

(22) 和泉層のゆるみ現象

京都大学工学部

嶋

昭治郎

〃

谷

親伯

〃

西

晃

〃

〇刈

敬三

〃

岸

豊

1. 結 論

土木地質の分野では、弾性波伝播速度を利用することが多く、とくにトンネルやダム基礎岩盤の地質調査では、最も重要な調査方法であり、我国では広く普及している。かみりの広がりを持ったき裂を含む原位置岩盤の性質を表すパラメーターとして有利なものであるが、き裂を含む原位置岩盤における弾性波の伝播挙動は、岩盤中の応力状態、き裂の頻度、き裂面での岩塊の接触状態など種々の条件によって変化する。原位置で測定された弾性波速度と採取したコアの弾性波速度との相違を一つのパラメーターとして、き裂による不連続性を総合的に表示することが行われたり^{1), 2)}あるいは、高圧荷重下の岩石試料に関する弾性波速度の変化に関する研究がなされている^{3), 4)}。さらに、き裂の頻度と弾性波速度との関係を検討したものもある⁵⁾。

我々の研究では、室内実験として従来あまり試みられなかった載荷方向での弾性波速度の変化、き裂を含むモデルを利用した弾性波速度と応力状態との関係、き裂の頻度や接触状態が弾性波速度に及ぼす影響等を検討した。これらの室内実験で得られた知見に基づき、和泉層に行った現場測定結果と、き裂の頻度を主たる要因として整理し、ゆるみ現象を解析した。

2. コアの弾性波伝播挙動 (室内実験による解析)

鳴門地区よりφ76のビットにて採取されたボーリングコアの中から岩区AおよびC⁶⁾の砂岩を選り、端面にエゲ精度を1/100として長さ10 cmおよび4 cmの試料を準備した。測定方法は、図-1に示すように、いくつかの試験片を重ね、上下端にビエズ素子(打田製)を接着し、鉄製リングを介して荷重を変化させ、載荷方向の弾性波の速度を測定するものである。

試料を直接接触させた場合、濾紙を用いて人工的にき裂の幅を変化させた場合、さらにき裂面が浸潤している場合について、応力レベルと弾性波速度(V_{pc})との関係を求めた。

図-2は、岩区Cより採取した砂岩について得たものである。荷重の変化に伴う伝播速度の著しい変化が認められる。

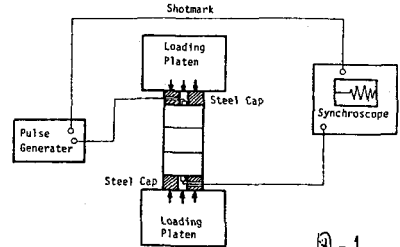


図-1

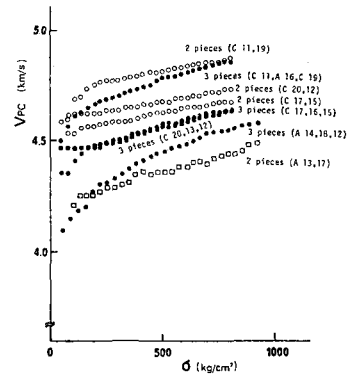


図-2 き裂を含む試料の弾性波速度と応力との関係

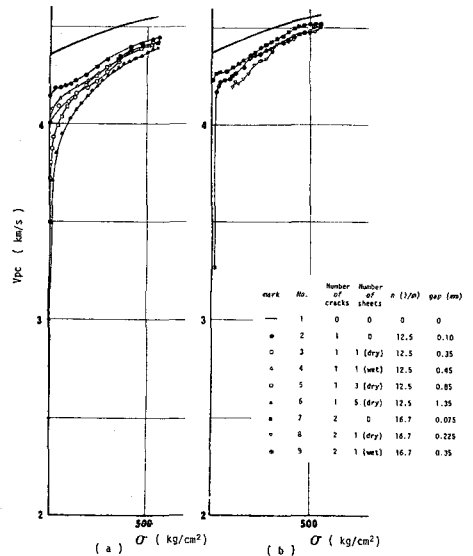


図-3 種々のき裂状態に対する V_{pc} - σ 関係

すなわち、き裂の無い状態では、 $0 \sim 500 \text{ kg/cm}^2$ の範囲で、 $100 \sim 200 \text{ m/sec}$ 程度の変化を示したのに対し、き裂の存在下では、特に $0 \sim 100 \text{ kg/cm}^2$ の範囲での変化が大きく、 0 付近では約半分に減少する。(図-3)

