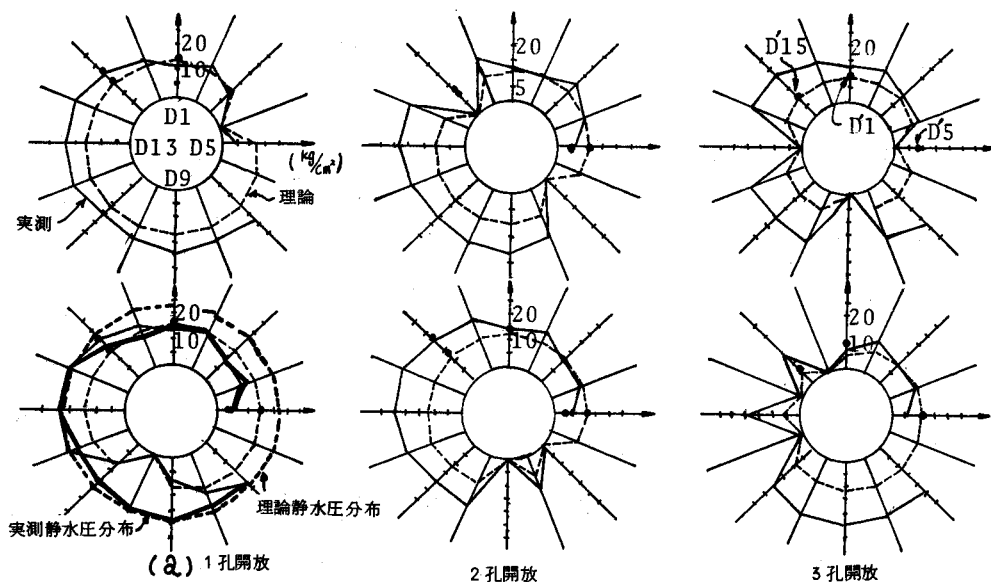
理論値と実測値は室内実験の場合と同じように、



図一六 水抜孔による水圧低減効果 (2-A, B, C)



図一七 水抜孔による水圧低減効果 (3-A, B, C)



図一八 現地実測による1, 2, 3孔開放による閉塞水抜孔内の水圧分布(鉄道公団による)

形状はにているが、必ずしも十分に一致していない。この理由については、岩盤のような多孔体と一様粒状多孔体の場合は脈絡、割れ目などにより同一視出来ないこともあるが、ポテンシャル理論のみでは不十分であることを示している。

結語

水底トンネルにおいて水圧軽減のための一手法として水抜孔を削孔することが考えられるが、今回の研究では、トンネル内が大気圧であることを考えて、重力の浸透流に及ぼす影響を実験的に示し、さらに、水抜孔の効果をポテンシャル理論により解析し、実測と比較した。その結果水抜孔による水圧低減効果は十分期待できるが、理論と実測はトンネル周辺では一致しなかつた。したがって、実際に水抜効果を検討する場合は、理論の方が効果が大きく算定しすぎる傾向があるので注意を要する。

今後は、さらに重力による浸透流への影響を中心に研究を進めたいと考えている。最後に、現地実測データの引用に当つてご協力いただいた埼玉大学岡本舜三学長及び日本鉄道建設公団の各位に深甚の謝意を表わす次第である。

参考文献

- 1) 佐藤邦明：水抜孔によるトンネル周辺の水圧低減効果、1976年度日本地下水学会秋季講演会講演集
- 2) 佐藤邦明、渡辺邦夫、小田部淳：模型実験によるトンネル周辺の水圧分布測定、第4回関東支部年次研究発表会、昭和52.1
- 3) 土木学会、青函トンネル土工研究調査報告書、昭和48年