

原位置載荷試験の載荷方向による変形特性の異方性について (風化花崗岩の場合)

中央開発株式会社 石 川 浩 次
本州四国連絡橋公団 宮 島 圭 司

1 まえがき

岩盤の変形特性に関する異方性は、一般には、岩盤のもつ割れ目等の方向性によるものとされている。花崗岩の場合は、風化がすすむと、一般に割れ目が目立たなくなるが、原位置における載荷試験で、鉛直方向と水平方向によってその変形挙動の異なることが分った。

本報告は、本州四国連絡橋ルートの風化花崗岩の分布する区域で、数個所の調査坑内で行った、原位置載荷試験の載荷方向による変形特性の異方性について、割れ目方向以外と思われる原因についての考察を行ったものである。

2. 調査箇所と試験法の概要

調査地は、本四連絡橋Dルート(岡山県児島市～香川県坂出市)とEルート(広島県尾道市～愛媛県今治市)の島しょ部(児島市灯籠崎、坂出市塩生、因島市大浜、生口島州江、瀬戸田町早瀬、見近島)で、地質は、風化のすすんだ広島型、嶺家型の黒雲母中～粗粒花崗岩類である。試験は、これらの地点で掘削した調査(堅又は横坑)坑内で、剛体円形載荷板($\phi 40\sim 60\text{cm}$)による平板載荷試験によった。試験地点の概況と、その試験の荷重載荷パターンの一例を、図-1、及び図-2に示す。

調査坑の断面は、通常2m平方で、試験位置は、坑口より、15～100m、土被り厚さは、5～23mとなっている。試験は、近似地点の同一岩級分類の箇所、鉛直方向及び水平方向の載荷試験を行い、両者の変形挙動を比較した。載荷荷重は、一般に線形関係を示す。 $P=20\sim 70\text{Kgf/cm}^2$ の範囲で、段階及びくり返し荷重を与え、載荷板($\phi 40\sim 60\text{cm}$)変位より、半無限地盤とみなし、弾性解より、変形係数D、及び接線弾性係数Etを求めた。

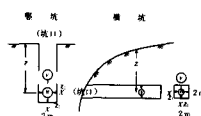


図-1 調査坑の状況

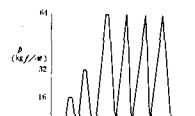


図-2 載荷パターン

各試験地点の条件及び物性値等の概要を、表-1(a)に示す。

これによると、試験の対象は、 C_H 級より D_L 級(岩石間隙率で、 $n_c=5\%\sim 45\%$)にまで至り、これらは、試験坑別に異った物性値を示す。また、同一の地盤条件とみられる鉛直方向と水平方向の比較対象としたものは、厳密には必ずしも対応していないが、概ね類似のものとみなして比較検討した。

3. 試験の結果

原位置載荷試験より求めた変形係数D及び接線弾性係数Etを、表-1(b)に示す。

これによると、DとEtの関係、また載荷方向の関係等は、風化の程度によって異なり、かなり複雑なことが分かる。図-3は、同一試験の変形係数と接線弾性係数を示したものである。岩盤の場合、一般に Et/D は割れ目の多少によって異なり、この比を、割れ目係数にも称している。図-3によると、 Et/D は、概略12～40の範囲にあるが、風化の程度また、載荷方向によって異なるようにみられる。脈岩類(dk)及びC級岩($D\geq 3500\text{Kgf/cm}^2$)の場合、載荷方向にかかわらず、一般に、 $Et/D=20\sim 40$ の範囲にあり、割れ目の多少によって異なる傾向にあるとみられる。強風化岩の場合(D_H 級以下、 $D\leq 3500\text{Kgf/cm}^2$)は、載荷方向によって異なり、鉛直方向で、概ね $Et/D\leq 2.0$ 水平方向で、概ね $Et/D=20\sim 30$ となっている。このことは、割れ目方向以外の要因によるものと推察される。

