

近畿地方における軟岩・風化岩斜面の強度特性

Shear Strength Characteristics of Soft Rocks and Weathering Rocks in Kinki District

西 勝 (にし まさる)

神戸大学教授 工学部建設学科

沖 村 孝 (おきむら たかし)

神戸大学教授 都市安全研究センター

南部 光 広 (なんぶ みつひろ)

応用地質(株)関西事業本部企画部 部長

藤 村 等 (ふじむら ひとし)

(株)阪神コンサルタンツ神戸支店調査2部調査課 課長

1. はじめに

(株)建設コンサルタンツ協会近畿支部「軟岩斜面の安定研究委員会」では研究の一環として、近畿地方における地すべり・斜面崩壊の調査を行い、各種要因・形態の分析を実施してきた¹⁾。本報文は過去に崩壊、変状のあった斜面を対象として、逆算法で求められた強度定数(c ; 粘着力, ϕ ; 内部摩擦角)について整理し、考察を加えたものである^{2),3)}。

近畿地方における地質の分布は、第三紀層、中生層、花崗岩類などに大別されることから、各地層ごとに「地すべり」と「斜面崩壊」とに分けてデータを集約した。ここで「地すべり」と「斜面崩壊」との区別については、山田ら⁴⁾が示した比較表を参考にして、移動土塊の速度が緩慢であり、土塊の乱れが少なく、原形を保ちつつ動いているものを「地すべり」、移動土塊の速度が速く、土塊の乱れが激しいために、崩壊後、当初土塊の原形をとどめないものを「斜面崩壊」とした。

2. データの概要

得られたデータのうち、第三紀層は砂岩・泥岩と火成岩・凝灰岩とに大別し、北部地区を代表する北但層群、中部地区を代表する神戸層群、南部地区を代表する牟婁層群に分けて、それぞれデータを整理した。表—1に第三紀層の調査データ数を示す。これによると砂岩・泥岩のデータが全体の86%を占め、火成岩・凝灰岩はデータ数が6例と少ない。このことは砂岩・泥岩に比べて、火成岩・凝灰岩の発生事例が少ないことを暗示している。崩壊のタイプ別特徴で見ると、北但層群ならびに牟婁層群の砂岩・泥岩では斜面崩壊が多いのに対して、神戸層群では地すべりが多い。

中生層における地すべり、斜面崩壊を丹波帯、三波川帯、和泉帯、舞鶴帯の各地層ごとに整理した。表—2にそれぞれのデータ数を示す。丹波帯が全体の67%を占めている。崩壊のタイプ別特徴を見ると、丹波帯では斜面崩壊が多く、三波川帯、和泉帯では地すべりの方が多くなっている。

表—3に花崗岩類の内訳を示す。今回収集したデータは、すべてが斜面崩壊であった。風化区分別では、土砂状風化層が24例、軟岩Ⅰ・亀裂岩盤が21例で、ほぼ同

表—1 第三紀層のデータ内訳表

地 質	地 層	データ数 (箇所)			データの構成比 (%)
		地すべり	斜面崩壊	計	
砂岩, 泥岩	北但層群	2	4	38	86
	神戸層群	12	8		
	牟婁層群	2	7		
	その他	1	2		
火成岩, 凝灰岩	北但層群	1	2	6	14
	神戸層群	1	0		
	牟婁層群	0	0		
	その他	2	0		
計		21	23	44	100

表—2 中生層のデータ内訳表

地 質	データ数 (箇所)			データの構成比 (%)
	地すべり	斜面崩壊	計	
丹波帯	11	24	35	67
三波川帯	6	1	7	13.5
和泉帯	6	1	7	13.5
舞鶴帯	0	3	3	6
計	23	29	52	100