池田は、トンネル内での弾性波速度測定と岩盤状態を調査し、 100 を越える地味でのデータに基づき割れ目指数 k (原位置調査のようにき裂を含んだ状態での伝播速度 V_p のつり合い伝播速度 V_{p0} に対する比、 V_p/V_{p0} に定義) と岩盤状態について報告している⁵⁾。これは割れ目の多少、割れ目の風化状態を表わす指標と考えられ、 1m あたりの割れ目の数でき裂頻度 n として表わすならば、図-4 のような関係が認められる。我々の実験は、 $n=12.5$ 、 16.7 に相当するもので、これを池田の現場調査結果と比較すると、図-5 のようになった。同一の n に対しかなり高い k を示す。また、我々の実験結果からは、図-6 に示すように、荷重がほとんど零、すなわち掘削面のごく近傍では、 n が変化しなくとも、き裂の幅や充填物の状態、乾湿の程度によって k が異なることが分る。

3. 原位置調査結果における割れ目指数の変化

(1) 斜面掘削の場合

45° の傾斜角を有する、いわゆる流れ盤の状態にある砂岩・頁岩の互層岩盤の法面掘削を5段階に分けて 20m 掘り下げ、初期状態と掘削後の状態について弾性波探査を実施したところ、図-7 のような結果を得た。掘削法面および掘削ベンチには、自由面より $3 \sim 7\text{m}$ の深さに、掘削前の初期状態における弾性波速度が半減する領域が認められている。この現象をき裂の頻度との関係から考察する。掘削に伴う速度低下の原因としては、応力状態の変化、既存のき裂の開口および新たなき裂の発生との三者が考えられる。表-1 に岩盤が1層および2層について、P波速度掘り厚から算出した上載荷重、割れ目指数および割れ目指数から

