

(47) NATMにおける岩盤分類および標準設計の一手法

北海道開発コンサルタント(株) 長尾 俊雄
 ○高橋 輝明
 川北 稔

1. はじめに

NATMは周知の如くや全国的に普及しつつあるトンネル工法である。しかし、その一方で合理的設計・施工を行うための適切な岩盤分類手法や標準的設計法および計画管理手法が未だ十分確立されていないというのが現状であろう。本報告はこれらのうち、特に岩盤分類および標準支保パターンについて考察したもので、これまで数多く提案された岩盤分類を統合的に見直し、独自の試験並びにデータ解析に基づいて堅硬な岩盤から特殊地山に至るまで、在来工法岩盤分類との整合性を計りながらNATM用岩盤分類表の作成を試みた。また、各地山等級に対応した標準的な掘削・支保パターンについても検討を加え、実際に携ったNATM施工事例についてその適応性の是非を考察した。その結果、筆者らの提案したNATM用の岩盤分類手法や標準設計手法は実際のNATM現場においてよく適応することがわかった。

2. 岩盤強度推定式の提案と検証

亀裂を含む岩盤の強度推定式として従来用いられてきた式 $\sigma_{cr} = (\sigma_p/\sigma_0)^2 \cdot \sigma_{c0}$ (1) は①動弾性係数 E_d と静弾性係数 E_s の関係、および②静弾性係数 E_s と圧縮強度 σ_c の関係が各々一次線形的関係にあることも仮定している。

①について図1の如く非線形的関係にあるところから、 $E_d = K_1 \cdot E_s^{K_2}$ (2) として回帰係数 K_1, K_2 を求めると表1となる。②について種々の岩種に対する試験結果(図2・3)から、圧縮強度 $\sigma_c = 40 \sim 50$ kg/cm² 付近に折角があり、低強度側で $E_s = \alpha \cdot \sigma_c^\beta$ (3) の関係が認められた。回帰係数 α, β を求めると表2となる。これらの検

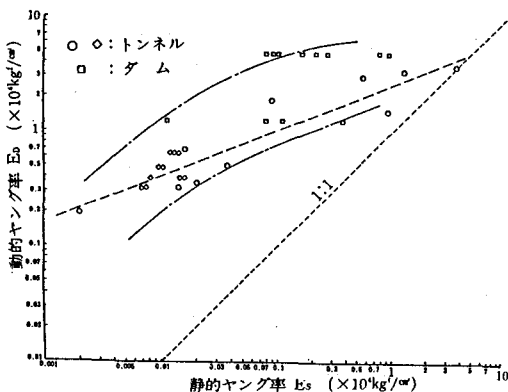


図-1 動的ヤング率と静的ヤング率の関係

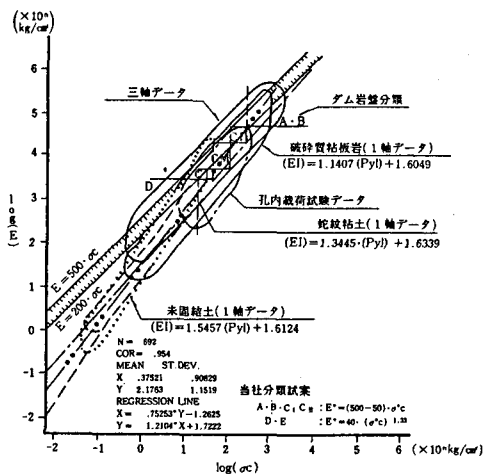


図-2 $E \sim \sigma_c$: 全試料

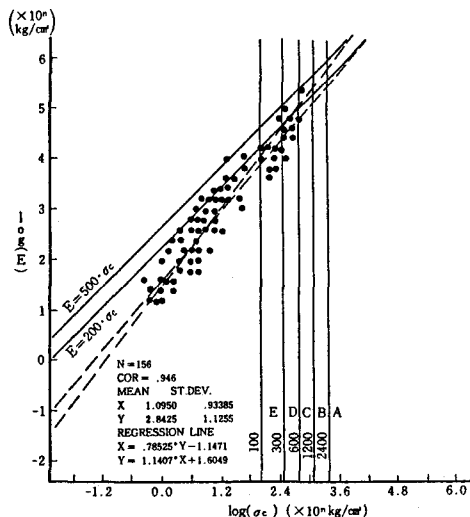


図-3 一軸圧縮試験の $E \sim \sigma_c$: 古期准拠岩類

討結果から弾性波速度比と圧縮強度比の関係を次式のように推定した。(4)式の指数43は従来の岩盤に対する値

$$\sigma_c \geq 43 \text{ kg/cm}^2: \sigma_{cr}/\sigma_{co} = (V_p/V_0)^{43} \dots (4) \quad \sigma_c \leq 43 \text{ kg/cm}^2: \sigma_{cr}/\sigma_{co} = (V_p/V_0)^{13} \dots (5)$$

