

風化した広島型花崗岩での一原位置試験

服部隆行¹・北川隆司²・瀬戸一法³・低引洋隆⁴・日下部治⁵

¹正会員 基礎地盤コンサルタンツ(株) 事業本部技術管理部 主任(〒102 東京都千代田区九段北1-11-5)

²正会員 理博 広島大学助教授 理学部地球惑星システム学科(〒739 東広島市鏡山1-3-1)

³正会員 工修 清水建設(株) 千葉支店(〒270-11 千葉市中央区中央4-8-1) (元広島大学大学院)

⁴正会員 理博 復建調査設計(株) 国際事業部 部長(〒732 広島市東区光町2-10-11)

⁵正会員 Ph.D. 東京工業大学教授 工学部土木工学科(〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1)

著しく風化作用を受けた広島型花崗岩の地盤工学的特性を調べるために一連の原位置試験を実施し、またその一部を約2年10ヶ月間にわたりモニターし、除荷・放置の影響を検討した。主な結果は以下の通りである。

- (1) 調査地点の花崗岩は著しくマサ化し、斜長石・黒雲母は変質が進み、粘土鉱物化が著しい。
- (2) 調査期間内における地表近くの微細割れ目は、除荷作用により僅かに開く傾向が認められた。また、除荷後の放置期間では、測定された強度定数はバラツキが増大傾向にあり、明らかにその影響が認められた。
- (3) 平板載荷試験結果では局所せん断破壊形態が確認され、載荷直下部の不攪乱試料における偏光顕微鏡観察結果には顕著な粒子破碎が観察された。また、鉱物別の粒子破碎形態にも明確な違いが確認された。

Key Words : weathering, decomposed granite, field investigation, clay veins, rock forming mineral stress release, bearing capacity, local shear failure, particle crushing

1. はじめに

近代土質力学の基礎は、均質な地盤を主な対象として連続体力学の枠組みの中で理論が構築され、堆積土地盤の高精度な挙動の予測に大きな貢献をしてきた。一方、風化残積土地盤に関する土質力学は、西田¹⁾、末岡²⁾らのいくつかの先駆的な研究があるものの、依然として特殊な地盤として分類されてきた感がある。

地盤工学・基礎工学の立場から堆積土地盤と残積土地盤との差異を考える際のポイントは(1)地域特性(特に地盤)、(2)粒度の分級作用、(3)変形・強度特性とその経時変化、(4)調査法と調査密度の4点であると考えられる。

わが国で遭遇する堆積土地盤は、地域特性は若干あるものの大枠において連続体力学の枠内での理解が可能であり、ある地域での力学挙動の情報は、他地域でも有用である。一方、風化残積土地盤では、地質とともに風化の進行を支配する気候、地形要因が挙動に大きく影響し、ある特定の地点での情報をそのまま転用することには慎重な検討が必要である。また、粒度組成も分級作用を経てほぼ空間的に均質な堆積土地盤に比べ、残積土地盤は極めて不均質で、大小の粒径がランダムに混在する場合が多く見られる。

強度特性については、一般的に堆積土地盤は長期圧密

や化学的な固化作用で時間とともに強度が増加するが、残積土地盤は除荷及び風化過程の進行につれて強度が劣化する点が工学的に強調されてきた。さらに、堆積土地盤、特に沖積粘土地盤は工学的特性の自己相関距離が200~300メートルとの報告³⁾もあり、水平方向に均質である場合が多いが、残積土地盤は母岩の構成や風化程度から自己相関距離は極めて短いことが予想される。このことは、残積土の地盤性状を堆積土地盤と同程度の精度で把握するにはより高い調査密度の必要性を意味し、基礎工学の分野では設計地盤図の精度に直接関わる点である。

花崗岩はわが国の基盤岩として広く分布し、それらは風化していることが多く、特に著しく風化を受けた花崗岩は、特殊土の一つとしてマサ土の用語が定着し、主に盛土材料や災害・防災の視点からの研究⁵⁾がなされてきた。一方、丘陵・山岳地帯の開発地域が拡大するにつれ、建設工事との遭遇が増大し⁴⁾、原位置での挙動理解が必要とされてきたが、原位置試験や不攪乱試料の採取及び土質試験の報告⁷⁾ ⁸⁾ ⁹⁾は限られている。なお、各報告で一致する風化花崗岩の力学特性の重要な支配要因の一つは粒子破碎現象であり、筆者ら¹⁰⁾は、特定の鉱物の粒子破碎特性が現象を支配していることを報告している。

残積土地盤を地盤工学・基礎工学の視点から解明するには数多くの課題があるが、ここでは上述の(3)変形・強

度特性とその経時変化に研究の焦点を絞り、広島市内の造成予定地点で1993年8月～1995年5月までの2年10ヶ月の間に継続的に各種原位調査を実施し、(1)当該地点における風化花崗岩の地質的・鉱物学的特徴の把握、(2)表層部の強度・変形特性、(3)それらへの除荷の影響と風化速度及び深度、(4)平板載荷試験による支持力特性と載荷による粒子破碎の観察などを調べた結果を報告する。

なお、堆積軟岩の風化速度と深度に関する研究は、太田ら¹¹⁾により報告されているが、風化花崗岩についての研究は非常に少ない。

2. 調査地点の状況と地質

図-1に示す対象地は広島市中心部から北北西約3km、海拔270mに位置し、地質は中粒黒雲母花崗岩（広島型花崗岩）である。対象地の花崗岩は主に石英（体積比率約40%）、正長石（約32%）、斜長石（約22%）、黒雲母（約6%）の4種類の鉱物から構成され、やや斑状組織を呈する。このうち斜長石と黒雲母は化学的に変質、粘土化し、少なくとも深さ10mまでは「マサ化」している。また、微細な割れ目（シーティングジョイント）¹²⁾が、ほぼ水平方向に発達している。

調査地の花崗岩中の割れ目（断層、節理）には、粘土細脈が多く発達している。これらは母岩である花崗岩とほぼ同時か、やや遅れた時期に、熱水性の粘土鉱物が花崗岩中の割れ目に充填し、形成されたとされている¹³⁾。また、花崗岩が著しく「マサ化」している場所や地域は、この熱水作用の影響を強く受けている可能性が高いことも指摘されている¹³⁾。

調査地点の詳細を図-2に示す。調査地点は、林道脇の尾根部を4～5m切土し、周辺部の植生の成長程度から10年程度放置されていたと推定される。調査地点における(1)構成鉱物の変質程度、(2)粘土細脈の産状、(3)割れ目の状況を以下に示す。

