

風化花崗岩における現場せん断試験の試みと結果について

A trial for in-situ shear test on weathered granite and its result

齋藤長太郎* (Chotaro Saito)

山崎幸男* (Yukio Yamazaki)

本事例では、乱さない試料の採取が困難とされている風化花崗岩のせん断強度を比較的簡単な現場一面せん断試験で求めることを試みた。試験は、岩質区別に実施し、合わせて現場回転せん断試験およびブロックサンプルによる室内三軸圧縮試験を実施して比較検討を行った。

試験結果から以下のような諸点が明らかになった。

- (1) DL～DH級の風化花崗岩では、現場一面せん断試験結果と現場回転せん断試験およびブロックサンプルによる室内三軸圧縮試験結果のせん断抵抗が比較的良く一致している。
- (2) CL級以上の風化花崗岩では、現場回転せん断試験およびブロックサンプルによる室内三軸圧縮試験は適用できず、せん断抵抗は現場一面せん断試験によって求めた。
- (3) 現場一面せん断試験の結果から、DL～CL級の風化花崗岩のせん断抵抗は、最小二乗法によるモール・クーロン式により求めた。

キーワード：現地調査，原位置試験，試験方法，直接せん断試験，特殊土 (IGC:C-8, F-6)

1. まえがき

都市部の地価高騰および良質な宅地不足に伴い、宅地開発は都市郊外の丘陵地・山岳地に延びてきている。開発の対象地域が急傾斜地であっても、最近の土木・建築の施工技術の発展により土地の有効利用されることが多くなってきている。

斜面地の利用は、地価が平坦地に比較して低廉であることや自然環境に恵まれているなどの利点もあるが、その反面、平坦地に比べて地盤の安定性という点では地形・地質的に不安定な要素が多く内在している。したがって、斜面上に建築物を建設する場合は、建築構造物の安定を検討するほかに建築物を含めた斜面地全体の安定を検討する必要がある。正確な地形・地質条件を把握した上での入念な建築計画の立案および設計・施工が要求される。

本稿では、広島地域の風化花崗岩の斜面地に計画された中高層建築物の基礎地盤調査のうち、風化花崗岩の強度定数 (c , ϕ) を簡易に求める現場一面せん断試験について述べるとともに、同一地盤で実施した現場回転せん断試験、室内三軸圧縮試験結果との比較検討も行った。

従来から風化花崗岩 (DL～CL級) は、ボーリング孔を利用した任意の深度での乱さない試料の採取が困難であるため、造成前に基礎底面付近での強度定数を把握するにはN値および孔内水平載荷試験から得られた変形係数から間接的に推定する手法を用いていることが多い。仮に造成前に強度定数が把握できたとしても、風化花崗岩の場合は造成後に地表に露出すると上載荷重の減少 (応力解放)、大気による酸化作用、雨水による浸食のため急激にその性質が変化することが知られているので、造成前に調査・試験した値を設計採用値として用いることは危険側の値となる可能性がある。そのため、直接基礎の場合などは可能な限り造成後 (切土後) に、しかも基礎底面付近の位置で地盤の強度定数を確認し、当初計画した設計値を見直すことが必要である。特に、風化花崗岩地帯の斜面地に計画される建設構造物の場合は重要と思われる。切土後における基礎底面付近での調査・試験は、簡易で早く、費用も安価で、しかも精度上問題のない方法が望ましい。

現状での現場せん断試験方法は、土木学会の「原位置岩盤の変形およびせん断試験の指針—解説と設計への適用—」¹⁾が標準的に扱われている。

* 株式会社東京ソイルリサーチ広島支店

しかし、これらの試験方法は試験装置や器具が大掛かりなので、時間と費用がかかり、一般的にはなかなか実施されにくいのが実情である。

今回、筆者らは広島市郊外の造成地で風化花崗岩を対象として、簡易な現場一面せん断試験機を用いて地盤の強度定数を求める試みを行ったので、ここに紹介する。

2. 現場一面せん断試験

2. 1 せん断試験装置

せん断試験装置はせん断試験機と載荷装置などからなる。せん断試験機は図-1に示すように①上部せん断箱②下部せん断箱および③加圧板の3部分から構成されている。

上部せん断箱は供試体の上半部を納めて、水平方向にせん断応力が加えられてスライドするようになっている。この際、上下部のせん断箱間の間隔が一定になるように直径50mmのガイドローラーを4個設けている。