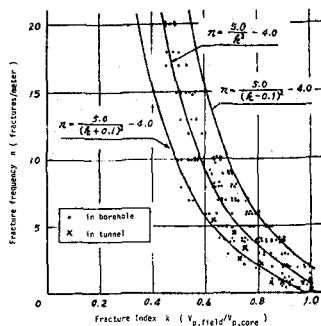


図-4 $n-k$ 関係 (池田による)⁵⁾

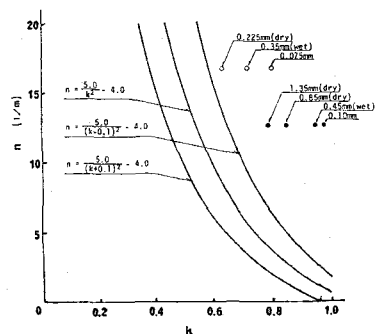


図-5 室内実験結果と $n-k$ 関係

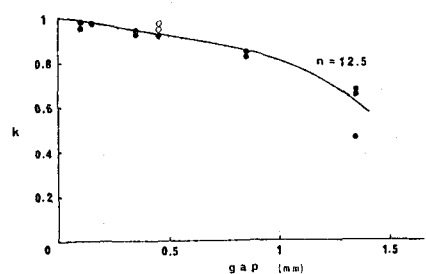


図-6 き裂幅と k

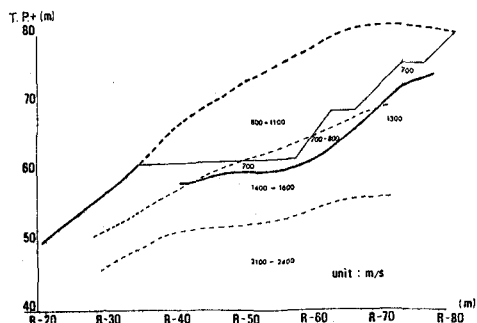


図-7 法面掘削による弾性波速度の変化

表-1 法面掘削時現場測定結果

Layer	Location	STEP 1	STEP 2	STEP 3	STEP 4	STEP 5
1st Layer	Bench	V_p (m/s)	800-1100	500	700-800	300-700
		σ (kg/cm ²)	0.8-2.4	0.0	0.0	0.0
		k	0.19-0.25	0.12	0.16-0.19	0.07-0.16
	Slope	n (1/m)	130-70	335	190-130	1000-190
		V_p (m/s)	800-1100	1100	700-800	400-700
		σ (kg/cm ²)	0.8-2.4	0.0	0.0	0.0
2nd Layer	Bench	k	0.19-0.26	0.26	0.16-0.19	0.09-0.16
		n (1/m)	130-70	70	190-130	500-190
		V_p (m/s)	1400-1600	1400-1600	1400-1600	700-1200
	Slope	σ (kg/cm ²)	3.0-5.0	2.0-4.0	1.5-3.5	1.0-3.3
		k	0.33-0.37	0.33-0.37	0.33-0.37	0.16-0.28
		n (1/m)	40-35	40-35	40-35	190-60

算出したき裂の頻度を示した。応力状態の変化は、最大
 5 kg/cm²と考えらるが、室内実験でも、0 kg/cm²のごく
 近傍での荷重変化が弾性波速度に著しく影響することが確
 認されている。原位置での目視観察では、き裂面が大幅に
 風化作用を受け、粘土等の充填物も確認されているので、
 この奥さらに詳しいき裂面の観察を行い、どのような基準
 でき裂面の状態を表現するかを検討しないことには、応力
 状態と弾性波速度との関係は明瞭とならないであろう。今
 後の課題である。原位置の和泉層については、掘削に伴
 う新たなき裂の発生程度は比較的少ないと思われるが、
 掘削方法として発破を使用しており、掘削面より数mの範
 囲にき裂が発生することは、過去の経験からも予想される
 ことである。しかしながら、き裂の開口と新たなき裂の発
 生の影響を総合的にき裂の頻度 n の増加として考察して
 みると、次のようである。表-1の n は、

$n = 5.0 / \rho^2 - 4.0$ の関係から算出したもので
 ある。岩盤が1層については、ベンチ面および法面と
 ほぼ1.5~2.0倍の増加を示し、第2層については、5~6
 倍の増加である。たとえば、 $n = 200$ は、1 m
 あたり 200本のき裂が存在し、その間隔は平均
 5 mm とひじょうに細かく破砕された状態に相当
 する。B, C₁ および C₂ 級岩盤として、弾性
 波速度から割れ目指数の変化を示すと、表-2の
 ようであり、B級岩盤については、割れ目指数は
 変化していないが、C₁ および C₂ 級岩盤では、
 初期状態の0.32 および 0.42 が掘削後0.12 お
 よび 0.21 と半分以下に低下し、き裂の頻度の増
 加には著しいものがある。したがって、和泉層に
 ついては、掘削面が完全に無荷重状態になる法面
 掘削のような場合には、相当著しいゆがみが生ず
 るものと考えられ、構造物の安定性を検討する上
 では、ゆがみによる強度の劣化状態を追及せねば
 ならないであろう。

(2) 海面下多柱基礎掘削の場合
 大島門橋側塔多柱基礎2P-N0.5 (φ3.6m)の
 掘削時に実施した孔間弾性波速度測定結果からゆ
 がみの程度を考察した。図-8に示すように、φ90
 のボーリング孔N0.1およびN0.6を発振孔とし、
 N0.2孔に受振孔とした。波動の経路と地質状況
 は、図-9に示すようである。測定結果を表-3

表-2 岩盤区分と k の変化

Class	V_p (m/s)	V_{pc} (m/s)	k_0	V_p (m/s)	k
C ₂	1100	3400	0.32	400	0.12
C ₁	1600	3800	0.42	800	0.21
B	2400	3800	0.63	2400	0.63