(1) 構成鉱物の変質程度

調査地点の風化・変質程度の比較を目的として、比較的新鮮な花崗岩と調査地点の粘土細脈の入っていない花崗岩の偏光光学顕微鏡写真を写真-1、2に示す。また、「花崗岩に生成している粘土鉱物」と「粘土細脈と周辺の変質花崗岩」のX線粉末回折結果を図-3に示す。調査地点の鉱物毎の変質状況を以下に詳述する。

「石英」：粒径0.2～20mmの灰白色を呈する硬質な粒子である。平均粒径は0.5mmで、全般に微細な割れ目が発達しているが、変質は認められない。

「正長石」：粒径0.2～20mmの薄いピンク色を呈し、微細な割れ目が発達しているが、ほとんど変質は認められない。平均粒径は0.5mmで、新鮮で硬質である。



図-1 調査地点位置図

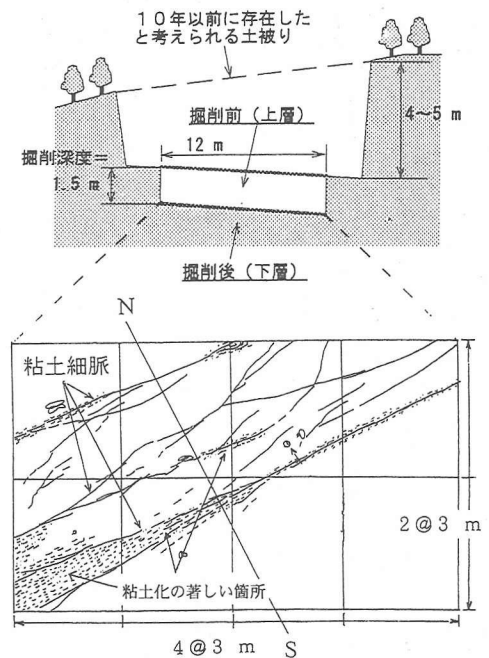


図-2 調査地点の(a)断面図(b)平面図

「斜長石」：粒径0.2～20mmの白色の結晶で、指圧にて簡単に壊すことができる。場所によってやや異なるが、偏光光学顕微鏡写真から判断すると50～70%は完全に粘土鉱物化している。X線回折結果によると生成した粘土鉱物はカオリナイト及びハロイサイトである。

「黒雲母」：粒径0.1～10mmの黒色や褐色を呈し、周辺の斜長石や正長石を褐色に変色させ（写真-3）、Feの溶脱が認められる。ほとんどの結晶は変質し、X線回折結果から一部は、パーミキュライト、カオリナイト及び雲母粘土鉱物に変化している。（図-3（a））

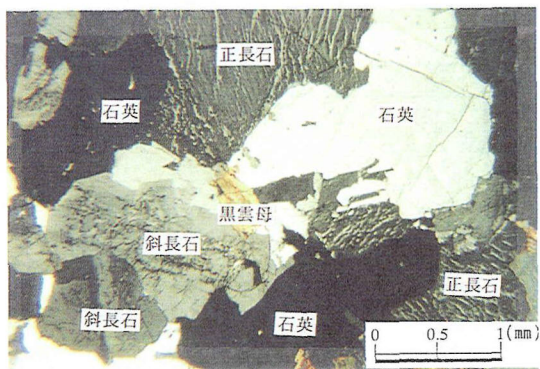


写真-1 偏光顕微鏡写真(クロスニコル) (未風化)

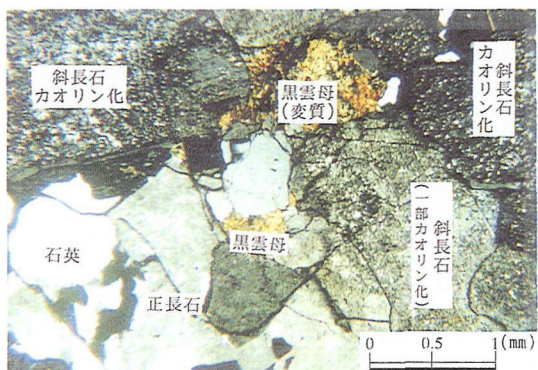


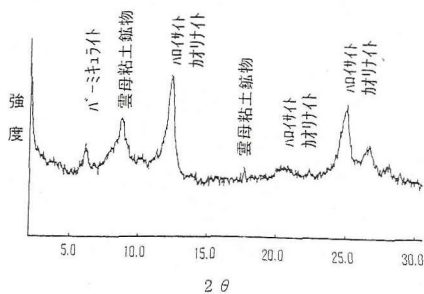
写真-2 偏光顕微鏡写真(クロスニコル) (風化)

写真-2から、ほとんどの斜長石のカオリン化は主に結晶の中心部で始まっていることが分かる。このような斜長石の中空(粘土化)の骨格構造は、現状での初期剛性は高いが、粒子破碎圧を越える载荷を受けると圧縮性が急増することを示唆している。従って、風化花崗岩全体の骨格構造特性は、斜長石の変質程度によって大きく左右されることが考えられる。

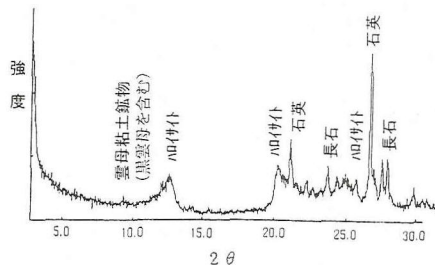
(2) 粘土細脈の特性

調査地点を含む200m四方の粘土細脈の傾斜はほぼ鉛直に近く、その走向は主としてN-S, NE-SW, E-Wの3方向である(図-4)。これらの方向は、花崗岩形成末期のこの地域の広域応力場で形成された断裂系の方向と考えられる¹⁴⁾。この断裂系は、フラクタルな要素を持ち、スケールの小さい微細な節理も類似した方向のものが発達する傾向にある¹⁵⁾。

図-2(b)に調査地点の粘土細脈の分布、方向を記した。粘土細脈は平均的には幅5mm程度であり、花崗岩の著しい変質を含めると最大15cm程度の幅となる。色は白色から緑黄色を呈し、構成粘土鉱物は主としてハロイサイトであり、わずかに雲母粘土鉱物を伴う(写真-4, 図-3(b))。



(a) (花崗岩中の粘土鉱物のみ)