下部せん断箱は供試体の下半部を納めかつ、供試体が原位置から移動しないように地盤面に固定する役割をもっている。地盤に固定するためのピンを打つために、下部せん断箱の4隅には直径18mmの穴を開けてある。上部・下部せん断箱は厚さ9mmの鋼鉄製である。

加圧板は供試体に垂直荷重を加えるためのもので、上下2枚の鋼鉄製の板とローラーからなる。加圧板の厚さは上部が9mm、下部が18mmである。上下の加圧板の間のローラーは、せん断に伴い上部せん断箱がスライドしても垂直荷重が供試体に加わるよう上下の加圧板が滑らかにスライドするようにするためのもので、直径10mmの鋼球を49個設けている。

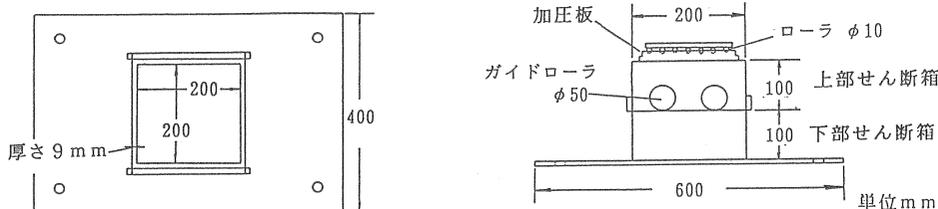


図-1 せん断試験機

載荷装置は垂直・水平荷重用とも油圧ジャッキを使用した。

測定装置は、垂直および水平変位量の測定には変位計、垂直および水平荷重の測定にはロードセルを使用した。また、反力として、垂直方向はミニバックホーあるいはスウェーデン式サウンディング用のおもり、水平方向は掘削地盤に超速硬セメントを打設した平板を使用した。

2. 2 試験方法

せん断試験は供試体作成、試験装置のセットおよび測定の手順で行われる。次に試験の順を追って説明する(図-2参照)。なお、本試験はせん断箱の剛性や供試体成形が可能な地質のかたさから、DL~CL級の風化花崗岩に適すると考えられる。

(1) 供試体の作成

- ①バックホーなどにより、せん断試験実施面付近まで地盤を掘削する。
- ②試験地盤のかたさに応じ、スコップ、ピック、グラインダーなどを使って供試体をだまかな形に削る。
- ③ヘラ、タガネなどで供試体をできる限り平滑に仕上げる(供試体の大きさ:縦20cm×横20cm×高さ20cm)。

(2) 試験装置のセット

- ①地盤に超速硬セメントを打設し、その上に下部せん断箱を設置する。また、下部せん断箱の4隅をアンカーピンで固定する。この際、下部せん断箱が水平になるよう注意する。供試体とせん断箱との隙間には超速硬セメントを流し込む。なお、下部せん断箱の内側にはあらかじめグリスを塗っておき、超速硬セメントがせん断箱に付着するのを防ぐ。

- ②上部せん断箱を供試体にかぶせる。グリスの塗布、セメントの充填は下部せん断箱のときと同様である。なお、せん断面が形成される上下部せん断箱の境界付近には、標準砂を充填する。
- ③供試体上面をヘラなどで平滑に仕上げる。
- ④加圧板を供試体上面に載せる。このとき、加圧板と供試体が密着するように、供試体上面の凹凸を埋めるために標準砂を敷く。
- ⑤変位計を所定の位置にセットする。今回の事例では水平変位測定のため上部せん断箱に2個、下部せん断箱に1個、垂直変位測定用に加圧板に1個、合計4個の変位計を使用した。
- ⑥油圧ジャッキ、ロードセルを加圧板および上部せん断箱の中心に水平および垂直方向に設置する。