次に、同一地点での載荷方向による変形係数(D_v, D_h)及び弾性係数(E_v, E_h)を比較したものを、図-4に示す。あわせて同一地点の試験を実線であつないだ。図は、載荷方向による、変形係数と弾性係数の大小、及び方向別弾性・変形係数比($=E_h/E_v \cdot D_h/D_v$)の多少を示したものである。図によると、風化の程度によって、傾向の異なることが分かる。弱風化岩(C_L 级以上 $D\geq 3500\text{Kgf/cm}^2$)及び脈岩の場合、一般に、 D_h/D_v

第 1 卷 1 (2) 武蔵野と足利

水	場所	試験断面方向	位置 出口(m)	土質等 (m)	橋長 距離(m)	橋区 分	断面 形状	断面 図	特性値
1	山口県 山口市	①1上水平	12.41	12.4	橋長 2.2m 2.2m	Ⅰ	Ⅰ-B	Ⅰ-B	(断面図参照) $\eta=37\%$
2		①1下水平	12.81	12.8	*	Ⅱ	Ⅱ-B	Ⅱ-B	$\eta=43\%$
2'		下断面	13.71	13.7	*	Ⅲ	Ⅲ-B	Ⅲ-B	$\eta=39\%$
3		②2上水平	9.08	9.1	*	Ⅳ	Ⅳ-B	Ⅳ-B	$\eta=37\%$
3'		②2上断面	8.98	8.98	*	Ⅴ	Ⅴ-B	Ⅴ-B	
4		②2下断面	11.68	11.5		Ⅵ	Ⅵ-B	Ⅵ-B	
5	山口県 山口市	LH-1-3 水平	70-71	26.0	橋長 2.52m	Ⅶ	Ⅶ-B	Ⅶ-B	(断面図参照) $\eta=31\%$ $\eta=34\%$
6		LH-1-4 水平	70-71	21.0	21.0m	Ⅷ	Ⅷ-B	Ⅷ-B	$\eta=32.4\%$
6'		LH-1-5 断面	79-80	21.0	*	Ⅸ	Ⅸ-B	Ⅸ-B	$\eta=32.4\%$
7	山口県 山口市	LH-1-6 水平	87-88	22.5	橋長 2.2m	Ⅹ	Ⅹ-B	Ⅹ-B	$\eta=32.5\%$
7'		LH-1-7 断面	88-89	22.5	*	Ⅺ	Ⅺ-B	Ⅺ-B	$\eta=32.5\%$
8		LH-1-8 水平	93-94	23.5	*	Ⅻ	Ⅻ-B	Ⅻ-B	$\eta=32.4\%$
8'		GM-3 断面	93-94	23.5		Ⅼ	Ⅼ-B	Ⅼ-B	$\eta=32.4\%$
9		LH-1-9 水平	30-31	11.0	*	Ⅽ	Ⅽ-B	Ⅽ-B	(断面図参照) $\eta=18.1\%$ $\eta=18.1\%$
9'		LH-1-10 断面	32-33	11.0		Ⅾ	Ⅾ-B	Ⅾ-B	$\eta=18.1\%$
10		LH-1-11 水平	33-34	13.0	*	Ⅿ	Ⅿ-B	Ⅿ-B	$\eta=18.1\%$
10'		LH-1-12 断面	30-37	15.0		ⅰ	ⅰ-B	ⅰ-B	$\eta=17.6\%$
11		LH-1-13 水平	27-28	16.0	*	ⅱ	ⅱ-B	ⅱ-B	$\eta=17.6\%$
11'		GM-2 断面	24-25	10.0	(橋長 2.2m)	ⅲ	ⅲ-B	ⅲ-B	$\eta=18.5\%$
12	東京都	LH-2-6 断面2	4-5	16.5		ⅳ	ⅳ-B	ⅳ-B	$\eta=15.5\%$
12'		LH-2-7 断面	3-4	12.0	24.0m	ⅴ	ⅴ-B	ⅴ-B	$\eta=15.5\%$
13		LH-4 断面2	8.0	17.0	*	ⅵ	ⅵ-B	ⅵ-B	$\eta=15.5\%$
13'		LH-1-1 断面1	1.5-2.5	11.0		ⅶ	ⅶ-B	ⅶ-B	$\eta=15.5\%$
13''		LH-3 断面2	0-1	15.5		ⅷ	ⅷ-B	ⅷ-B	$\eta=15.5\%$
13'''		LH-3 断面	4-5	16.5		ⅸ	ⅸ-B	ⅸ-B	$\eta=15.5\%$
14	山口県 山口市	H-1 水平断面	10.5	11.0	橋長 2.2m 2.2m	ⅹ	ⅹ-B	ⅹ-B	$\eta=15.5\%$
14'		H-2 断面	11.75	11.5	24.0m	ⅺ	ⅺ-B	ⅺ-B	$\eta=15.5\%$
15		H-3 水平断面	18.4	14.0	橋長 2.2	ⅻ	ⅻ-B	ⅻ-B	$\eta=15.5\%$
15'		H-3 断面	18.4	14.0		ⅼ	ⅼ-B	ⅼ-B	$\eta=15.5\%$
16		H-4 水平	23.2	18.0	*	ⅽ	ⅽ-B	ⅽ-B	$\eta=15.5\%$
16'		H-6 断面	2.2	16.0		ⅿ	ⅿ-B	ⅿ-B	$\eta=15.5\%$
17		H-2 水平	11.2	7.0	*	ⅿ	ⅿ-B	ⅿ-B	$\eta=15.5\%$
17'		H-2 断面	12.8	7.0		ⅿ	ⅿ-B	ⅿ-B	$\eta=15.5\%$
18		H-5 水平	25.5	21.0	*	ⅿ	ⅿ-B	ⅿ-B	$\eta=15.5\%$
18'		H-4 断面	25.2	20.5		ⅿ	ⅿ-B	ⅿ-B	$\eta=15.5\%$