(b) (粘土細脈とその周辺の変質花崗岩)

図-3 X線粉末回折

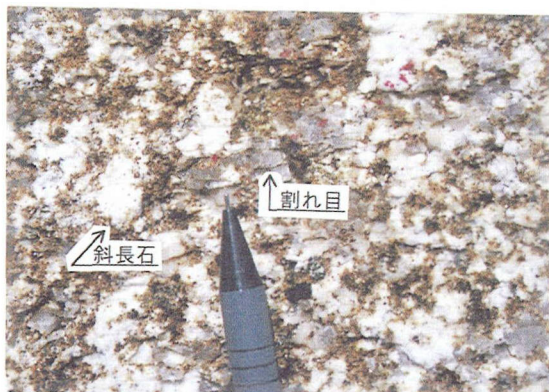


写真-3 鉱物の変質状況とほぼ水平に発達する微細割れ目

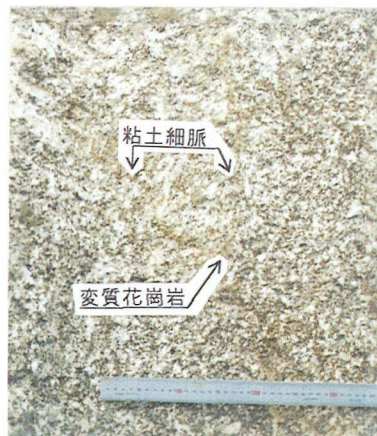


写真-4 粘土細脈と変質花崗岩

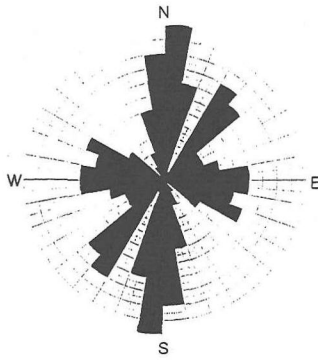


図-4 粘土細脈の走向を示すローズダイアグラム
(棒の長さは頻度を示す)

(3) 割れ目の状況

調査地の露頭は「マサ化」し、節理は残されていない。しかし、ほぼ水平に1mm程度の間隔で微細割れ目の発達認められる。(写真-3)

3. 原位置試験位置・方法

表-1及び図-5に原位置調査の測定項目及び調査位置を示す。風化花崗岩の強度・変形特性への(1)掘削による除荷、及び(2)放置期間の影響把握を目的とし、掘削後(掘削深度15m)約10ヶ月間の調査を実施した。そして、3種類の円形基礎(直径:B=10, 20, 30cm)を用いた平板載荷試験を行い、支持力特性、変形性状、寸法効果の差異を検討し、粒子破碎現象を観察した。ここでは、図-2(a)に示すように掘削前の表層を上層、掘削後の表層を下層と定義し、以下に試験毎の観測方法を述べる。

含水比・密度は、調査地点の各3×3mのブロックをラジオアイソトープ(RI)で測定し、各ブロックの代表値とした。なお、測定は表層5cm程度をはぎ取って行った。

弾性波探査は、図-5に示す4測線において板たたき法で測定した。なお、受振器は1m²に設置した。

孔内水平載荷試験は以下の方法で観測を行った。①掘削直後の初期値は約1mの深さを対象とし、繰り返し載荷により観測した(図-5○印位置)。②同様に、別孔で約1ヵ月毎に載荷圧PをP=0.1MPaづつ増加させる繰り返し載荷を実施した(図-5◆印位置)。③変形係数の初期値(E_p)と放置期間の観測値(E_p)を各応力レベルで比較し、E_p/E_{p0}の経時変化を観察した。観測結果の代表としてSITE E-3の載荷カーブを図-6に示す。各放置期間の載荷カーブは、処女載荷範囲で急激な変曲点は示さず、載荷範囲はほぼ弾性領域であったことを示している。

簡易貫入試験は土研式に準じ、図-5に示す測線で1mピッチの間隔で実施した。

平板載荷試験は、地盤工学会基準(JSG 1521-1995)に準じ、荷重制御方式で行った。載荷は、全般せん断破壊を仮定した

表-1 原位置試験実施項目

項目	内容	測定数
RI	含水比・密度	8
弾性波探査	V _p ・V _s	4(line)
孔内水平載荷試験	P0・Pf・E _p	4
簡易観入試験	N _c	11
平板載荷試験	P-S関係・Q _f 等	3

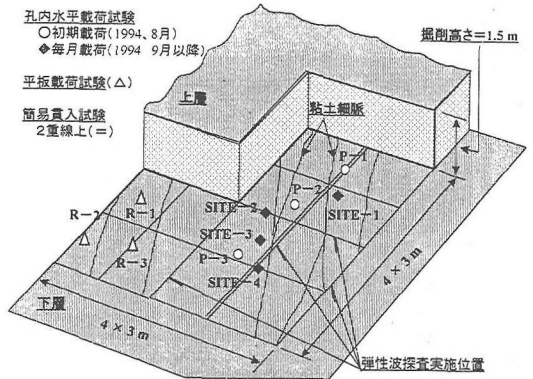


図-5 原位置試験実施位置図

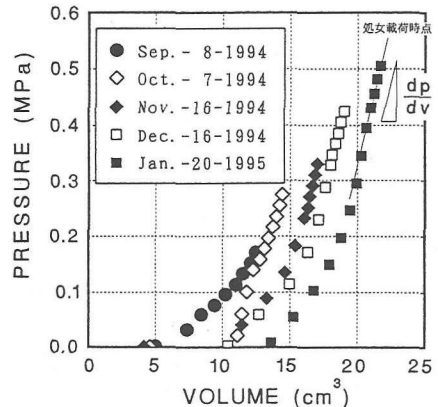


図-6 孔内水平載荷試験試験結果(SITE-3)

剛塑性解析であるTerzaghiの支持力公式から極限支持力 Q_t を算出し、除荷時の最低値を $Q_t/8$ とする繰り返し載荷とした。なお、強度定数は、室内非排水圧縮三軸試験による $c' \cdot \phi'$ (拘束圧レベル:49~196kPa, $c'=31$ kPa, $\phi'=30.5^\circ$)とした。荷重保持時間は、載荷段階:30分、除荷段階:5分とし、試験の打ち切りは、最大沈下量が載荷板直径Bの0.2B、あるいは載荷荷重が最大反力に達した時点とした。なお、計測項目は、荷重、載荷板の沈下量及び載荷板周辺(載荷板端から2~3Bの範囲)の地表面変位とした。試験終了後、載荷面に垂直方向に地盤を掘削して地盤断面を観察し、載荷による載荷板直下の粒子破碎状況を比較するために、載荷板直下と試験影響外(約5Bより外側)から採取した不攪乱試料の薄片を作成し、光学顕微鏡で観察した。