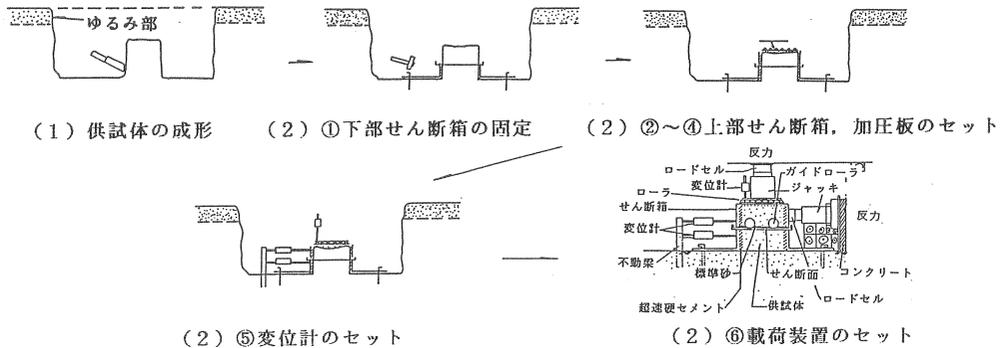


図-2 せん断試験装置と試験の手順

(3) 測定

- ①垂直荷重用の油圧ジャッキを操作して、所定の垂直荷重を加える。
- ②垂直変位が5分間一定になったら、水平荷重用の油圧ジャッキを操作し、一定速度で水平荷重を連続的に加える。なお、今回の事例では、試験の規格は次のように設定した。

試験対象地盤：DL級およびCL級の風化花崗岩を対象に各岩級ごとに1地点5供試体
せん断面の大きさ：20×20cmを標準とする。

設定垂直応力：DL級 0.15, 0.31, 0.43, 0.60, 0.74 (kgf/cm²)

CL級 0.25, 0.43, 0.77, 1.27, 3.68 (kgf/cm²)

せん断速度：ピーク強度に達するまでは0.2kgf/cm²/minの速度でせん断荷重を加える応力制御により行った。

- ③測定の終了は、原則として、せん断応力のピークおよび残留強度を確認した後、水平変位量が約2.5mmに達するまでとした。

2.3 地盤概要

本試験箇所付近の地質は、広島型花崗岩からなり、表層から深部に向かって次第にかたくなっている。表層から深度10～15m程度までは、風化が進みまさ状を呈することが多い。本事例では、風化花崗岩を鉱物の硬さや変質等の違いから次のように区分した。

表-1 岩盤区分

岩盤区分	地質状態
DL級	鉱物のうち、石英は細粒化、長石・有色鉱物は粘土化し、指圧で砂質土状に容易につぶせる。
DM級	粒子は全体に粗くなるが、長石・有色鉱物は変質しており、指圧でつぶせる。所々石英・長石が礫状に残る。
DH級	粒子はかたくなり、石英・長石の結合した礫が多くなる。ハンマーピックはさきりにくい。
CL級	岩組織は明瞭に残る。ハンマーピックは強打により少しささる。粒子はかたいが結合力は弱くなっており、岩塊は手で粗く砕ける。

本事例では、DL級およびCL級の風化花崗岩を対象に現場一面せん断試験を行っているが、以下便宜的に、DL級風化花崗岩のせん断試験地点をA地点、CL級のそれをB地点とする。

試験地点付近はかつては丘陵地であったが、試験実施時には切取り造成され平坦化されていた。試験地盤面の地質は造成前に実施したボーリング調査では、A地点では標準貫入試験のN値は約40、B地点では貫入不能であった。しかし、A地点では約8m、B地点では約15mの切取りがなされており、これに伴い地盤が緩むことが予想されるので、掘削面における地盤状況をラムサウンディング²⁾による打撃回数(Nd値)で確認した。その結果、表層の1m程度は緩んでいることが確認されたので、せん断試験は緩み部を取り除いて実施した。なお、N値とNd値とは試験地付近における比較試験によりほぼ等しい値を示すことが確かめられている。

2. 4 試験結果

試験結果をせん断応力-水平変位量曲線にまとめ、図-3(1)、(2)に示す。また、各曲線のピーク強度についてせん断応力-垂直応力の関係にまとめ、図-4(1)、(2)に示す。