— 一 — 東洋文庫の成立と発展

年	度 實 得 產 量 (kg/m^2)	國 產 量 (kg/m^2)	E_1/D	D_0/D_2	E_0/E_1	E_0/E_2	$\frac{D_0/D_2}{E_0/E_1} \cdot \frac{E_0/E_2}{D_0/D_2} \cdot \frac{E_0/E_2}{D_0/D_2}$ (kg/m^2)
1	248	742	3.07	0.57	1.73	2.58	
1'	310	442	1.43				
2	259	733	2.83	1.21	1.34	1.11	
2'	214	545	2.54				
3	338	586	1.73	2.94	2.65	0.90	
3'	221	392	1.92				
4	332	847	2.41	2.26	2.17	0.96	1.40 8.24
4'	156	360	2.50				1.73 1.90 1.21 1.14
5	512	1520	2.97	0.41	0.74	1.81	
5'	1240	2120	1.72				
6	1068	3550	3.39	0.58	1.00	1.72	
6'	1820	2580	1.97				
7	2080	3110	1.50	0.78	0.57	0.74	
7'	2680	5420	2.02				
8	1170	3130	2.67	0.89	0.95	1.07	0.60 1.29 1.27 2005
8'	1320	3260	2.48				
9	3620	10300	2.84	1.01	0.74	0.73	
9'	3570	14000	3.92				
10	3760	13500	3.59	0.57	1.17	1.75	
10'	5580	13200	2.32				
11	2580	10100	3.90	0.53	1.05	1.98	0.71 3.61 1.37 4670
11'	4880	9640	1.98				
12	1540	4566	2.96	0.57	0.97	1.44	
12'	2300	4700	2.05				
13	3190	7990	2.48	0.59	1.30	1.45	0.86 2.63 1.48
13'	3560	6080	1.70				
14	7820	16100	2.05	1.35	0.96	0.71	1.29 1.78 3140
14'	5800	18700	2.88				
15	8900	27800	3.12	1.37	1.88	1.37	
15'	6480	14800	2.28				
16	8600	30700	3.56	1.44	1.39	0.96	
16'	5970	22300	3.73				
17	9800	24000	2.52	1.45	1.03	0.71	
17'	6810	24200	2.55				
18	7600	22200	2.90	1.26	1.10	0.87	1.37 2.87 0.92 9250
18'	6210	22000	3.54				
19	6400	18400	2.5	0.65	0.88	1.35	
19'	9800	18700	1.9				
20	34400	36150	2.5	0.44	0.74	1.68	
20'	33570	48700	1.5				