表-2 ヲジ切削ト-プによる含水比・密度測定及び弾性波探査結果

項目	含水比(%)			湿潤密度(g/cm ³)			乾燥密度(g/cm ³)		
	平均値	変動係数	標本数	平均値	変動係数	標本数	平均値	変動係数	標本数
1993(上層)	10.5	0.27	144	1.78	0.04	144	1.64	0.04	144
1994(下層)	11.5	0.37	144	1.69	0.07	144	1.51	0.05	144
1994(下層)	9.1	0.38	96	1.74	0.03	96	1.62	0.07	96
1995(下層)	13.1	0.43	96	1.80	0.03	96	1.59	0.07	96

項目	P波(km/sec)			S波(km/sec)			νポアソン比
	平均値	変動係数	標本数	平均値	変動係数	標本数	
1993(上層)	0.38	---	4	0.23	---	2	0.20
1994(下層)	0.37	---	4	0.19	---	2	0.32
1994(下層)	0.43	---	3	0.26	---	2	0.20
1995(下層)	0.38	---	3	0.19	---	2	0.33

表-3 孔内水平載荷試験の初期載荷試験結果

項目	P0	Pf	応力レベル	Bp	K0値	νポアソン比
P-1	0.11	0.35	0.11---0.36	14.5	0.99	0.50
P-2	0.09	0.39	0.09---0.40	13.5	0.81	0.45
P-3	0.11	0.66	0.11---0.22	16.3	0.99	0.50
			0.22---0.44	26.4		
			0.46---0.66	29.8		

$K0 = P0 / (\gamma t * 0.001 * H)$ (UNIT: MPa)
 $H = 4 + 1.5 + 1$ (m) (掘削高さ考慮)
 $\nu = K0 / (1 + K0)$

ける変化は少なく、 $\rho_t = 1.69 \sim 1.80 \text{ g/cm}^3$ (C.O.V=0.03~0.07), $\rho_d = 1.51 \sim 1.64 \text{ g/cm}^3$ (C.O.V=0.04~0.07) と非常にばらつきが小さい。上記の結果から、湿潤・乾燥密度のバラツキ(変動係数)は他の岩石の既往調査例¹⁶⁾が示す小さい範囲と同等となった。

(4) 弾性波探査結果

表-2にVp, Vsの測定結果の一覧を示す。掘削前のVpは0.37~0.38km/secであったが、掘削直後は0.43km/secと増加した。しかし、10ヶ月放置後は0.38km/secと減少し、VsもVpと同様な結果が得られた。掘削直後のVp, Vs値の上昇は、掘削で出現した比較的新鮮な面に起因し、10ヶ月後の低下は地盤のゆるみの影響と考えられる。なお、Vp, Vsから算定したポアソン比νは、ν=0.20~0.33となった。調査地のVp値は、「本四公団の分類表」¹⁷⁾(Vp<1.2km/sec)による岩級区分でD₂級以下となった。

(5) 孔内水平載荷試験結果

表-3に掘削直後の孔内水平載荷試験における初期値の一覧を示す。初期圧力P₀(測定管の圧力が初期地圧と平行状態となった圧力)は、0.90~0.11MPaと3地点でほぼ等しい値を示した。この結果から、水平応力をP₀として、鉛直応力を単位体積重量(γt=17.1kN/m³)と過去の切土(H=4mと仮定)から算出したK₀値は0.81~0.99となった。なお、これらの値から算定されるポアソン比は0.5前後となり、弾性波探査試験結果よりも大きい値となった。孔内水平載荷試験による初期圧力P₀の高精度な測定には、多くのクリアすべき制約があり、ポアソン比の正確な設定は困難な場合が多い¹⁸⁾。よって、変形係数の算定におけるポアソン比は、弾性波探査結果並びに一般的に用いられている値¹⁸⁾を参考としてν=0.3とした。

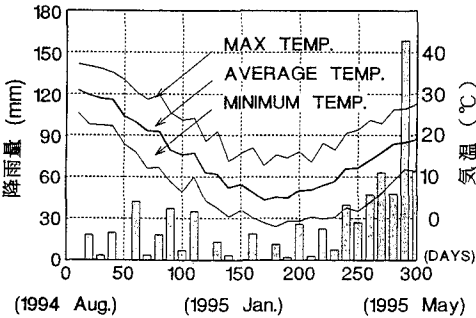


図-7 気温と降水量の経時変化図

4. 測定結果

(1) 気象条件

風化速度に影響を及ぼす一要因として気温と降水量が挙げられる。そこで10ヶ月の日平均気温と降水量の経時変化を図-7に示す。放置期間中の日平均気温の最大差は約25°C、総降水量は700mmである。

(2) 調査期間内の露頭状況

調査期間内の露頭観察では、変質程度にはほとんど変化は認められなかった。しかし、掘削後の表層部近くでは、すでに存在していた水平方向の微細割れ目の間隔がやや開く(0.5mm以下)傾向が認められた。

(3) 含水比及び密度特性

表-2に含水比、湿潤・乾燥密度の測定結果の一覧を示す。掘削前の含水比はw=10.5~11.5%の値を示し、変動係数(以下C.O.Vと表記)は0.27~0.37程度の値を示した。掘削直後はw=9.1%(C.O.V=0.38)と多少低い値を示したが、放置後はw=13.1%(C.O.V=0.43)とわずかに大きな値を示した。湿潤・乾燥密度は、掘削前・後及び放置にお

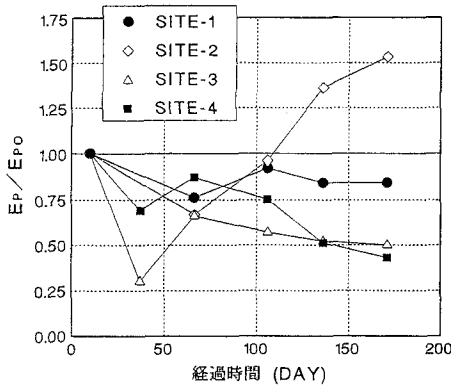


図-8 E_p/E_{p0} の経時変化図

変形係数は、 $E_{p1}=135, 145\text{MPa}$ (P-1, P-2), $E_{p0}=163\sim 298\text{MPa}$ (P-3)となり、各地点毎に多少のばらつきが見られる。また、P-3では、応力レベルにおいても差が見られた。なお、変形係数の値は、本四公団の岩盤分類 ($E=4.9\sim 29.4\text{MPa}$) では D_L に属している。