表—3 花崗岩類のデータ内訳表

風化区分	データ数 (箇所)	データの構成比 (%)
土砂状風化層	24	53
軟岩Ⅰ・亀裂岩盤	21	47
計	45	100

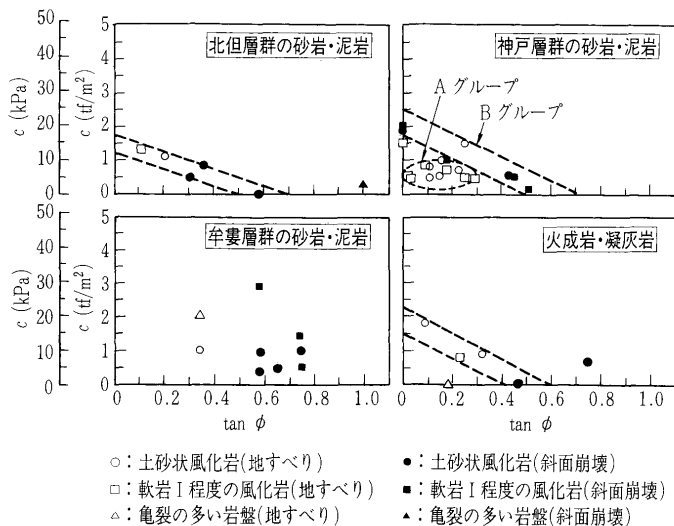
じ割合であった。

3. 強度特性

すべり面の平均的な強度を求めるのに逆算法が使われているが、用いられている計算式はほとんどが簡便法(分割法, 修正フェレニウス法を含む)であった。このことは道路土工指針はじめ各機関において採用されている安定解析式がほとんど簡便法であることによるものと思われる。

3.1 第三紀層

各層の強度を土砂状風化岩, 軟岩Ⅰ程度の風化岩, 亀裂の多い岩盤に区分してプロットしたものを図—1に示

図-1 第三紀層 風化区分別の c - $\tan \phi$ 図

す。集約した値は広範囲に分布しているが、その中でもいくつかの特徴が認められる。それらをまとめると以下のようになる。

(1) 砂岩・泥岩

北但層群において地すべり、斜面崩壊の両データを合わせて見ると、右下がりの直線的な傾向が認められる。すなわち、 $\tan \phi = 0$ で $c = 1.2 \sim 1.8 \text{ tf/m}^2$ (11.8~17.6 kPa) と $c = 0 \text{ tf/m}^2$ (0 kPa) で $\tan \phi = 0.50 \sim 0.70$ を結ぶ範囲内に分布している。崩壊のタイプ別に見ると、地すべりでは c が $1.1 \sim 1.3 \text{ tf/m}^2$ (10.8~12.7 kPa), $\tan \phi$ が $0.11 \sim 0.21$ であるのに対して、斜面崩壊では c が $0 \sim 0.8 \text{ tf/m}^2$ (0~7.8 kPa), $\tan \phi$ が $0.31 \sim 1.00$ となっており、地すべりでは斜面崩壊に比べて ϕ の値が小さく、 c の値が大きく表れていた。

神戸層群では大きく二つのグループに分けられる。すなわち、 $c = 0.5 \sim 1.0 \text{ tf/m}^2$ (4.9~9.8 kPa) で $\tan \phi = 0 \sim 0.30$ のグループ (これを「A グループ」と称す) と $\tan \phi = 0$ で $c = 1.7 \sim 2.5 \text{ tf/m}^2$ (16.7~24.5 kPa) と $c = 0 \text{ tf/m}^2$ (0 kPa) で $\tan \phi = 0.50 \sim 0.70$ を結ぶ範囲内に分布するグループ (これを「B グループ」と称す) に分けられる。A グループの例は神戸層群特有の層状弱面に沿った地すべりであり、すべり面の勾配も $5 \sim 15^\circ$ と緩いものが多い。これに対して B グループの例は斜面崩壊に分類されるものが多く、すべり面の勾配は $25 \sim 40^\circ$ と急であった。B グループの範囲内に入っている地すべりのデータで $c = 1.5 \text{ tf/m}^2$ (14.7 kPa), $\tan \phi = 0.25$ ($\phi = 14^\circ$) と A グループに比べて大きい値を示しているものがあるが、これは受け盤斜面での値であった。これに対して A グループに属する地すべりはすべて流れ盤斜面のデータであった。

神戸層群の強度と北但層群の強度を比べて見ると、神戸層群 B グループの値は北但層群の値に近い値を示しているのに対して、神戸層群 A グループの値は、北但層群に比べるとかなり小さい値を示していることが特徴的である。データ数が比較的多い神戸層群のデータを風化区分別に見てみると、A, B 両グループとも土砂状風