後述のように本事例では、垂直応力はせん断が進むにつれ増加するので、ピーク強度の算定には図-3の曲線においてピーク時のせん断応力とその時の垂直応力との関係を図-4にまとめ、この図からc、φを得ている。CL級の1供試体は他の4供試体に比べやや軟質であり、後述の図-12のように物理的性質が若干異なる。最小二乗法で岩盤のせん断抵抗をモール・クーロン式により求めると表-2のとおりである。DL級の風化花崗岩では5供試体のデータを用いたが、CL級の風化花崗岩では軟質な1供試体を除く4供試体の試験結果を用いて算定した。

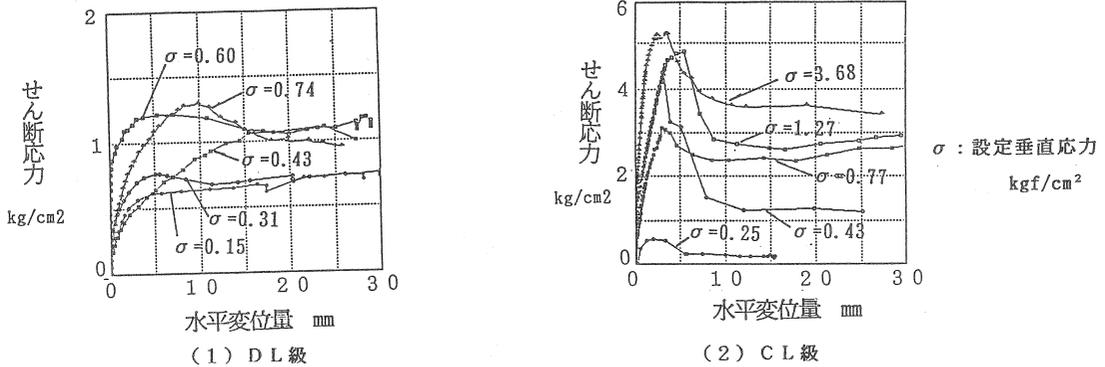


図-3 風化花崗岩のせん断応力-水平変位量曲線

図-3によれば、CL級とDL級との風化花崗岩のせん断応力-水平変位量曲線の形態はかなり異なっている。すなわち、CL級の風化花崗岩ではせん断応力は水平変位量が2~4mm(歪み1~2%)のときにピークに達した後急激に減少し、水平変位量が7~8mmになった後はせん断応力はほぼ一定となり残留強度を示す。一方、DL級の風化花崗岩ではピーク強度がやや不明瞭であり、ピーク時の水平変位量は5~8mm(歪み2.5~4%)と大きい。また、ピークを過ぎた後の残留強度とピーク強度との差が少ないことが特徴である。

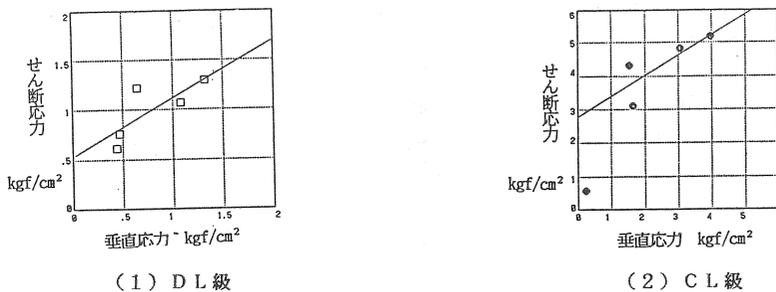


図-4 現場せん断試験結果

表-2 現場せん断試験結果一覧表

岩盤区分	強度定数	ピーク強度
DL級	c (kgf/cm ²)	0.53
	ϕ (°)	30.5
CL級	c (kgf/cm ²)	2.75
	ϕ (°)	32.3