E_p/E_{p0} の経時変化図を図-8に示す。観測結果は、SITE-2以外の E_p/E_{p0} は徐々に低下し、約6ヶ月後には0.4~0.8の値を示し、変形係数は低下傾向を示している。風化の影響は、測定管の設置深さ1m程度における変形係数にも及んでいることが示唆される。

(6)簡易貫入試験結果

図-9に1994年掘削前・後及び10ヶ月放置後におけるNcの深度分布図を示す。一般に、簡易貫入試験のNcは貫入量10cmに対する打撃数であるが、ここでは地盤の状態を詳細に調べるために貫入量5cm毎の打撃数を10cmの貫入抵抗値に換算した。全体的なNcの深度分布は、深度方向に徐々に増加する傾向が見られる。各状態の $GL=0\text{m}$ からの貫入可能深度($Nc < 100$)は、掘削前は $GL-3\sim 3.5\text{m}$ 、掘削後は $GL-1.5\sim 2\text{m}$ 程度であり、掘削深度が1.5mであることからほぼ同一地点まで貫入可能であった。

図-10に示すように各測定毎のNcと深度の関係は、以下に示す一次式において良好な相関性が得られた。しかし、Ncに対しては、除荷による影響は明確に現れなかった。

$Nc = 7.75 \cdot Z + 11.98$ (相関係数: 0.73) (1994:掘削前)
 $Nc = 21.54 \cdot Z + 13.72$ (相関係数: 0.78) (1994:掘削直後)
 $Nc = 25.23 \cdot Z + 9.82$ (相関係数: 0.74) (1995:放置後)
 z: 各状態の表層からの深度(m)

一方、図-11に示すNcの変動係数の深度分布図では、変動係数の平均は1994年上層で0.182、1994年下層で0.208、1995年下層で0.279となり、除荷及び放置によりばらつきが大きくなる傾向が認められた。

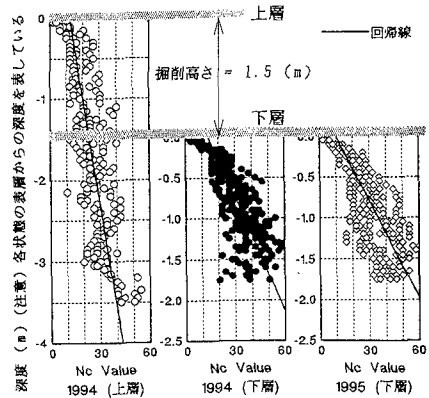


図-9 簡易貫入試験結果

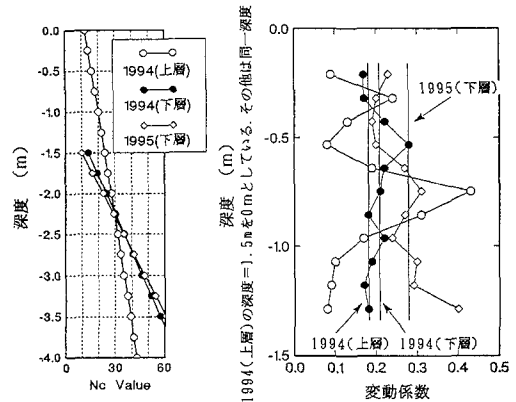


図-10 相関関係

図-11 変形係数-深度図

(7)除荷・放置による物性値への影響測定結果のまとめ

上記までの測定結果のまとめを以下に示す。①地盤特性から、調査地の花崗岩は強風化を受け、本四公団の岩盤分類では D_L となる。② ρ_v 、 ρ_d のバラツキは非常に小さい。③露頭観察結果から、割れ目が時間とともにやや開口する様子が観察された。④ E_p/E_{p0} の経時変化から、約6ヶ月の放置期間でも約1mの深度の変形係数に影響が認められた。⑤Ncと深度には相関性が存在し、除荷・放置後でわずかにバラツキが増加する傾向がみられた。しかし、除荷・放置のNcへの影響は、明確には得られなかった。この結果は、Ncが摩擦材料特性を示していると考えられ、今回の除荷・放置程度では明確な影響が見いだされるには至らなかったと推定される。

土中の温度変化は、日変化として約50cm、年変化は10m程度と報告されており²⁰⁾、温度変化による調査地の物理的風化作用への影響の程度は明確とは言えない。しかし、今回の測定結果は、少なくとも除荷とその後の約10ヶ月の放置期間で、表層部の割れ目やある種の地盤特性に影響が及ぶ様子が明らかになった。

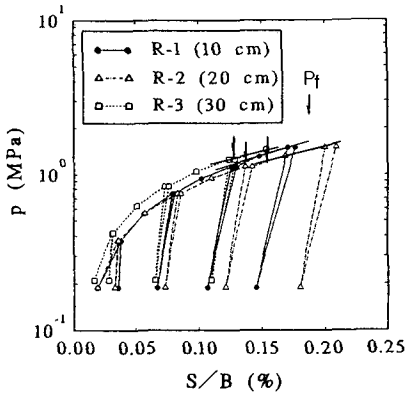


図-12 荷重-沈下比関係

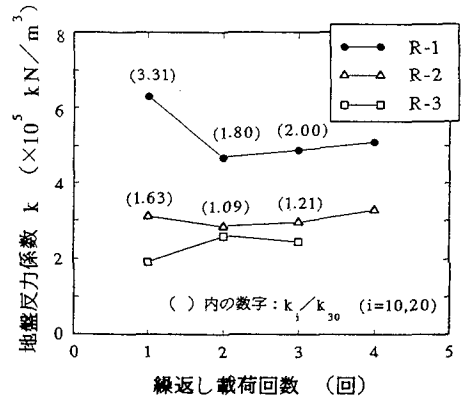


図-13 地盤反力係数-繰り返し載荷回数

(8) 平板載荷試験結果

a) 荷重-沈下曲線

図-12に荷重-沈下比関係 ($\log P-S/B$) を示す。なお、 $B=30\text{cm}$ 以外は、 $S/B=0.2$ まで載荷を行った。荷重-沈下比関係は、 $P=0.5\text{MPa}$ 程度までは急激な立ち上がりを示すが、その後は徐々に低下した。試験打ち切りまでの最大変位 ($S/B=0.2$) までに明確なピークは見られず、最大荷重は $P=1.45\sim 1.49\text{MPa}$ となった。