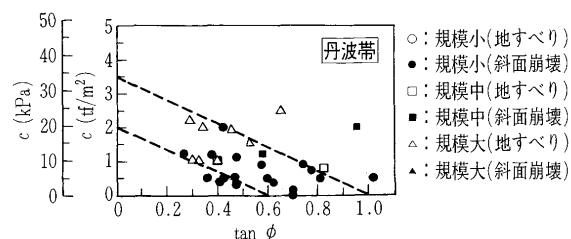
化岩と軟岩 I 程度の風化岩との強度差は必ずしも明りょうでない。

崩壊規模別の強度特性を調べるため、崩壊層厚が $0 \sim 6 \text{ m}$ のものを「規模小」、 $6 \sim 10 \text{ m}$ のものを「規模中」、 10 m 以上のものを「規模大」として、規模別にプロットしたものを図-2 に示す。この図によると A グループでは、規模の大小による強度差はほとんど認められない。このことは層状弱面の強度が深度にあまり関係せず、深い位置に存在していても強度があまり大きくないことを物語っている。一方、B グループではデータが少なく判然としない面が強い。

次に、牟婁層群では地すべりで $c = 1.0 \sim 2.0 \text{ tf/m}^2$ (9.8~19.6 kPa), $\tan \phi = 0.34$, 斜面崩壊で $c = 0.4 \sim 3.0 \text{ tf/m}^2$ (3.9~29.4 kPa), $\tan \phi = 0.58 \sim 0.75$ の範囲内に分布しており、北但層群、神戸層群に比べて全般に大きな値を示している。しかし、 c - $\tan \phi$ の関係には一定の傾向が認められなかった。

(2) 火成岩・凝灰岩

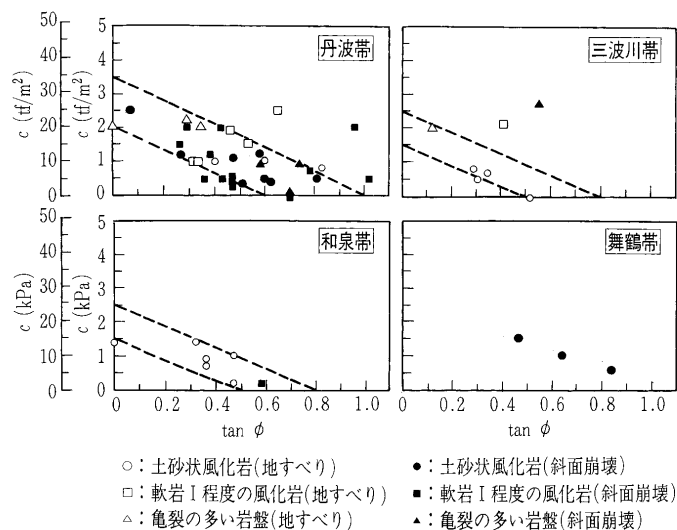
一部特異な値を示しているものもあるが、全般に北但層群の砂岩・泥岩や神戸層群砂岩・泥岩 B グループと同じように右下がりの直線的な傾向が認められる。すなわち、 $\tan \phi = 0$ で $c = 1.5 \sim 2.3 \text{ tf/m}^2$ (14.7~22.5 kPa) と $c = 0 \text{ tf/m}^2$ (0 kPa) で $\tan \phi = 0.40 \sim 0.60$ とを結ぶ範囲内に分布している。ここで 1 事例 $c = 0.7 \text{ tf/m}^2$ (6.9 kPa), $\tan \phi = 0.75$ と大きい値を示しているものがあるが、これは安山岩の斜面崩壊データであり、ほかはすべて凝灰岩もしくは凝灰角礫岩のデータであった。

図-2 神戸層群 崩壊規模別の c - $\tan \phi$ 図

3.2 中古生層

中古生層の c - $\tan \phi$ 図を図-3 に示す。地すべり、斜面崩壊の両データを合わせて見ると、丹波帯では数事例で大きな値を示しているものもあるが、それらを除くとほぼ直線的な分布範囲に入っている。すなわち強度値は $\tan \phi = 0$ で $c = 2.0 \sim 3.5 \text{ tf/m}^2$ (19.6~34.3 kPa) と $c = 0 \text{ tf/m}^2$ (0 kPa) で $\tan \phi = 0.60 \sim 1.00$ と結ぶ範囲内にはほぼ分布している。地すべりと斜面崩壊との比較では、 c の値が地すべりでは 0.7 tf/m^2 (6.9 kPa) 以下のものが存在しないのに対して、斜面崩壊では 0.7 tf/m^2 (6.9 kPa) 以下のものも存在している。一方、 $\tan \phi$ の値は地すべりで 11 事例中 9 事例が 0.60 以下であるのに対して、斜面崩壊では 0.60 以下のものが 24 事例中 16 事例と比率が低くなっている。