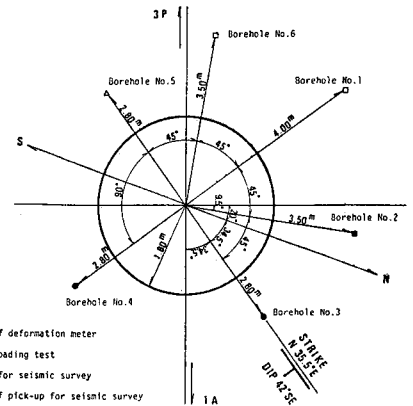


図-8 多柱基礎掘削時の測定史配置

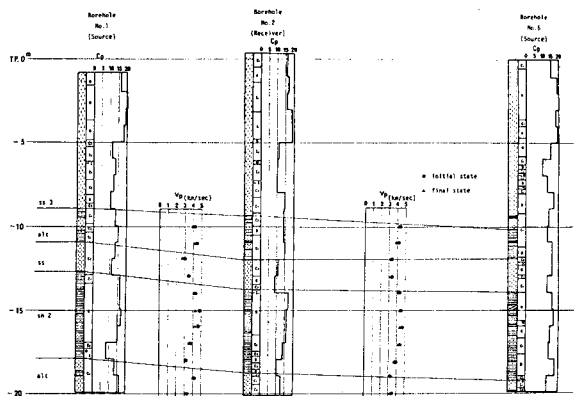


図-9 波動伝播経路と地質

表-3 多柱基礎掘削時 弾性波速度測定結果

No.	Face Position (m)		TP-8.25		TP-11.75		TP-13.48		TP-14.42		TP-15.40		TP-15.40		TP-17.75		TP-19.40		TP-20.00		Ref.]
	Date	(78)	Jun.20	Jun.22	Jun.23	Jun.24	Jun.25	Jun.26	Jun.27	Jun.28	Jun.29	Jun.30	Jul.1	Jul.2	Jul.3	Jul.4	Jul.5				
	Depth (m)	Yo	Yo	Yo	Yo	Yo	Yo	Yo	Yo	Yo	Yo	Yo	Yo	Yo	Yo	Yo	Yo	Yo	Yo	Yo	
11	-10.00	4140	3970	3920	3970	3970	3970	3970	3970	4020	4020	3950	4080	4080	4350						
10	-11.00	4460	4460	4460	4460	4270	4390	4390	4390	4200	4330	4200	4300	4200	4300	4200	4300	4200	4350		
9	-12.00	3150	3150	3150	2990	2990	2960	2960	2960	2960	2990	3020	3020	3020	3000	4050					
8	-13.00	3450	3410	3450	3450	3410	3260	3260	3260	3300	3450	3200	3450	3450	3200	3450	4050				
7	-14.00	4350	4300	4300	4370	4260	4260	4260	4330	4390	4390	4390	4390	4390	4390	4300	5000				
6	-15.00	4920	4920	4920	4920	4920	4920	4920	4920	4920	4920	4920	4920	4920	4920	4920	5000				
5	-16.00	4750	4140	4260	4360	4520	4620	4620	4620	4620	4620	4620	4620	4620	4620	4620	4620	4620	5000		
4	-17.00	3670	3900	3720	3670	3670	3670	3670	3670	3670	3540	3580	3670	3670	3670	3670	3670	3670	3670	5000	
3	-18.00	3090	3090	3090	3090	3090	3090	3090	3090	3090	3090	3090	3090	3090	3090	3090	3090	3090	3090	5000	
2	-19.00	4200	4080	4080	4080	4080	4080	4080	4080	3970	3970	4000	4000	4000	4050	4350					
1	-20.00	2650																		4350	

Note: V_{00} : Initial value of V_p (m/sec)
 V_p : Velocity of primary wave in Filled (m/sec)
 V_{pc} : Velocity of primary wave in specimen (m/sec)

表-4 掘削による弾性波速度の変化率

No.	Face Position (m)	TP-6.25	TP-11.75	TP-13.42	TP-14.42	TP-15.40	TP-15.40	TP-17.25	TP-19.42	TP-20.03
Date	(1981)	Jun.20	Jun.22	Jun.23	Jun.24	Jun.25	Jun.26	Jun.27	Jun.28	Jun.28
Depth (m)	Vo/Vpo	Vo/Vpo	Vo/Vpo	Vo/Vpo	Vo/Vpo	Vo/Vpo	Vo/Vpo	Vo/Vpo	Vo/Vpo	Vo/Vpo
11	-10.00	1.0	0.959	0.947	0.959	0.947	0.946	0.973	0.947	0.966
10	-11.00	1.0	1.0	1.0	0.963	0.904	0.970	0.942	0.971	0.964
9	-12.00	1.0	1.0	0.945	0.940	0.940	0.940	0.940	0.949	0.959
8	-13.00	1.0	0.908	1.0	0.908	0.945	0.956	1.0	0.928	1.0
7	-14.00	1.0	0.993	1.0	0.963	0.983	1.0	1.013	1.013	1.0
6	-15.00	1.0	0.998	1.0	0.965	0.900	0.907	0.892	0.860	0.894
5	-16.00	1.0	0.872	0.897	0.918	0.954	0.958	0.897	0.924	0.925
4	-17.00	1.0	0.901	0.961	0.948	0.948	0.948	0.915	0.925	0.940
3	-18.00	1.0	1.0	-	-	-	-	-	-	-
2	-19.00	1.0	0.972	0.971	0.960	0.971	0.943	0.945	0.952	0.952
1	-20.00	1.0	-	-	-	-	-	-	-	-

