

土砂トンネル掘削に及ぼす地下水位の影響と路線の選定

水資源開発公団

正会員 山崎 晃

1. まえびき

トンネル工事を計画・設計する際には、そのトンネルが決められた工期・工費内に安全・確実に掘削できるかどうかを判断することは先ずもって大切なことである。そのためには、トンネル掘削の難易を左右する最大の要因は何であるかを知らねば、地山に応じた掘削工法は何であるかを、いかなる補助工法を採用されねばならないかを決めねばならない。

本文では、水資源開発公団房総導水路建設所で実施された調査資料および施工結果より上記の問題についての考察を行ない、それに基づいて導水路の縦断的路线を選定したのでその事例を報告する。

2. 房総導水路の概要

房総導水路建設事業は、千葉県・東京湾沿岸および九十九里沿岸地域に上水道用水もしくは工業用水を合計8.4%、利根川から導水することを目的としている。

導水路の延長は、約67.3kmで農林省が施工した函総用水施設約32.1kmを共用する区間と新設専用区間約35.2kmに大別される。

千葉県山武郡横芝町地先から長生郡長柄町地先までの新設専用区間は、導水路とダムに区分される。導水路は、通水量が計画最大13.0%で、トンネル・暗キョおよびサイホンが交互に連結している地下水路である。ダムは、長柄および東金の2ヶ所で、いずれもアーチダムである。

なお新設専用区間のトンネルは、延長が約23.2kmで内空断面は、 $2R=3.30\text{m}$ もしくは $2R=3.40\text{m}$ の標準馬蹄形である。

掘削は、機械による全断面掘削工法である。

3. 房総導水路付近の上の特徴

房総導水路付近の地形は、いわゆる関東造盆地運動で形成された下総台地と、その台地を数多くの小河川によって樹枝状に開析された低地より成る。

地質は、台地部が下位から、新生代・第四紀の米積世前期のギエツク期¹⁾の上総層群の最上部層である笠森層とそれを不整合に覆う米積世中期の第一間氷期から第二間氷期の下総層群²⁾(=成田層群; 成田層、敷層および地蔵堂層)がある。またそれを関東ローランドが不整合に覆っている。低地部は、沖積層でいわゆるオボレ谷が多い。

図-1は、トンネル施工区間の土質を下総層群と笠森層に分け、三角座標および塑性図上にプロットしたものであるが、下総層群のうち約90%が砂粒土Sで、砂{S}もしくは砂質土

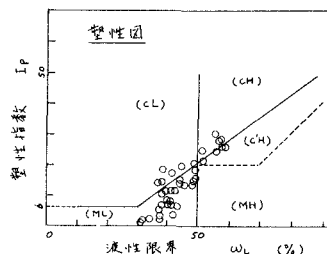
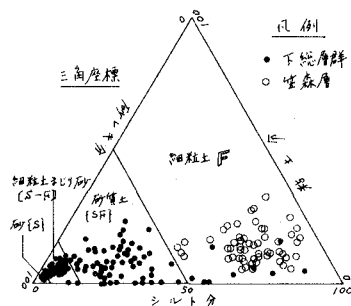


図-1. 三角座標および塑性図

{SF}に、笠森層のすべてが細粒土Fで、シルト{M}もしくは粘性土{C}に分類される。

表-1 物理的性質

表-1は、それぞれの土層の物理試験結果に統計的处理を行い、データが5%危険率での σ -検定によれば、いずれも正規分布で近似できることを検定した上で、それぞれの平均値($\bar{x}$)標準偏差(σ)を求めたものであるが、その結果からさらに細分類してもトンネル掘削の難易を判定する際には意味がないと考えられる。したがって、下総層群の砂もしくは砂質土と均等で細かな土粒子から構成されているものであり、笠森層のシルトもしくは粘性土と均等でより細かな土粒子から構成されている低塑性の土質であると一括して特徴づけることにする。