風化区分別では、地すべりで土砂状風化岩のデータが少ないのに対して、斜面崩壊ではあらゆる風化区分で発

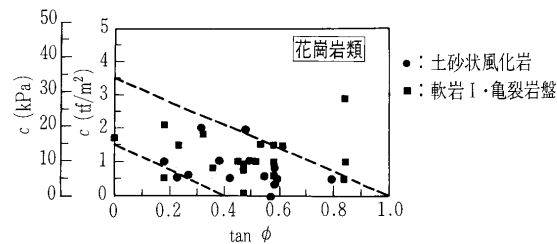
図—3 中生層 風化区分別の c - $\tan \phi$ 図

生している。地すべりで1事例 $c=2.5 \text{ tf/m}^2$ (24.5 kPa), $\tan \phi=0.65$ と大きい値を示しているデータは、受け盤斜面でのデータであり、ほかの地すべりのデータは流れ盤斜面でのデータであった。また、斜面崩壊で $c=2.0 \text{ tf/m}^2$ (19.6 kPa), $\tan \phi=0.96$ と1点大きい値を示しているのは、崩壊層厚が7mと斜面崩壊の中では比較的規模が大きく、すべり面の勾配も50°と急なものであった。逆算で求められる強度は崩壊時の安全率を0.95~1.00として求めているので、崩壊時のすべり面勾配が急であれば $\tan \phi$ が大きく、崩壊層厚が厚ければ c が大きく表れることになる。この事例では斜面勾配が急であり、崩壊層厚も厚かったために、 c , $\tan \phi$ とも大きな値となっていた。

三波川帯では地すべりのデータがほとんどであり、一部大きい値を示すものもあるが、大半は $\tan \phi=0$ で $c=1.5 \sim 2.5 \text{ tf/m}^2$ (14.7~24.5 kPa) と $c=0 \text{ tf/m}^2$ (0 kPa) で $\tan \phi=0.50 \sim 0.80$ とを結ぶ範囲内に分布している。和泉帯も地すべりのデータが多く、同様な範囲内に分布している。舞鶴帯ではデータ数が少なく判然とはしないが、土砂状風化岩の斜面崩壊3例について見ると、多少右下がりの傾向が認められる。

次に、丹波帯、三波川帯、和泉帯のデータを比べてみると三波川帯、和泉帯では土砂状風化岩で地すべりのデータが多く、ほぼ同程度の強度 ($\tan \phi=0$ で $c=1.5 \sim 2.5 \text{ tf/m}^2$ (14.7~24.5 kPa) と $c=0 \text{ tf/m}^2$ (0 kPa) で $\tan \phi=0.50 \sim 0.80$ とを結ぶ範囲内の値) を示すのに対して、丹波帯地すべりでは軟岩 I 程度の風化岩もしくは亀裂の多い岩盤でも発生しており、強度も $\tan \phi=0$ で $c=2.0 \sim 3.5 \text{ tf/m}^2$ (19.6~34.3 kPa) と $c=0 \text{ tf/m}^2$ (0 kPa) で $\tan \phi=0.60 \sim 1.00$ とを結ぶ範囲内に分布し、上述した両層に比べてやや大きい傾向にある。一方、斜面崩壊は丹波帯で多く発生しており、三波川帯、和泉帯では少ない。

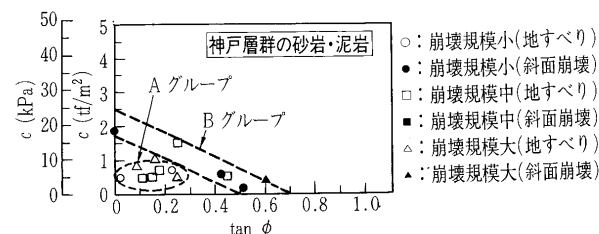
図—4 にデータ数の多い丹波帯の規模別 c - $\tan \phi$ 図を示す。丹波帯の斜面崩壊は、規模の小さいものが多いのに対して、地すべりではすべてが規模中~大となってい

図—4 中生層 崩壊規模別の c - $\tan \phi$ 図

る。斜面崩壊のデータに着目すると、規模中のものが規模小のものより図中に示す右下がりの範囲内において、多少右上方に分布しており、強度が大きく表れる傾向にある。地すべりでも規模大のものが規模中のものより多少右上方に分布し、強度が大きな値を示す傾向にある。