繰り返し載荷における地盤反力係数と繰り返し載荷回数の関係を図-13に示す。地盤反力係数の範囲は $k=1.90\sim 6.29\times 10^5$ (kN/m^3) となり、 $P<0.5\text{MPa}$ となる1回目以外は、 $B=30\text{cm}$ との比は $k_{10}/k_{30}=1.80, 2.00$, $k_{20}/k_{30}=1.09, 1.21$ を示し、一般的な地盤の地盤反力係数が基礎幅の3/4乗に逆比例する関係²⁾ とほぼ一致している。なお、1回目の地盤反力係数のばらつきは、ベディングエラーやシーティングジョイントの開閉の影響が原因として考えられる。

b) 周辺部及び地盤内の変形状

図-14に周辺地盤の変形状および載荷板の沈下と荷重の関係を示す。周辺地盤の変位は、 $P=0.42\text{MPa}$ の荷重レベルまでは載荷板の沈下に伴って沈下するが、それ以降は隆起に転じた。そして、最終載荷時の周辺地盤の最大変形量と載荷板直径の比は、 $0.032\sim 0.083$ と非常に小さくなった。これらの結果は、大内ら²⁾ が規定した堆積砂地盤における載荷試験結果の隆起体積 ΔV_s と載荷板貫入体積 ΔV_f の比が $\Delta V_s/\Delta V_f=0.42$ と大きいことと比較しても、微小であることが分かる。

図-15に示す掘削面の観察結果では、地表面に水平な微細な割れ目 (mm オダ) であるシーティングジョイントの発達が見られる。一方、載荷圧縮部はシーティングジョイントとそれらを含む水平ではない微細な割れ目が連続して形成されていた。この観察結果から、圧縮ゾーンは載荷板直下から $0.5B$ の範囲に集中し、深くなるにつれてその影響は少なくなっていた。風化花崗岩の支持力-沈下関係の特徴は、構造粒子がつくる脆弱な骨格構造が破壊され、載荷板直下のある深

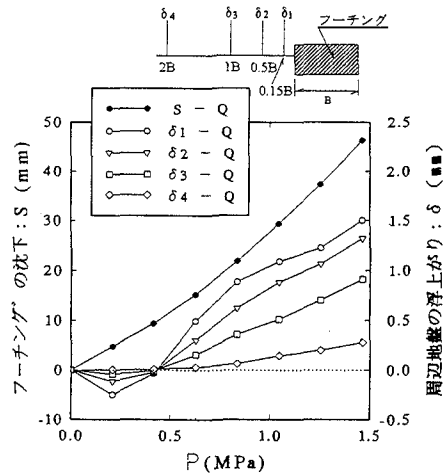


図-14 周辺地盤の変形状-荷重関係

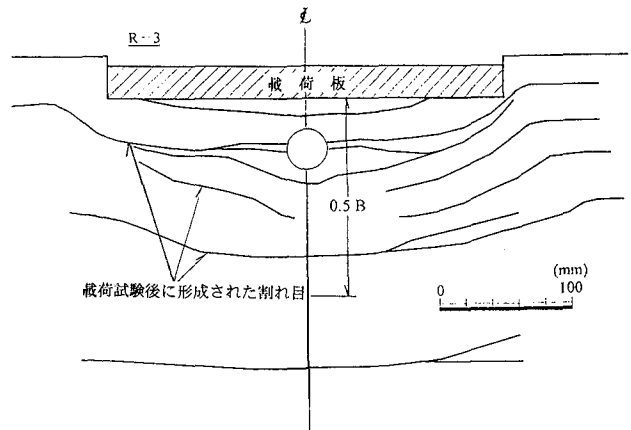


図-15 載荷板直下の断面に見れた割れ目の観察および試験採取方法 (O)は試験採取位置

度までの顕著な圧縮が発生し、局所せん断破壊形態を呈するとされている¹⁾。今回も同等の結果を示しており、支持力の発揮には大きな沈下量が伴うことが確認された。

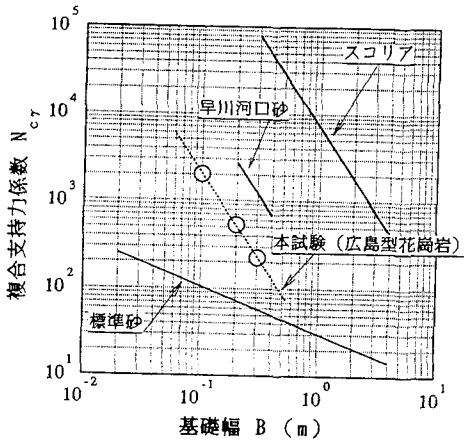


図-16 複合支持力係数-基礎幅関係

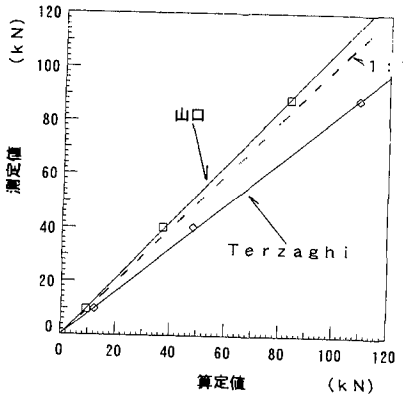


図-17 極限支持力(算定値-観測値)の比較

c) 支持力係数の寸法効果

沈下-荷重曲線で直線を示し始める点の荷重を極限支持力 q_f ²³⁾ とし、 q_f を $\gamma B/2$ で正規化した複合支持力係数 $N_{c\gamma}$ と基礎幅の関係を実験結果²⁴⁾、²⁵⁾ とともに図-16 に示す。風化花崗岩の $N_{c\gamma}$ 及び基礎幅に対する寸法効果は、既往の再調整した模型砂地盤よりも大きいことが分かる。また、砂地盤の現場試験結果との比較では、寸法効果はスコリアに似た勾配を示している。上記の結果は、風化花崗岩は粒子破碎による内部摩擦角の拘束圧依存性が大きいこと¹⁰⁾ から、スコリアのようにアンギュラリティが大きく、粒子破碎を生じる材料に近い挙動を示したことが推察される。

d) 極限支持力の推定

図-17 に载荷試験結果と Terzaghi の支持力公式と地盤を粘着力と内部摩擦角を有する弾塑性体とした山口²⁶⁾ の押上げ理論から算定した極限支持力の関係を示す。なお、山口の理論に対する変形係数 E 、ポアソン比 ν は、孔内水平载荷試験結果から $E=25\text{MPa}$ 、 $\nu=0.3$ とした。風化花崗岩の極限支持力は、対象となる破壊モードが異なる Terzaghi の支持力公式では 20% 程度大きく、山口の理論では 7% 程度小