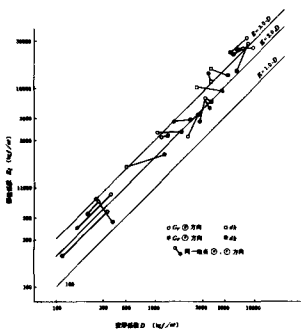


図-3 弾性係数の動的・静的比と弾性係数の比

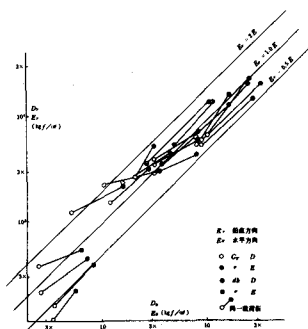


図-4 載荷方向による弾性係数の比と弾性係数の比

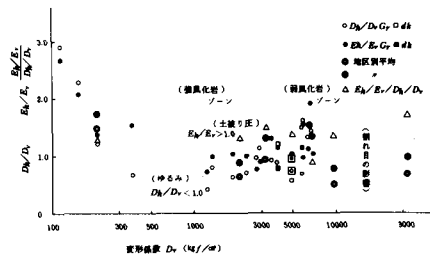


図-5 風化度による弾性係数の比と弾性係数の比の関係

は1.0前後か1より大、 E_h/E_v は1.0より大で、 $E_h/E_v/D_h/D_v=1.0$ 前後(グラフで45°前後)になっているようにみられる。強風化岩の場合は、一般に $D_h/D_v \leq 1.0$ で、 $E_h/E_v \geq 1.0$ で、 $E_h/E_v/D_h/D_v \geq 1.0$ となっているようにみられる。これらの傾向の違いの解釈について、次章で述べる。

4. 結果の解釈

前章の比較結果、弱風化岩と強風化岩では、載荷方向によって、変形特性挙動の明らかに異なることが分かった。弱風化岩の場合は、花崗岩であっても平面的層構造や割れ目方向に原因する岩盤の力学的異方性とみられるが、強風化岩の場合は割れ目間隔が広いかまた目立たない場合が多い。また、割れ目があっても、密着した割れ目がランダム方向に多数みられるものである。従って、割れ目方向以外と思われる異方性を示すものと推察され、例えば岩盤のゆるみの程度の違い、土被り圧の影響の違い等が考えられる。これらについて考察する。

(1) ゆるみの影響

横坑掘削による岩盤のゆるみの大きさは、一般に、天盤、側壁、底盤の順に生ずるものと考えられる。図-6は、横坑内の側壁及び底盤で測定した、弾性波探査による弾性波速度測定結果の一例である。これによると、側壁及び底盤とも、表層付近にゆるみ層(塑性領域と対応?)とみられる。第一速度層がえられている。このゆるみ層の厚さは、側壁部で0.5~2.0m、底盤部で0.3~1.2mとなっており、前者のゆるみ量が大きくかつ起伏の激しいことが分かる。またゆるみ層の動弾性係数 E_d も小さい傾向にある。ゆるんでないことを示すと考えられる第2層の速度値より求めた動弾性係数は、第1層のものや載荷試験より求めた弾性係数よりかなり大きい値を示す。この表層付近のゆるみの状況は、載荷板直下のボーリング孔を利用した速度検層(V_p, V_s)及び埋設孔での歪の実測値と理論値との比較によっても確かめられた。図-7及び図-8は、その一例で、これよりも、掘削に伴う応力開放によって、坑壁付近のゆるみ、塑性領域の発達のみ

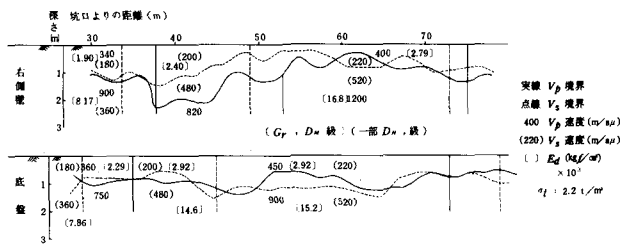


図-6 横坑内弾性波探査結果(生口島早瀬、42)