告例と良く一致するが $E_d \sim E_s$ の非線形的関係をもより良く反映する推定式を得るため、 $\log(\sigma_c/v_p^2) \sim V_p$ の関係を種々の岩種について検討した。(図4) その結果、一般式 $\log(\sigma_c/v_p^2) = V_p/2.7 + K_{R1}$ が得られ、係数 K_{R1} は岩種によって決まる定数となる。各岩種毎の K_{R1} の値は図4に示すところである。この結果、地盤強度推定式として新たに次式を提案した。

$$\sigma_{cr} \geq 43 \text{ kg/cm}^2: \log(\sigma_{cr}/v_p^2) = V_p/2.7 + K_{R1} \dots (6) \quad \sigma_{cr} \leq 43 \text{ kg/cm}^2: \log \sigma_{cr} = 1.3 \cdot \log V_p + K_{R2} \dots (7)$$

(6)・(7)式の妥当性を検証するため、地盤間より公表された弾性波速度を基本とする地山分類とこれに対応する強度特性(C・φ)に関する資料から求めた $V_p \sim \sigma_{cr}$ ($= 2 \cdot C \cdot \cos \phi / (1 - \sin \phi)$) と(6)・(7)式の間係を示したのが図5である。両者の結果には良い一致がみられ、特に岩盤～土砂の広い領域にわたる強度変化が(6)・(7)式でかなり良く表現できることが解った。

3. NATM地山分類(試案)

トンネル工法としてNATM工法を採用する場合、同工法がFEMなどの数値解析手法による事前の予測計算を行うところから地山分類に対応した強度特性の推定が必要となる。道路トンネルにおける在来工法岩盤分類では岩種毎に地山弾性波速度も基本とした地山分類がなされているところから、これに準じたNATM地山分類案を作成することとし、図5を基に在来工法の地山区分に対応した岩盤圧縮強さおよびその地盤強度・変形特性を推定し、NATM地山分類を試みたのが表3である。

4. 地盤間地山分類との対比

表3末尾欄に当地山分類試案と地盤間より公表されている地山分類との対比を示した。この対比は地山弾性波速度の地、地山圧縮強度を考慮して行なうものであるが対比の詳細については今後の運用実績なども勘案し、更に検討を加えて行きたい。

5. 標準掘削および支保パターンの検討

NATM地山分類に対応した標準掘削および支保パターンについて全国的施工実績などを勘案しながら検討を加えた。結果を表4に示す。検討を行うにあたって留意すべき諸点を列記すれば以下のごとくである。

①掘削工法については全断面掘削が機関によって堅硬な地山に適用すべきとの案も出されているが、我国のように一般に地質が複雑な条件下では地山条件の変化に対応し易いベンチカット工法も基本とすべきと考えた。②支保パターンについては地山等級が最も低いE地山に対して、全国の施工実績から最重装束の支保パターンも適用し、順次等級の高い地山について

表-1 k_1, k_2 の推定例

現場名	k_1	k_2	E_s の範囲 (kg/cm ²)	備 考
A	666	0.397	20~37,000	図-3参照
B	182.5	0.559	10~15,000	
C	362	0.446	900~30,000	
D	1,770	0.452	6,000~130,000	
平均値	—	0.463	—	

表-2 α, β の推定例(土質材料の場合)

土 質	α	β	備 考
自然 地盤 材			
第四紀未～半固結土	41.0	1.55	有機質粘性土・粘性土・砂質土
蛇 紋 粘 土	43.0	1.34	粘土状蛇紋岩
破 碎 質 粘 土	40.3	1.14	破碎粘土化を伴う
人 工 試 料	84.6	1.13	石灰系地盤改良材を 膠結材とする改良土