なお、せん断試験実施後、せん断箱の内部に残っている試料を使って、物理試験を実施した。その結果を表-3、図-5に示す。

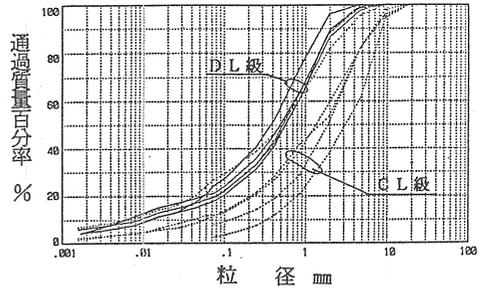


図-5 せん断試験試料の粒度分布

表-3 せん断試験試料の物理的性質

岩盤区分	湿潤密度	乾燥密度	土粒子の密度	自然含水比	間隙比	飽和度
	ρ_w g/cm ³	ρ_d g/cm ³	ρ_s g/cm ³	w_n %	e	S_r %
DL級	1.82~2.12	1.63~1.96	2.63~2.65	8.3~11.3	0.34~0.61	47~65
	平均1.95	平均1.78	平均2.64	平均9.8	平均0.49	平均54
CL級	2.17~2.40	1.95~2.32	2.62~2.66	2.6~11.5	0.14~0.35	46~89
	平均2.31	平均2.18	平均2.64	平均6.3	平均0.22	平均73

今回のせん断試験では定体積条件を意図し、供試体の垂直方向の動きは反力(重機)で拘束した。ただし、サウンディングのおもりを反力としたCL級の1供試体では定圧条件(垂直応力0.75kgf/cm²)となっている。垂直応力はせん断応力が増加するにつれ変動した。その状態をせん断応力-垂直応力関係図にまとめ図-6に示す。DL級の風化花崗岩における試験ではせん断応力が0.5kgf/cm²以上、CL級の風化花崗岩ではせん断応力が2kgf/cm²以上になると、垂直応力の増加が大きくなっている。垂直応力の増加はせん断にともなうダイレイタンスの影響で上部せん断箱が上に持ち上がろうとするが、上部への動きは反力で拘束されているため体積が自由に膨張できず、垂直応力が増加したと思われる。

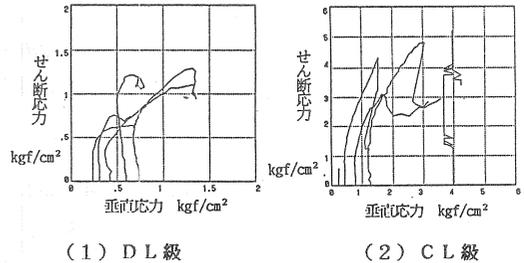


図-6 せん断応力-垂直応力曲線

また、供試体の垂直方向の変動は変位計を1箇所設置して測定した。その結果は図-7に示すようにせん断応力の増加と共に浮上がるもの、浮上がったあと沈下するものなどさまざまな動きを示し、各供試体ごとに変動の状況は異なっている。垂直方向の変位は、供試体の上下方向を拘束して定体積条件となるようにしているので変異を生じないはずであるが、せん断面上には凹凸があり、上部の供試体がせん断面上を動くにつれ、供試体が多少傾斜した可能性がある。また、測定は1箇所で行っているのでも、上部供試体全体の動きを十分把握できないうらみがあり、今後の改良点としたい。

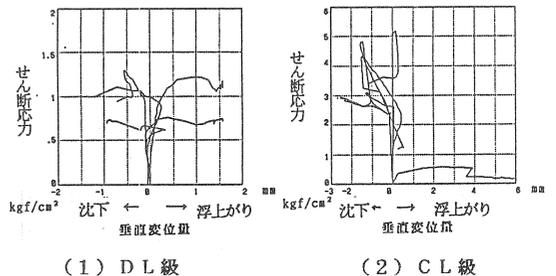


図-7 せん断応力-垂直変位曲線

3. 現場回転せん断試験

3.1 試験装置と方法^{3)・4)}

本試験装置は、図-8に示すように力計(トルクレンチ)、せん断円盤、荷重(スウェーデン式サウンディング

グ用を利用) などから構成されている。試験方法は次のとおりであり、これにより地盤のせん断強度を求める。

- ①試験地盤を水平に均し、せん断円盤を設置する。
- ②せん断円盤に設けられている穴を通して、釘を地盤に打付ける。
- ③打付けた釘の内側にリング状に試験地盤が残るよう、釘周囲の地盤をヘラ等で削り取る。
- ④リングの中心に回転受けの軸を打ち込む。
- ⑤せん断円盤上に荷重受け盤をボルトで固定し、その上に乗荷重を載せる。
- ⑥せん断円盤を回し、応力と回転角を測定する。
- ⑦上乗荷重を変えて、①～⑥の作業を繰返す。