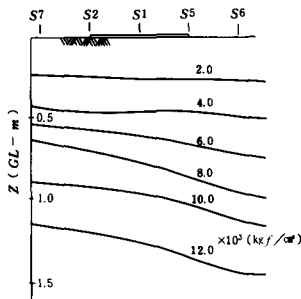


図-7 速度検層による E_d 分布図

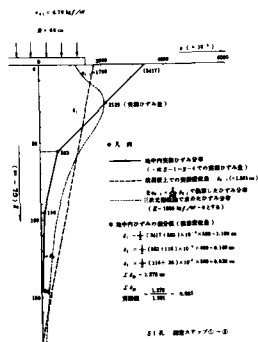


図-8 弾性波探査による弾性係数の比と弾性係数の比の関係

られ、それも側壁部の方が底盤部よりゆるみやすいことが確かめられたとみられる。このため Dh/Dv が、1.0 より小さくなるとみられ、この傾向は風化がすすむほど顕著で、強風化岩の場合、 Dh/Dv は、ゆるみ係数的な意味合いをもつと考えられる。

(2) 土被り圧の影響

多孔質材料、き裂質材料の場合、拘束圧による変形性への影響が知られている。風化花崗岩の場合も、砂質土と似た粒状材料とみられるが、同様に拘束圧依存性が確かめられている。これらの関係は、 $Ei = k \cdot Pa \{ \sigma'_c / Pa \}^m$ (Kg/cm^2) (ここに Ei : 初期接線係数、 Pa : σ'_c と同次元をもった大気圧、 σ'_c : 拘束圧、 k, m : 無次元材料定数) で示され、D 級岩石資料で、 $k = 42 \sim 330$ 、 $m = 0.82 \sim 1.0$ がえられている。この m は、拘束圧効果を示す。横坑掘削前の横坑地点周辺の初期応力の推定は、測定を行っていないので難しく、また横坑掘削に伴う応力開放の影響の程度も不明であるが、概略、次のように推定する。

$$\text{横坑掘削前の初期拘束圧 } \sigma_{m0} = \frac{1}{3} \cdot (1 + 2k_0) \cdot \gamma_t \cdot Z \quad (1)$$

$$\text{載荷板鉛直面下の拘束圧 } \sigma_{mv} = \frac{1}{3} \cdot (Z_1 + 2k_0 Z) \cdot \gamma_t \quad (2)$$

$$\text{載荷板水平面下の拘束圧 } \sigma_{mh} = \frac{1}{3} \cdot \{ (1 + k_0) Z + k_0 Z_1 \} \cdot \gamma_t \quad (3)$$

(ここに、 σ_m : 平均拘束圧、 k_0 : 静止土圧係数、 Z : 土被り厚さ、 Z_1 : 載荷板下平均拘束圧付近の深さ、 γ_t : 密度)。これより、 $\gamma_t = 2.0 \text{ t/m}^3$ 、 $Z_1 = 0.60 \text{ m}$ として、 $Z = 10 \text{ m}$ と 20 m の場合の拘束圧及び σ_{mh}/σ_{mv} の値を求めると、図-9、及図-10を得る。この試算結果より、ポアソン比を $0.3 \sim 0.4$ 程度とし、先述の拘束圧効果を示す m を 0.90 程度とみなすと、 Eh/Ev は、 $1.2 \sim 1.4$ 程度を示すことになる。

実測値には、かなりのばらつきはあるが、強風化岩の場合は、一般に、 Eh/Ev は、 $1.1 \sim 1.7$ の値を示した。なお、割れ目等の影響も含まれるので、 $Eh/Ev/Dh/Dv$ の関係で示すと、1.0 より大きくなる。この比は、ゆるみの影響と土被り圧の影響の両者を表すもので、強風化岩の場合の載荷方向による異方性の程度を表すものと考えられる。載荷方向で割れ目の影響の異なる場合は、一般に、 Dh/Dv 及び Eh/Ev も 1.0 より大きいのか小さいのかの何れと思われ、とくに、 $Dh/Dv < 1.0$ は、ゆるみの影響、 $Eh/Ev > 1.0$ は、土被り圧の影響によると考えると、これらの比較によって、割れ目方向以外の要因による異方性を示唆することができる。