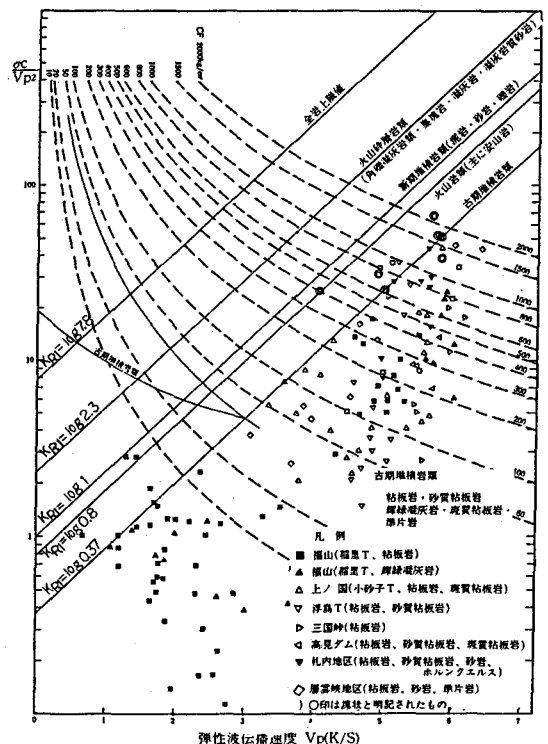


図-4 $\sigma_c/v_p^2 \sim V_p$ の関係: 古期堆積岩類

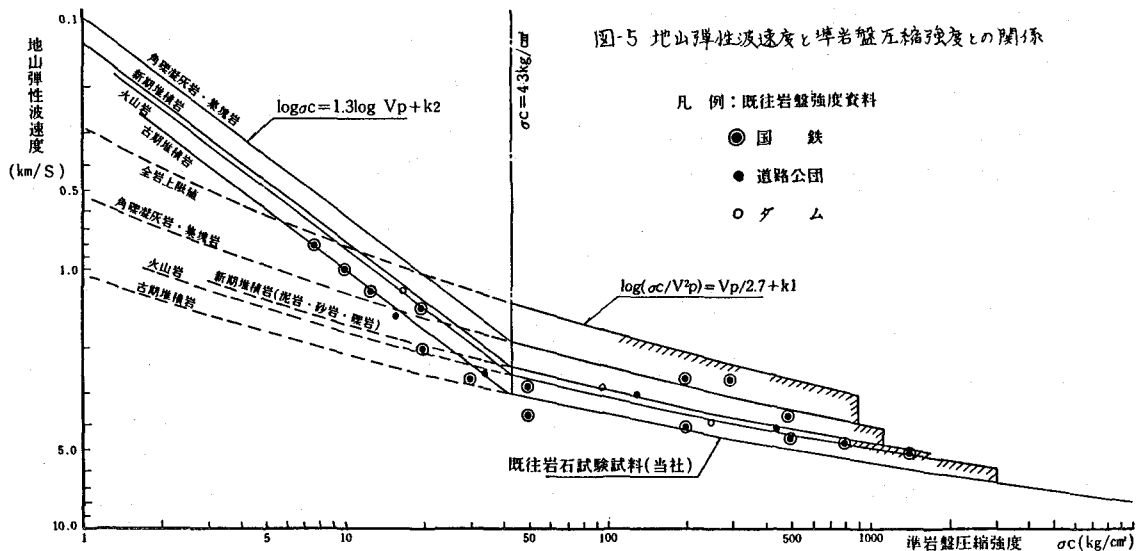


図-5 地山弾性波速度と準岩盤圧縮強度との関係

凡 例：既往岩盤強度資料

- 国 鉄
- 道路公団
- ダ ム

標準的なパターンも決定した。

③ 標準支保パターンの適用範囲については数値解析(FEM)も行ない範囲を設定した。地山は弾塑性モデル(Drucker-Prager)とし支保材はロックボルトが弾塑性トラスおよびせん断パネモデル、吹付コンクリートは弾塑性トラスモデル、インバートは地山同様、弾塑性連続体モデルを適用した。計算に用いた解析プログラムはSIGNAS(株)東洋情報システム製汎用プログラムである。計算の結果、土被り高・吹付コンクリート軸力および最大内空変位の関係を示すのが図6である。この結果、適用限界土被りは吹付コンクリート強度 180 kg/cm^2 に対応する土被りとし、更にこれに対応する最大内空変位量と変形余裕量として評価した。