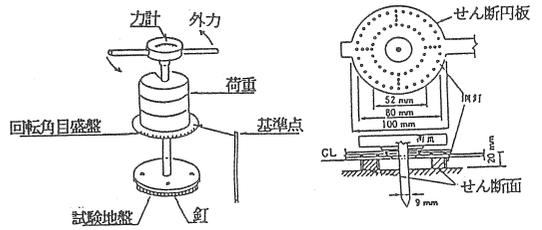


図-8 現場回転せん断試験機

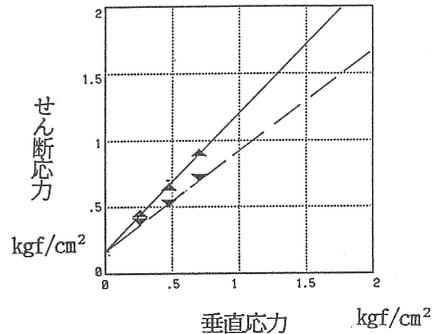
せん断強さは次式により求める。

$$\tau = 3PL / 2\pi (R^3 - r^3)$$

ここで、 τ : せん断強さ P : 回転のアームの力
 L : 円盤中心からブルーピングリングの接点までの距離
 R : せん断面の外半径 r : せん断面の内半径

3. 2 試験結果

試験は切り取り平坦面上の風化花崗岩 (DH級) を対象とした。風化花崗岩の鉱物粒子は硬く、せん断円盤を通して釘を打付けることのできる限界に近いものである。本試験はCL級以上の風化花崗岩では釘を打ち込むことが不可能であり、実施できないと思われる。垂直応力は0.26, 0.48, 0.70kgf/cm² とし、ピーク時のせん断強さおよび残留強さを求めた。試験結果をせん断応力-垂直応力の関係にまとめ図-9に示す。また、得られた強度定数を表-4に示す。



▲ : ピーク強度
 ▼ : 残留強度

図-9 現場回転せん断試験結果

表-4 現場回転せん断試験結果一覧表

岩盤区分	強度定数	ピーク強度	残留強度
DH級	c (kgf/cm ²)	0.17	0.18
	ϕ (°)	46.3	36.9

4. 室内三軸試験結果

4. 1 まさ土の乱さない試料採取方法

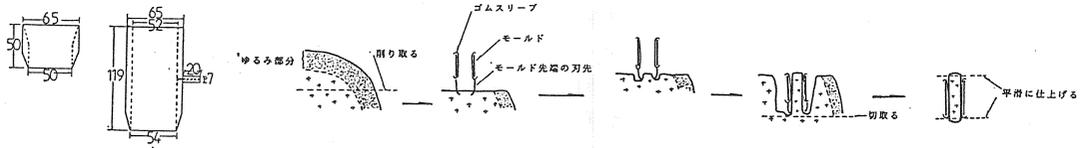
まさ土の乱さない試料は、土粒子のかたさがさまざまであることや土粒子の結合が緩いことなどから、採取することが困難であり、標準化された方法はないが、釘打ち法⁶⁾などが行われている。本事例では三軸圧縮試験に供するためのまさ土の乱さない試料を図-10に示す直径約50mmのモールドなどを使って露頭から手堀で試料を採取する方法により行った。この方法によれば、現場で三軸試験用のゴムスリーブを試料に装着することができるので、試験室では試料の端面整形を行うだけで三軸試験を実施できることが特徴である。試料採取手順は次のとおりである。