下総層群の砂と砂質土および笠森層について、不かく乱状態と種々の締固めエネルギーによる最大乾燥密度(ρ_{dmax})付近(最適含水比(w_{opt})の $\pm 2\%$ 以内)で三軸圧縮試験(UU試験)および透水試験(変水位)を実施したので、その結果よりそれぞれの土層の物理的性質を考察する。

なお最大間ゲキ比(e_{max})は、立元らの提案した瞬間的充てん法で求め、最小間ゲキ比(e_{min})は、三種の空固めによる最小間ゲキ比を図示し、その曲線の形を考慮してある漸近線に近づいた点をもって最小間ゲキ比とした。

土砂トンネルを掘削する際のトンネル切削の水に対する安定性を知るために実施したスレーキング試験は、気泡の付着による測定値の誤差を出来るだけ小さくするために、バットの外縁を木づちで連打する方法を採用した。この試験結果は表-2に一括して提示してある。

すなわち下総層群の砂および砂質土は、不かく乱状態の相対密度がそれぞれ0.55および0.57で、締まり具合は「中位」ということになる。このことは、三軸圧縮試験の際の応力(σ)～ヒズミ(ϵ)曲線が延性破壊形式となることに結びつく。また締固め曲線もはだらかである。すなわち下総層群は、不かく乱状態ではそれほど安定した土層ではないが、締固めると幾分は安定したものになる。と言える。しかしスレーキング試験結果から下総層群は、どのような条件下でも水に対しては全く抵抗性のない土層であると言わざるを得ない。

土層名 物理的性質	下総層群				笠森層	
	{S} N=28		{SF} N=29		{M} or {C} N=39	
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
ρ_{dmax} g/cm^3	2.00	—	0.84	—	0.42	—
w_{in} %	2.8	6	2.9	6	4.0	4
G_s	2.70	0.04	2.68	0.04	2.60	0.02
砂分 %	90	4	75	7	21	8
シルト分 %	5	2	16	5	65	10
粘土分 %	5	2	9	4	14	6
D_{60} mm	0.214	0.082	0.156	0.069	0.057	0.010
D_{30} mm	0.158	0.052	0.092	0.026	0.035	0.016
D_{10} mm	0.074	0.043	0.017	0.016	0.007	0.010
UC	2.9	—	9.2	—	8.1	—
UL	1.6	—	3.2	—	3.1	—
$y_{t,sat}$ g/cm^3	1.97	0.10	1.94	0.12	1.78	0.06
WL %	—	—	—	—	47	8
LP %	—	—	—	—	17	8

表-2 力学的性質

試験の力学的性質 土質名 作成方法	下総層群		笠森層	
	{S}	{SF}	{M} or {C}	
不かく乱 試験料	e_{max}	1.085	1.884	2.997
	e_{min}	0.521	0.595	0.673
	Dr %	0.55	0.57	0.74
	C kg/cm^2	—	—	1.2
	ϕ	33	26	32
	k_e cm/s	1.2×10^{-3}	2.4×10^{-4}	7.3×10^{-7}
	S %	100 (0)	100 (1)	0.9 (-)
	Dr %	0.77	0.75	0.75
	C kg/cm^2	—	—	0.6
	ϕ	35	32	25
締固め 試験料	JISA 1210 1-1-b法 [5.6]			
	k_e cm/s	8.0×10^{-5}	2.2×10^{-5}	3.5×10^{-6}
	S %	100 (0)	100 (25)	100 (72)
	Dr %	0.89	0.85	0.87
	C kg/cm^2	—	—	1.0
	ϕ	37	36	30
	k_e cm/s	1.8×10^{-5}	5.7×10^{-6}	6.8×10^{-7}
	S %	100 (3)	100 (28)	100 (83)
	Dr %	0.98	0.98	0.98
	C kg/cm^2	—	—	1.5
材料	JISA 1210 2.3-b法 [25.2]			
	ϕ	38	40	30
	k_e cm/s	6.0×10^{-6}	1.0×10^{-6}	7.8×10^{-8}
	S %	100 (5)	100 (28)	19 (-)