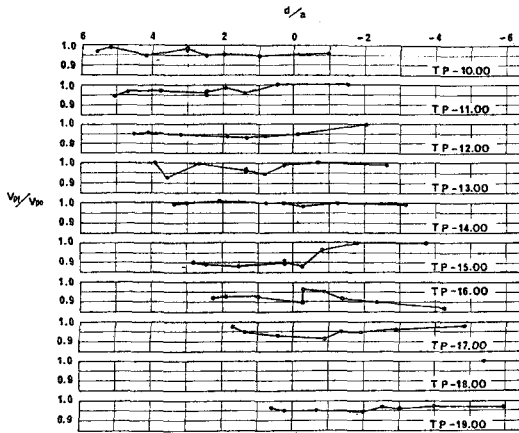


図-10 弾性波速度の変化と切羽の進行

表-5 掘削前後の割れ目指数

TP (m)	Class	V_{p0} (m/s)	V_{p1} (m/s)	V_p	V_p (m/s)	C_p	k
-10.00	C_1-C_2	4140	4800	0.90	4000	A*	0.870
-11.00	$B-C_1-C_2$	4480	4600	0.970	4300	A*	0.913
-12.00	C_1-C_2	3150	4050	0.777	3000	C*	0.741
-12.00	C_2-D	3450	4050	0.852	3450	C*	0.852
-14.00	$B-C_1$	4230	4800	0.941	4300	C*	0.935
-15.00	B	4920	5000	0.964	4450	A*	0.890
-16.00	B	4750	5000	0.950	4330	A*	0.866
-17.00	$B-C_1-C_2$	3870	4600	0.841	3770	A*	0.820
-18.00	C_1-C_2-D	3090	4050	0.763	-	C*	-
-19.00	C_1-C_2	4200	4600	0.912	4050	A*	0.880
-20.00	C_1-C_2	3260	4600	0.709	-	A*	-

Rock Classification	1	2
C_1-C_2	14 (B*)	
$B-C_1-C_2$	14.75 (B*)	
C_1-C_2	12.5 (C*)	
C_2-D	13 (C*)	
$B-C_1$	11.25 (C*)	
B	18.5 (A*)	
B	14 (B*)	
$B-C_1-C_2$	15.5 (B*)	
C_1-C_2-D	19.5 (C*)	
C_1-C_2	14.5 (B*)	

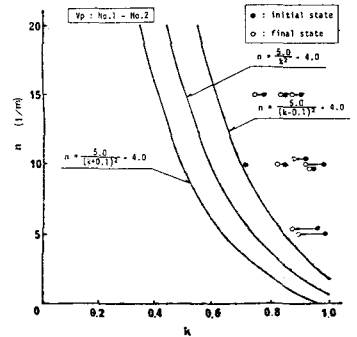


図-11 掘削前後の $n-k$

に示す。右欄にコアの弾性波速度を示した。この結果より、初期状態の弾性波速度に対する比として、速度変化を求めると、表-4のようになる。大体数%~10%程度の伝播速度の減少が認められる。

多相基礎掘削に伴うゆみ現象は、一種の立坑と考えれば、大口径ボーリング機の切羽面すなわち切羽面の位置と大きき関係に有するので、切羽面を基準にして、伝播速度の変化を検討すると、図-10のようになる。また、同図に波動の伝播経路に相当する部分の岩盤区画を表示した。岩盤区画-1は、従来多く用いられていたA~E分類によるものであり、岩盤区画-2は総合評定法⁶⁾による評定である。図-10を見ると、TP-14.00およびTP-18.00地更を除いて、大体切羽の進行に伴う伝播速度の変化が認められ、変形挙動との間にも関連がつかれている。掘削前および掘削後の割れ目指数は、表-5に示すように最大8%程度の変化を示している。これを $n-k$ の関係を示す図-11にプロットすると、図-11となる。図中の右側の n の値は、ボーリングコアの観察に基づき決定したものである。