- ①採取しようとする土層を表面に出し、その上面を平坦に仕上げ、モールド刃先をセットする。
- ②吸引器をモールドに付け、ゴムスリーブをモールドに密着させる。
- ③ゴムスリーブのついたモールドを掘削面に垂直に当てる。
- ④モールドの周囲をナイフなどにより少しずつ削り、徐々にモールドを押し込んでいく。
- ⑤試料が十分モールド内に入ったら、モールド先端を土層から切り離す。
- ⑥試料の両端面を平滑に仕上げる。

⑦吸引器をモールドからはずし、ゴムスリーブを試料に密着させる。

⑧ゴムスリーブの付いたままの試料を三軸試験機にセットし、三軸圧縮試験を行う。

なお、DL～DM級の風化花崗岩では試料採取は容易であるが、DH級になると礫状部の多い箇所では作業能率が低下する。



4. 2室内三軸圧縮試験結果

DL～DM級の露頭より採取した乱さない風化花崗岩試料を用いて、圧密排水(CD)状態で三軸圧縮試験を行った。側圧は原則として0.5, 1.0, 2.0, 3.0kgf/cm²とした。

試験試料の物理的性質および三軸試験結果を表-5、図-11に示す。また、物性値間の相関を図-12(1)～(3)にまとめた。細粒分含有率と自然含水比、間隙比あるいは自然含水比と湿潤密度との間には明瞭な相関が認められる。また、DL級の風化花崗岩に分類されても室内三軸圧縮試験の試料は、現場一面せん断試験の試料に比べ、全体的に細粒分の含有率、含水比、間隙比が高く、湿潤密度は低い傾向がある。これは同じ岩級に属する地盤でもその物理・力学的性質はある範囲をもってばらついていることや現場一面せん断試験の試料より室内三軸圧縮試験の試料の方が地表に近い露頭から採取したものでより風化を受けた表層の地盤状態を代表しているものと考えられる。

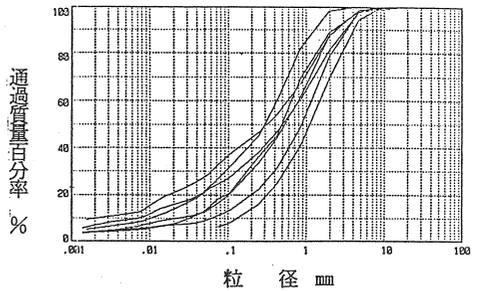
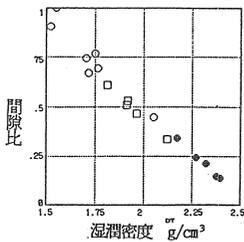


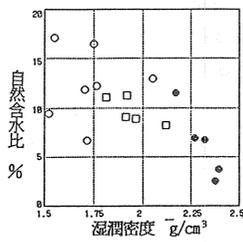
図-11 三軸試験試料の粒度分布

表-5 室内三軸圧縮試験結果一覧表

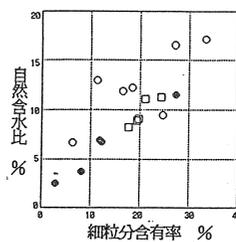
試料番号	岩盤区分	湿潤密度 ρ_w g/cm ³	乾燥密度 ρ_d g/cm ³	土粒子の密度 ρ_s g/cm ³	自然含水比 w_n %	間隙比 e	飽和度 S_r %	C kgf/cm ³	ϕ °
①	DM	2.054	1.818	2.636	12.98	0.450	76.0	0.170	43.3
②	DL	1.753	1.505	2.666	16.49	0.771	57.0	0.000	32.8
③	DL	1.706	1.525	2.663	11.91	0.746	42.5	0.000	40.5
④	DM	1.717	1.608	2.683	6.73	0.670	27.1	0.071	38.6
⑤	DL	1.767	1.574	2.667	12.23	0.694	47.0	0.221	35.0
⑥	DL	1.554	1.327	2.652	17.09	1.000	45.3	0.000	20.4
⑦	DL	1.527	1.395	2.656	9.50	0.905	27.8	0.000	19.4