表-3 NATM岩盤分類

NATM 地山等級	地 山 定 数						既往地山分類との対比			
	岩石圧縮強度 σ_c (kg/cm^2)	粘着力 C (kg/cm^2)	内部摩擦角 ϕ ($^\circ$)	変形係数 D (kg/cm^2)	ポアソン比 ν	地山強度比 $\sigma_c/7\gamma H$	在来工法 (建設省 当試案)	NATM (国鉄)	NATM (道路公団)	ダム基礎 岩盤分類
一般地山	A 1,400以上	60以上	55以上	80,000以上	0.2以下	≥ 6	A	VN	A	A
	B I 1,400~400	60以上	55以上	80,000以上	0.14~0.26	≥ 6	B	WN	A	B
	B II 400~150	60~30	55~50	80,000~30,000	0.26~0.35	≥ 6	B	WN	B	B
	C I 150~70	30~15	50~40	30,000~14,000	0.26~0.38	≥ 4	C	IN	C	C I
	C II 70~35	15~10	40~35	14,000~7,000	0.26~0.38	2~4	C	IN	D I	CM
	D I 20~35	6~10	28~35	4,000~7,000	0.38~0.41	2~4	D	IS IL	D II	CL
特殊地山	D II 10~20	3~6	20~28	1,000~4,000	0.41~0.44	0.7~2	E	特 S ・ 特 L	E	D
	E 10~5	1.5~3	15~20	500~1,000	0.44~0.5	0.5~0.7	E	E	E	D

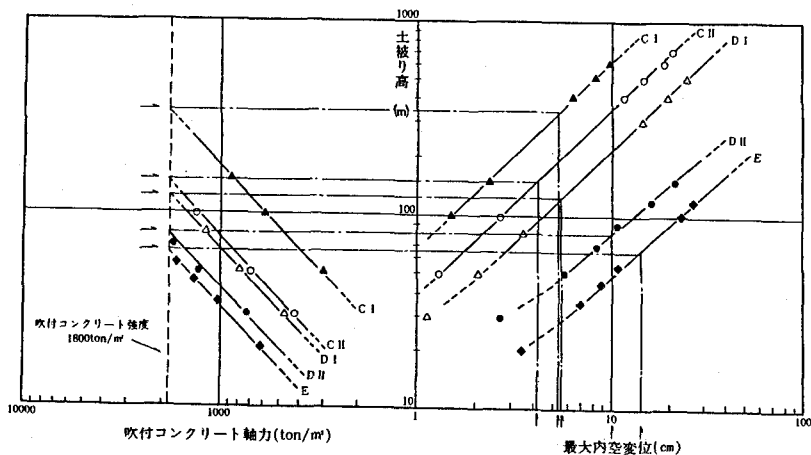


図-6 土被り高、吹付コンクリート軸力および最大内空変位の関係

6. 施工実績との対比

(47) A method on rock classification and standard supports system
for NATM

Toshio Nagao

Teruaki Takahashi

Minoru Kawakita

HOKKAIDO Engineering Consultants Co., LTD

NATM has been rapidly spread for tunnelling method in last ten years in Japan. However, the methods for constructing tunnel economically and stably at NATM, namely, ground evaluation method, standard design process and the means of controlling excavation by measurements etc, are not fully established now.

In this paper, we proposed the classification of rock masses and the standard supports system by analyzing the results of laboratory and in-situ tests, which were performed from the class of hard rock down to the one of squeezed or loosed ground, and further rearranging various classification suggested to date.

The main results of analysis are follows,

- 1) Dynamic elastic modulus(E_d) vs. static one(E_s) relation:

$$E_d = k_1 \cdot E_s^{k_2}$$

where k_1 and k_2 is the constants dependent and independent on rock.

- 2) Static elastic modulus vs. compressive strength(σ_c) relation:

$$i) \sigma_c \leq 40 \sim 50 \text{ (kg/cm}^2\text{)} ; E_s = \alpha \cdot \sigma_c^\beta \quad (\because \beta > 1)$$

$$ii) \sigma_c \geq 40 \sim 50 \text{ (kg/cm}^2\text{)} ; E_s = \alpha \cdot \sigma_c$$

where α, β are constants.

- 3) The equation of estimation about compressive strength(σ_{CR}) on a jointed rock mass:

$$i) \sigma_{CR} \geq 43 \text{ (kg/cm}^2\text{)} ; \log(\sigma_{CR}/V_p^2) = V_p/2.7 + k_{R1}$$

$$ii) \sigma_{CR} \leq 43 \text{ (kg/cm}^2\text{)} ; \log \sigma_{CR} = 1.3 \log V_p + k_{R2}$$

in which, V_p ; P wave velocity

k_{R1}, k_{R2} ; constants dependent on compressive strength of rock specimen and elastic wave velocity of specimen or rock mass.

According to the results of analysis above mentioned, we attempted to make the table of rock classification for NATM from a viewpoint of practical use.

Furthermore, the standard supports system for every rock grade were also considered by means of FEM etc. and discussed as to applicability of the system to a tunnel constructed by NATM.

Consequently, it is clear that the rock classification and standard supports system in this study is applicable to NATM tunnel.