さく算定された。しかし、上述した観察結果から、風化花崗岩の破壊モードは局所せん断破壊で弾塑性的な挙動を示し、また、支持力係数の寸法効果は有意な粘着力の存在と圧力レベルの増加に伴う粒子破碎の影響を受け、堆積砂よりも大きいことが示された。よって、今回の結果は、山口の理論の方が現象をより忠実に表現していると考えられる。

e) 粒子破碎の観察

萩原²²⁾ は、現場载荷試験と遠心模型実験から自然堆積砂質土地盤の支持力機構における粒子破碎に起因する内部摩擦角の拘束圧依存性の影響を明らかにしている。また、粒子破碎は、すべり面を有する破壊ではせん断層内で顕著に生じることが報告されている⁷⁾。しかし、今回は明確なすべり線が現れなかったため主動域と考えられる箇所(図-14の○印)と試験の影響がない箇所から不攪乱試料を採取し、荷重載荷面に対して直行する面の薄片を作成し、光学顕微鏡で構成鉱物粒子の観察を行った。写真-5が試験影響外、写真-6が主動域の試料を25倍で撮影したものである。

写真-5から、試験影響外は石英・正長石の中にも地表面とほぼ平行にシーティングジョイントの発達を観察されるが、斜長石は中心部の粘土化が進行し、結晶形は外周面で維持されていることがわかる。一方、写真-6と写真-5の比較では、载荷板直下の粒子が細粒化し、破碎が進行していることが顕著である。

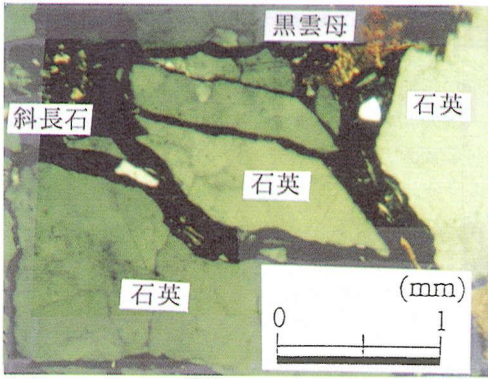
鉱物別に破碎状況を観察すると、石英・正長石は元々存在していた割れ目や潜在的に存在する微細割れ目で粒子破碎が進行し、粒子が移動しているが、別報¹⁰⁾ で記した正長石の壁開面での破壊は認められなかった。一方、結晶形が外周部のみにて形成されている斜長石は、破壊された場合の破碎程度が大きく、試験影響外と比較すると粒子が広く分散している。なお、黒雲母はその鉱物学的特徴である壁開面に沿って破碎し、より小さな粒子となり移動したものと推測される。

別報¹⁰⁾ にて、風化花崗岩のせん断に対する粒子破碎は、鉱物毎に高い応力レベルで破碎する石英・正長石と低い応力レベルで破碎する斜長石・黒雲母の2つグループに分けられ、風化花崗岩のせん断挙動が各鉱物毎のせん断挙動に支配されることを明らかにしている。今回の観察結果は、これらの粒子破碎形態の差異が、風化花崗岩の支持力特性に大きく影響することを明確に裏付ける結果の一つと考えられる。

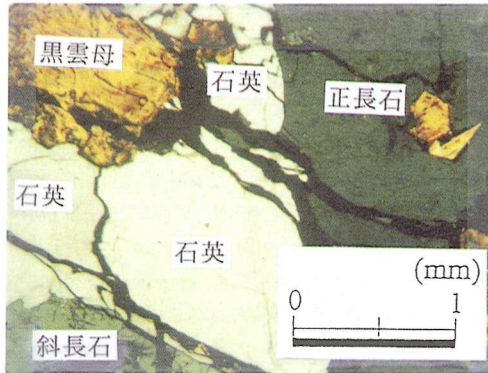
5. まとめ

風化した広島型花崗岩の地盤情報の集積を目的として行った各種原位試験の測定結果のまとめを以下に述べる。

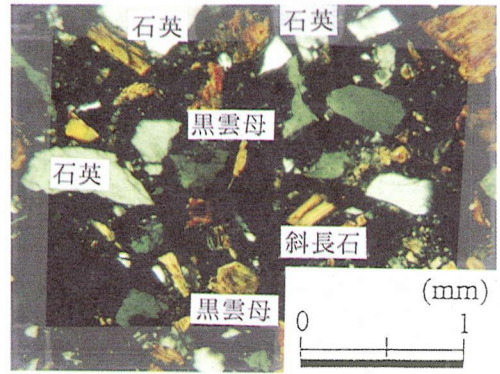
(1) 調査地の風化花崗岩は、約1mm間隔のほぼ水平な微細割れ目が顕著に発達し、斜長石と黒雲母は化学的風化作用を受けて粘土鉱物に変化しており、いわゆる「まさ土」



(クロスニコル)



(クロスニコル)



(クロスニコル)



(クロスニコル)

写真-5 試験影響外試料の偏光顕微鏡写真

写真-6 荷板直下試料の偏光顕微鏡写真

状態であった。調査した約2年10ヶ月内では、化学的変化はほとんど確認されなかったが、地表近くの水平方向の微細割れ目は僅かに開く傾向が肉眼で認められた。

(2)調査期間内(約10ヶ月)では、含水比、湿潤・乾燥密度及び N_c には除荷後の放置期間の影響は比較的少ないが、 V_p 、 V_s 、 E_p には影響が認められた。今回の除荷及び放置期間では、各地盤特性への影響程度に差が見られることが認められた。

(3)平板荷重試験の結果は、荷重-沈下比関係は荷重初期には急激な立ち上がりを示すが明確なピークは見られず、周辺地盤の変形は荷板の沈下量と比較して微小であった。また、荷重断面の観察からは、圧縮ゾーンの範囲が荷板直下から0.5Bの範囲に集中して見られた。これらの結果は荷重直下の局所せん断破壊形態を示唆している。