総合的に、2P-NO.5地更における岩盤の $n-k$ 関係は、池田の調査の結果に比べ、より大きな n の領域に相当することになり、かなり良好な岩盤状態と判断してよいであろう。 n の変化も小さく、き裂面の風化や充填物の影響は、ほとんど見られないうので、掘削によるゆみの程度は小さいものと考えられる。

文 献

- 1) 工藤慎一：ダム基礎岩盤の調査，土木技術資料，Vol. 2, No. 3 (1960)
- 2) 若月・奥田・中島：現場および室内試験による岩質判定について，第10回道路会議 掘削課題論文集，日本道路協会 (1971)
- 3) 大見・井上：一軸圧縮下における岩石の弾性波伝播特性，第5回岩の力学国内シンポジウム講演集 (1977)
- 4) 菅原 捷：岩石の圧縮応力と弾性波伝播速度について，第11回岩盤力学シンポジウム，土木学会 (1978)
- 5) 物理探査技術協会：土木弾性波探査法，pp 406-408 (1972)
- 6) 越智・能戸・裕次：岩盤の総合評定法に関する一試案，第4回岩の力学国内シンポジウム (1973)

THE RELAXATION OF TERTIARY SEDIMENTARY ROCK

--- SEISMIC BEHAVIOR OF IZUMI FORMATION

by Shojiro HATA, Chikaosa TANIMOTO, Akira NISHIHARA,
Keizo KARIYA and Yutaka KISHIDA

Dept. of Civil Engg., Kyoto University

SUMMARY

In the excavation of rock mass including many discontinuities such as Izumi Formation, Tertiary alternative layers of sandstone and shale which are heavily fissured in most of cases, the relaxation at discontinuities is considered to influence much to in situ strength characteristics.

Authors had the chance to carry out some field measurements at the construction sites of cut slope for a highway and vertical shaft for the foundation of a suspension bridge which were located closely in the same Izumi Formation. In the both of cases, seismic method was applied for the reasons that it has the outstanding advantages of being relatively cheap and rapid to apply, influencing large volumes of rock and being well experienced in Japan.

The propagating behavior of seismic wave through the rock mass with discontinuities is subjected to the state of 'stresses', 'fracture frequency' (n) defined by the number of joints per 1 meter and 'velocity ratio' (k) defined by the ratio of primary wave velocity in situ (or through a cracked model) to that of intact rock (without discontinuity).

The results from the field measurement at the cut slope in which all stresses near the surface were relieved show that the reduction of k -value are nearly zero for B-class rock and 50 - 70 % for C-class rock. Also, the results from the one around the circular vertical shaft, of 3.6 m in dia. and of 20 m deep around which confining pressure acted in tangential direction, show less reduction such as 5 - 8 % and 3 - 5 % to for B-class rock and C-class rock respectively.

Comparing with Ikeda's equation in the form of $n = 5.0 / k^2 - 4.0$, being based on the results obtained at more than 100 sites, the former case indicates very low k -value and the latter does rather high one under the condition of no variation in fracture frequency, the fact of that was confirmed by visual observation at the both sites.

In the laboratory test using piled specimens, having the dimensions of 4 cm and 10 cm long with 76 mm in dia., sampled from the same sites where the field measurements were carried out, the relations between the directions of loading - propagating, fracture frequency - velocity ratio with some variation of gap in the range of 0.1 mm - 1.35 mm, and stress level - velocity ratio were clarified experimentally.

The following are concluded:

- (1) The change of compression in the lateral direction to wave propagation has little influence to velocity ratio.
- (2) The remarkable decrease of velocity ratio are recognized in the range of 50 to 0 kg/cm^2 at unloading and it reaches at the half of an initial value when the direction of wave propagation agrees with that of compression.
- (3) The variation of velocity ratio is also subjected the interval of gap and lying material at joints.
- (4) The excavation of the vertical shaft by the boring machine with a large diameter did not have any influence to the stability of the shaft, and it was confirmed that no interference by the excavation of an adjacent shaft 4.4 m far happened.