5. まとめ

本報告は、局部的に不均質とみられる風化花崗岩の原位置試験結果の比較検討であり、定量的なものではないが、強風化花崗岩の場合の載荷方向による変形特性の異方性の影響程度を示唆するものと考えられる。

載荷試験は、一般に調査坑内において鉛直方向で行われ、半無限地盤として弾性解より解かれるが、強風化岩の場合は、ゆるみの程度、また土被り圧の影響の程度を当然考慮すべきものと考えられる。このためには、初期応力の測定、また横坑掘削によるその変化の測定、及び試験時の地中内歪実測によるゆるみの評価、土被り圧の影響程度の評価が必要と思われる。また、載荷方向による異方性についても、施工時の掘削形状によっても生ずるものとみなして、今後検討すべき課題と思われる。

参考文献

- 1) Serafim, J. L. : Rock mechanics consideration in the design of concrete dams, state of stress in Earth's Crust, PP, 661~650, 1964.
- 2) 赤井浩一他: 風化花崗岩の支持力特性の検討、(本四公団委託研究, 防災研究会), 1976.
- 3) 土質工学会編: 風化花崗岩とまき土の工学的性質とその応用, 土質工学会, 1979.
- 4) 本州四国連絡橋公団: 尾道~今治地区海峡部地質調査報告書(その3~その18), 1972~1981.

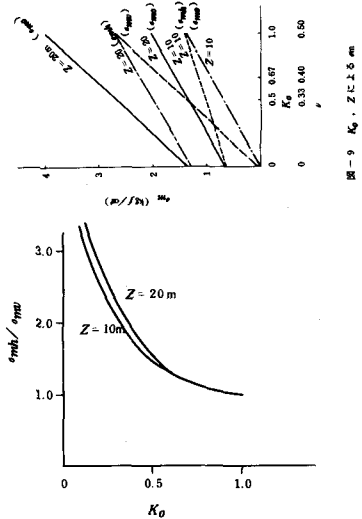


図-10 K_0 、土被り厚さによる σ_{mh}/σ_{mv}

Anisotropy of Deformation Property by Loading Direction of In Site Tests
- in the Case of Weathered Granite -

Chuo Kaihatsu Corp.

Koji, Ishikawa

Honshu Shikoku Bridge Authority

Keiji, Miyajima

In this paper we describe the anisotropy of deformation property of different loading direction by in-situ test, in the case of weathered granite.

We carried out the plate loading tests in vertical direction and horizontal direction in the test pits and calculated the deformation modulus and tangential elastic modulus and then investigated the results of two different loading direction.

The summaries of results are followed.

- 1) In the case of heavy weathered rocks which have few cracks, the values of deformation modulus and the elastic modulus of different direction were different.
- 2) The anisotropy of deformation property was occurred by the reason except the direction of cracks of rock masses. It seems that the direction of crack of rock masses doesn't affect the anisotropy of deformation property of loading direction.
- 3) One of the reasons is the effect of open stress or looseness by the drilling of test adits.
The degree of looseness of the side wall of test adit is larger than that of the bottom wall. Then, the ratio of both deformation modulus, D_h/D_v is smaller than 1.0.
- 4) Other reason is the effect of over burden pressure (initial confining pressure). In general, the confining pressure under the load plate, in the elastic state, of side wall is larger than that of bottom wall. And then, the ratio of both elastic modulus E_h/E_v is from 30% to 50% larger than 1.0.
- 5) D_h/D_v , the ratio of deformation modulus represents the degree of looseness effect of loading direction. E_h/E_v , the ratio of elastic modulus represents the degree of effect of over burden pressure.
- 6) $E_h/E_v/D_h/D_v$ ($= E_h/D_h/E_v/D_v$) the ratio of deformation modulus and elastic modulus of each loading direction represent the degree of anisotropy of loading direction. In the case of weathered rocks it is between 2.5 and 1.0. The more the weathering goes, the larger it becomes.
- 7) In the case of weathered rocks, we must pay the attention to the anisotropy, which is the looseness and the over burden pressure, besides the direction property of crack of rock masses.