(1) 湿潤密度と間隙比



(2) 湿潤密度と自然含水比



(3) 細粒分含有率と自然含水比

凡例
○: 三軸試験試料
□: せん断試験試料DL級
●: せん断試験試料C L級

図-12 物理的性質の相関図

以上に述べた各試験結果をせん断応力-垂直応力図にまとめ図-13に示す。同図には奈良県において風化花崗岩(DL級)を対象に実施した現場回転せん断試験結果も合わせて示した。DL級の風化花崗岩については、現場一面せん断試験および三軸圧縮試験を実施した。一面せん断試験と三軸圧縮試験とはせん断方向や試験条件、機構などが異なるので両者の結果を直接比較できない面はあるが、得られた強度定数 c 、 ϕ の値はほぼ同じ範囲におさまった。なお、粘着力成分は現場一面せん断試験の方が若干大きな値を示しているが、これは現場試験試料の方が密度が大きいことや試料の乱れがより少ないことの影響と推定される。DH、CL級の風化花崗岩については現場試験のみであるが、その結果を「本州四国連絡橋の耐震、地盤に関する調査研究報告書」⁷⁾による岩盤分類別の強度定数と比較すると、前者はDH級の推定値、後者はCL級の推定値の下限に近く、ほぼ妥当な値と思われる。

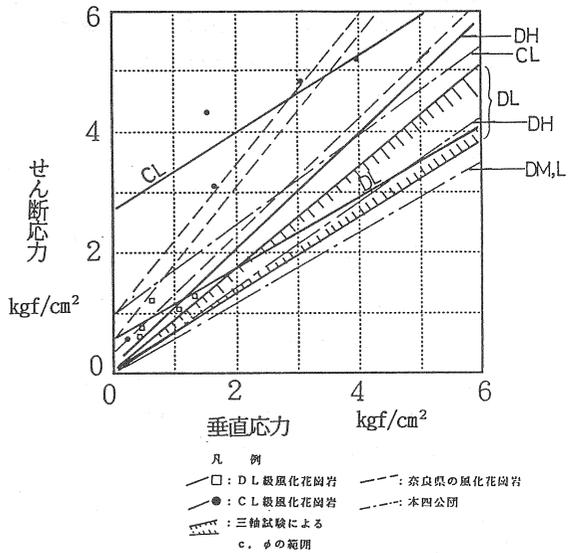


図-13 せん断応力-垂直応力関係図

5. 結論

(1) 今回実施した現場一面せん断試験方法は、土木学会の指針で示されている試験方法よりも小型の供試体を使用し、装置も簡略であるが、風化花崗岩におけるDL~CL級の強度定数 c 、 ϕ を求めるのに有効な試験方法であることがわかった。

(2) 現場一面せん断試験による c 、 ϕ は、DL級の風化岩においてはブロックサンプルによる室内三軸圧縮試験で求めた c 、 ϕ とほぼ同じ傾向がある。

(3) 現場回転せん断試験およびブロックサンプルによる室内三軸圧縮試験はDL~DH級の風化岩までは適用できるが、CL級の風化岩にはその硬さのために適用できない。

6. 参考文献

- 1) 土木学会岩盤力学委員会(1983):「原位置岩盤の変形およびせん断試験の指針」土木学会
- 2) 佐藤勝英・岩崎恒明(1980):オートマチックラムサウンドの試験装置と結果の一例について、「サウンドエンジニアリングシンポジウム発表論文集」, pp213-222
- 3) 風化花崗岩とまさ土の工学的性質とその応用 編集委員会(1979):「風化花崗岩とまさ土の工学的性質とその応用」, 土質工学会, p. 248
- 4) 松尾新一郎・西田一彦・福田護(1968):まさ土用簡易せん断試験機について、「土木学会関西支部年次講演概要」p. III-3
- 5) 尾形修・田中久丸・辻本勝彦・杉本敏郎(1991):原位置におけるせん断試験(現場ねじりせん断試験)の適用と限界,「全地連技術フォーラム'91講演集」, pp. 289-292
- 6) 村田秀一・兵働正幸・安福規之(1987):風化度に着目した乱さないまさ土の圧縮・せん断特性,「土木学会論文集」第382号/III-7 pp131-140
- 7) 土木学会・本州四国連絡橋の耐震,地盤に関する調査研究小委員会(1980):本州四国連絡橋の耐震,地盤に関する調査研究報告書, p. 107