3.3 花崗岩類

花崗岩類の c - $\tan \phi$ 図を図—5 に示す。同図に示したデータはすべて斜面崩壊のデータである。それによると値は広範囲に分布しているが、一部のデータを除くと、第三紀層、中生層の場合と同様、右下がりの傾向が認められる。すなわち、 $\tan \phi=0$ で $c=1.5 \sim 3.5 \text{ tf/m}^2$ (14.7~34.3 kPa) と $c=0 \text{ tf/m}^2$ (0 kPa) で $\tan \phi=0.40 \sim 1.00$ とを結ぶ範囲内に分布している。風化区分別に見てみると、軟岩 I・亀裂岩盤の強度は土砂状風化岩の強度よりも右下がりの範囲内において右上方に分布するものが多く、強度が多少大きく表れる傾向にある。

図—5 花崗岩類の c - $\tan \phi$ 図

4. 既往資料との比較

神戸層群のせん断強度については、中村ら⁵⁾、幸左ら⁶⁾、谷本ら⁷⁾、池尻ら⁸⁾が発表したものがあるが、それらをまとめたものを表—4 に示す。今回のアンケート結果と比較すると、図—1 に示す神戸層群 A グループでの値 ($c=0.5 \sim 1.0 \text{ tf/m}^2$ (4.9~9.8 kPa), $\tan \phi=0.10 \sim 0.30$ ($\phi=6 \sim 17^\circ$)) が、これらの値に近い値となっている。

表—5 は「道路土工指針」のり面工・斜面安定工指針⁹⁾に示されている風化岩地すべりのすべり面強さである。ここで、北但層群、神戸層群、牟婁層群は新~古第三紀層相当であることから、同表によると $c=0 \sim 2.5 \text{ tf/m}^2$ (0~24.5 kPa), $\phi=12 \sim 25^\circ$ となる。アンケート調査結果と比較すると神戸層群における地すべりのデータである A グループの値は、同表値よりも小さいことがわかる。

中生層では、表—5 によると、強度値は $c=0 \sim 1.0$

表—4 既往文献による神戸層群のせん断強度^{5)~8)}

	c	ϕ
中村ら ⁵⁾	0.5 tf/m ² [4.9 kPa]	13~16°
	1.0 tf/m ² [9.8 kPa]	9~13°
幸左ら ⁶⁾	0.46 tf/m ² [4.5 kPa]	13.54°
谷本ら ⁷⁾	1.05 tf/m ² [10.3 kPa]	11.3°
池尻ら ⁸⁾	0.5 tf/m ² [4.9 kPa]	12.5°

表—5 風化岩のすべり面強さの範囲⁹⁾

風化岩の種類		粘着力 $\bar{c}$	せん断抵抗角 $\bar{\phi}$
変成岩		0~0.2 tf/m ² (0.1 tf/m ²) [0~2.0 kPa (0.1 kPa)]	20~28° (26°)
火成岩		0 tf/m ² (0 tf/m ²) [0 kPa (0 kPa)]	23~36° (29°)
堆積岩	古 生 層	0~0.4 tf/m ² (0 tf/m ²) [0~3.9 kPa (0 kPa)]	23~32° (29°)
	中 生 層	0~1.0 tf/m ² (0.5 tf/m ²) [0~9.8 kPa (4.9 kPa)]	21~26° (24°)
	古第三紀層	0~2.0 tf/m ² (0.7 tf/m ²) [0~19.6 kPa (6.9 kPa)]	20~25° (23°)
	新第三紀層	0~2.5 tf/m ² (2.0 tf/m ²) [0~24.5 kPa (19.6 kPa)]	12~22° (12.5°)

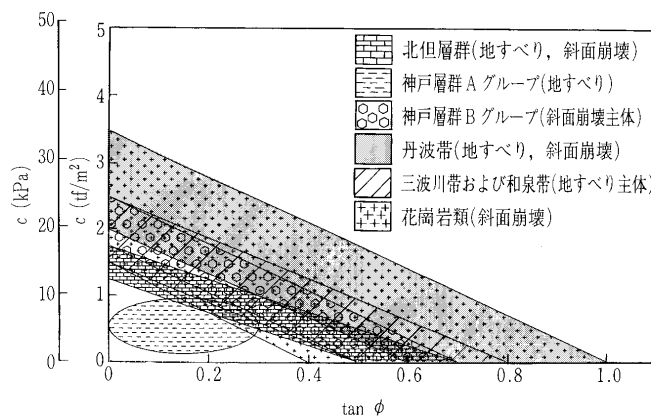
() は平均値を示す。

tf/m² (0~9.8 kPa), $\phi=21\sim32^\circ$ であるが、これと今回のアンケート調査結果を比べると丹波帯地すべりでは、 ϕ 値の中心的な分布域が16~33°と同表値を含む状態で、広範囲に分布しているのに対して、 c の値は1.0~2.5 tf/m² (9.8~24.5 kPa) と同表値よりも多少大きい値を示していた。一方、三波川帯や和泉帯地すべりでは、 ϕ の値が17~27°, c の値が0~1.4 tf/m² (0~13.7 kPa) と同表値に近い値を示しているものが多かった。