- ただし 1. C 内数字は締固めの圧量($\text{cm} \cdot \text{kg/cm}^2$)
 2. Sはスレーキング度
 3. () 内数字は、全試験片が崩壊するまでの連打回数
 4. $S(\%) = \frac{\text{水中に崩壊した試験体の乾燥重量}}{\text{供試体の乾燥重量}} \times 100$

室森層のシルトは、下かく乱状態のシルト、相対密度は0.74で、締まり具合は「密な」範ちゅうに入る。このことは、応力〜ヒズミ曲線が脆性破壊形式をとることに結びつく。すなわち室森層は、物理的性質はあまり良くなく、またいったん乱した場合も不安定な土であるが、自然状態では力学的にかなり安定した土層であると考えられる。

4. 地下水位とトンネル掘削工法との関係

図-2は、トンネルの水平延長を100m毎に区切り、トンネルインバートからの地下水位の平均の高さと、トンネル掘削工法との関係を図示したものであるが、そのより次のことが明らかとなった。

下総層群の場合には

- (1) 地下水位の高さ、トンネルインバートより5m未満の位置にある場合には、補助工法の併用は必要なく、普通掘削工法で掘削が可能である。
- (2) 地下水位が5m以上、11m未満であれば、地下水位低下工法もしくは圧入工法等の補助工法が必要となる。
- (3) また房総導水路の場合には、トンネルインバートの5m〜10m下に不透水層である室森層が存在するので、地下水位が11mを越えると補助工法のみでは掘削は不可能で、圧入工法もしくは水抜導坑の掘削などの特殊工法を採らねばならない。

なお房総導水路で特殊掘削工法を採用した区間のN値はすべて50以上である。

なお室森層の場合には

- (1) 地下水位に関係なく普通掘削工法で掘削が可能である。

5. 板倉工区の縦断的路線の選定

水路は、道路や鉄道と違って水理的にさへ可能であれば、平面的にも縦断的にもかなり自由に路線を選定できるという利点がある。ここでは、地下水位とトンネル掘削工法との関係から求められた結論に基づいて、縦断的路線を選定した板倉工区の事例を報告する。

新設導水路区間の導水路は、工種、地形および施工性などがら21の工区に分けられているが、板倉工区は上流から数えて17番目の工区である。房総導水路の工種は、社会情勢および維持管理