(4)偏光顕微鏡による不攪乱試料の薄片観察結果から、荷板直下では粒子破碎の進行が確認された。鉱物別には石英・正長石は潜在的に存在する割れ目で破碎が生じ、斜長石は結

晶形を形成する外周部が粉碎され、黒雲母は壁開面に沿って細かく分離・細流化しており、粒子破碎形態の違いが観察された。

謝辞：今回の測定には、現地での配慮にて(株)フジタ：青景平昌氏、平野訓相氏、弾性波探査にて(株)陸地コンサルタント：三上淳氏、現地作業にて広島大学工学部技官：山本博氏、元広島大学大学院：奥宮英治氏、香川県：山下徹氏、そして広島大学の院生・学生の方々に多大なご協力を頂きました。また、研究の一部は、平成9及び10年度文部省科学研究費補助金(課題：風化残積土の粒子破碎と圧縮性に関する微視的研究、課題番号：09650541、代表者：日下部治)の交付を受けた。記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 西田一彦：風化残積土の工学的性質、鹿島出版会、p189、1986。
- 2) 末岡徹：地盤工学の立場からみた風化残積土に関する研究、京大学位論文、1989。
- 3) 土田孝、小野憲司：数値シミュレーションによる不同沈下

- の予測とその空港舗装設計への適用, 湾技術研究所報告, 運輸省港湾技術研究所, Vol.2, No.4, pp.123-200, 1988.
- 4) 末岡徹: まさ土の分布に関する一考察, 土木学会第47回年次学術講演会, pp.930-931, 1992.
 - 5) 例えば松尾新一郎, 福本武明: マサ土の粒子破碎に伴う透水性低下について, 土質工学会論文報告集, Vol.17, No.4, pp.87-97, 1977.
 - 6) 網干寿夫: マサ土地帯における土砂災害の予測と防止に関する研究, 文部省科学研究費自然災害特別研究(1)研究成果報告書, 1986.
 - 7) 村田秀一, 兵動正幸, 安福喜之: 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, No.382/III-7, pp.131-140, 1987.
 - 8) 八木則男, 矢田部龍一: 不攪乱まさ土のせん断特性と微視的考察, 土木学会論文集, No.364/III-4, pp.133-141, 1985.
 - 9) 柴田徹, 清水正喜, 都司尚: 三軸試験による不攪乱マサ土の強度・変形特性, 京都大学防災研究所年報, 25号B-2, pp.113-129, 1982.
 - 10) 服部隆行, 瀬戸一法, 坂口賢明, 北川隆司, 日下部治: 風化した広島型花崗岩の力学特性, 土木学会論文集, No.589/III-42, 1998.
 - 11) 太田秀樹, 大森晃治, 坂口皆栄, 中道育夫: 切取軟岩のり面の長期挙動, 土木学会論文集, No.463/III-22, pp.15-24, 1993.
 - 12) 橋川邦武: 花崗岩帯表層部に発達する面状破壊構造に関する研究, 広島大学地学研究報告第25号, pp.1-37, 1985.
 - 13) Kitagawa, R.: Clay veins and clay minerals in the granitic rocks in Hiroshima and Shimane Prefectures, southwest Japan-Effect of the hydrothermal activities on the decomposition of the granitic rocks, Journal of Science of the Hiroshima University, Series C, Vol.8, pp.47-80, 1988.
 - 14) Kitagawa, R. and Nishido, O.: Orientation analysis and formation ages of fractures filled with clay minerals (clay veins) in Hiroshima and Shimane prefectures, southwest Japan, Journal. Japan Society of Engineering Geology, 35, pp.14-22, 1994.
 - 15) 大上洋子: 広島県三原市北西部に分布する花崗岩の石目について一特に粘土細脈, 節理, 微細割れ目との関係一, 広島大学卒業論文, 1985.
 - 16) 伊藤洋: 講座 土質データーのパラツキと設計 3. 地盤データーの二次処理 (統計的処理手法と実際), 土と基礎, Vol.35, No.4, Ser.No.351, pp.75-82, 1987.
 - 17) 日本応用地質学会: 岩盤分類一応用地質特集号一, 応用地質特集号, p.93, 1984.
 - 18) 地盤工学会編: 地盤調査法 第9章孔内水平載荷試験, pp.249-257, 1995.
 - 19) 田中泰雄, 岡村宏志: まさ土地盤におけるプレッシャーメータ試験, 風化残積土に関するシンポジウム, pp.145-150, 1988.
 - 20) 粕淵辰昭, 宮崎毅: 土の物理学第10章, 森北出版, p.282, 1979.
 - 21) 土質工学会編: 地盤の平板載荷試験方法・同解説, p.108, 1982.
 - 22) 大内正敏, 日下部治, 萩原敏行, 阿部真太郎: 堆積砂地盤上の直接基礎載荷試験に見られるせん断層の発達と粒子破碎, 土木学会論文集, No.487/III-26, pp.207-216, 1994.
 - 23) 日下部治, 萩原敏行, 前田良刀, 大内政敏: 不攪乱試料を用いた支持力遠心実験と現場載荷試験との比較, 土木学会論文集, No.457/III-21, pp.107-116, 1992.
 - 24) 岡原美知夫, 高木章次, 小幡 宏, 森 浩樹, 龍田昌毅: 支持力の寸法効果に関する遠心模型実験, 第43回土木学会年次講演会, pp.250-251, 1988.
 - 25) 萩原敏行, 大内正敏, 日下部治: 応力レベルと構造特性が自然堆積砂質土地盤の支持力に及ぼす影響, 土木学会論文集, No.529/III-33, pp.135-144, 1995.
 - 26) 山口柏樹: 無限土中における空洞押広げの弾塑性解析と応用, 東京工業大学土木工学科研究報告, No.15, pp.1-11, 1973.

(1995.10.25 受付)

FIELD INVESTIGATION OF WEATHERING IN HIROSHIMA GRANITE

Takayuki HATTORI, Ryuji KITAGAWA, Kazunori SETO,
Hirotaka SOKOBIKI and Osamu KUSAKABE

A set of field investigations was carried out for more than two years at a site of weathered granite in the vicinity of Hiroshima City to examine geological and mineralogical characteristics of weathering. Field investigations include geological survey, borehole lateral load test, cone penetration test, in-situ elastic wave exploration test, in-situ density test and plate loading test. The geological investigation shows that the site weathering is characterized by several clay veins and the test results indicate that the initial value gradually deteriorates down as time goes by. The results of plate loading test show that failure pattern observed was typical of local shear failure and significant particle crushing was observed beneath the footing.