5. ま と め

図—6 に各地層の強度分布範囲を一覧図として示した。同図とこれまで述べた結果より各地層別の強度特性をまとめると以下のようになる。

- ① 第三紀層では北但層群 (地すべり, 斜面崩壊), 神戸層群 B グループ (斜面崩壊主体), 火成岩・凝灰岩 (地すべり主体) の値は $\tan \phi=0$ で $c=1.3\sim2.3$ tf/m² (12.7~22.5 kPa) と $c=0$ tf/m² (0 kPa) で $\tan \phi=0.40\sim0.70$ とを結ぶ範囲内に分布しており, 各層ともほぼ同程度の値を示している。
- ② 神戸層群中の地すべりは層状弱面の影響を受けて, $c=0.5\sim1.0$ tf/m² (4.9~9.8 kPa), $\tan \phi=0\sim0.30$ ($\phi=0\sim17^\circ$) とほかの地層に比べて小さい値を示している。
- ③ 牟婁層群は地すべり, 斜面崩壊ともほかの第三紀層に比べると大きい強度を示している。
- ④ 中古生層である三波川帯 (地すべり主体), 和泉帯 (地すべり主体) の強度は, ①で述べた第三紀層



図—6 各地層の強度分布範囲一覧図

強度と同程度の値を示している。

- ⑤ 丹波帯地すべりは, 軟岩 I 程度の風化岩や亀裂の多い岩盤でも発生しており, 三波川帯や和泉帯地すべりに比べると大きい強度値を示すものが多い。
- ⑥ 中古生層の斜面崩壊は丹波帯で多く発生しているが, 強度値は第三紀層に比べると大きい値を示すものが多い。
- ⑦ 花崗岩類のデータは斜面崩壊だけであり, 土砂状風化岩に比べると軟岩 I, 亀裂岩盤の強度値が多少大きく表れる傾向にある。

最後に軟岩斜面の安定研究委員会委員各位に深く感謝するとともに, 本成果が斜面安定に従事する技術者の参考資料となり, 各種事業における災害防除に役立てば幸甚の至りである。

参 考 文 献

- 1) ㈱建設コンサルタンツ協会近畿支部: 近畿地方における斜面安定検討の手引き, pp. 123~149, 1996.
- 2) 西 勝・南部光広・福田 雅・市川千尋: 軟岩斜面の安定研究委員会: 近畿地方における第三紀層の強度特性, 第31回地盤工学研究発表会講演集, pp. 2057~2058, 1996.
- 3) 沖村 孝・藤村 等・金子義信・檜山悦一・丹田雄次郎・軟岩斜面の安定研究委員会: 近畿地方における軟岩斜面の強度特性—花崗岩類・中古生層—, 第31回地盤工学研究発表会講演集, pp. 2055~2056, 1996.
- 4) 山田剛二・渡 正亮・小橋澄治: 地すべり斜面崩壊の実態と対策, 山海堂, p. 6, 1971.
- 5) 中村潤一・納庄隆雄: 第三紀層 (神戸層) における斜面崩壊, 第23回土質工学研究発表会講演集, pp. 1761~1762, 1989.
- 6) 幸左賢二・徳林宗孝: 北神戸線における地すべりについて, 平成2年度土木学会関西支部年次学術講演会講演集, pp. III-30-1~III-30-2, 1990.
- 7) 谷本喜一・池尻勝俊: 神戸層群のせん断特性, 第27回土質工学研究発表会講演集, pp. 1925~1928, 1992.
- 8) 池尻勝俊・谷本喜一: 神戸層群の地すべり粘土のせん断強度について, 第28回土質工学研究発表会講演集, pp. 2183~2186, 1993.
- 9) ㈱日本道路協会: 道路土工指針—のり面工・斜面安定工指針, 丸善, pp. 274, 1986.

(原稿受理 1998.7.27)