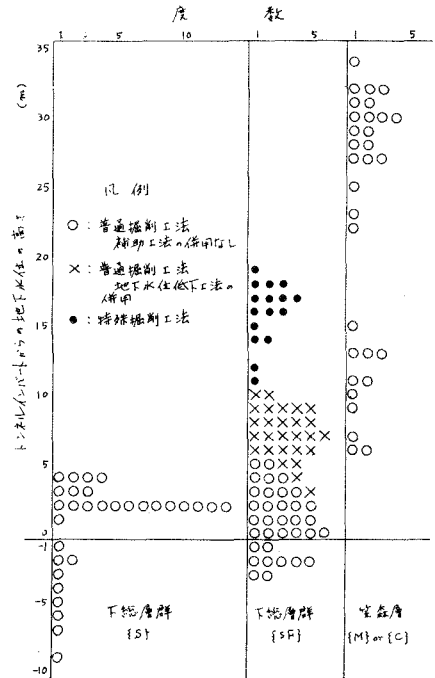


図-2. 地下水位とトンネル掘削工法との関係

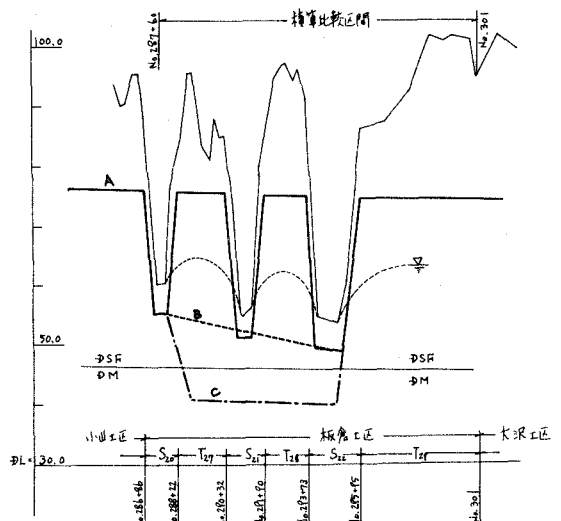


図-3. 板倉工区路線比較図

上の問題から台地部が自由水面をもつトンネル、谷部がサイホン（内径2,800mmの普通鋼管もしくは補剛鋼管）にするという原則であるので、板倉工区の当初案（A案）は、延長1,228mの間に台地部が3ヶ所、谷部が3ヶ所あるのでそれぞれ延長の短い工種となっている。（図-3および表-3参照）

表-3. 各案の工種延長と総工事費

工種 案	工種延長 m				工事用道路 km	総工事費 億円
	トンネル	トンネル付トンネル	サイホン	合計延長		
A	950	—	338	1,228	2.2,350	6.31
B	530	555	225	1,310	1.1,650	7.31
C	530	745	65	1,340	1.1,000	6.14

但し、総工事費は、昭和47年度当初単価による。

B案の施工は圧気工法。

ところが昭和46年9月6日～7日の秋雨前線ならびに台風25号による豪雨で、千葉県北部を除く千葉県全域がびけ崩れに見舞われた。びけ崩れの形態は、昭和46年の災害についてみると、その88%が表面すべりであり、基盤層のすべりは9%にしか満たない。びけ崩れの発生した斜面の傾斜角は、そのほとんどが35°～45°である。また房総導水路付近の表土層は、前述の通り水に対してほとんど抵抗性をもたない下総層群であり、サイホンの傾斜部は、傾斜角が35°～45°で、落差が22m～26mあるので維持管理上問題が多い。そこで水理的にも有利で、坑口仮設も比較的容易に出来るB案が考えられた。しかし地下水位がトンネルインバートより10m以上あるのでディー・フウエルを使用してトンネルラウンまでも地下水位は低下しない。そこで、水に対して安定性の高い、総工事費も最も安いC案が採用された。

6. あとがき

この報告では、トンネル掘削の難易を左右する最大の要因は、地下水位であることを明らかにした上で、導水路の縦断的路線を選定した事例を報告した。

我々土木技術者は、やはりまずと建設することにのみ神経を集中しがちであるが、たとえば水路の場合には、その自体も造る行為よりも水を流すことに目的がある⁶⁾。すなわち建設費の経済比較をする場合でも、その比較する内容は、建設費のみならず耐用年数内の維持管理費も含めて検討すべきであろう。という観点に立って今後も努力する次第である。

なお、この報告をまとめるに当たって当公団 木曽川総合用水第二建設所 羽木朗 副所長の懇切なる御指導に厚く感謝すると共に、資料を提供して下さいた各工区監督員および資料のまとめに御助力致した目黒平則氏に心から謝意を表します。

参考文献

- 1) 関東ローレ研究グループ：関東ローレ，築地書館，pp.65～73，pp.279～306，1965
- 2) 青木直昭：房総・三浦両半島の鮮新世－更新世の地層の対比，石油技術誌，vol.29，pp.100～105，1964
- 3) 立花，青山，山門：砂質土の緩慢・最密化に関する実験的研究，土と基礎，vol.20，No.5，pp.61～66，1972
- 4) 千葉県：昭和46年9月6日～7日秋雨前線ならびに台風25号によるびけ崩れ調査報告書，pp.1～158，1972
- 5) 嶋祐之：昭和46年台風25号による千葉県下の土砂災害について，「昭和46年台風25号による千葉県下災害の案態調査」報告書，pp.1～10，1972
- 6) 青沢貢：水路の適正管理基本計画について，水と土，vol.14，pp.5～9，1973