

砂礫土の高圧下での粒子破碎と粘着力 の発達について

萩原 敏行¹・北澤 浩二²・日下部 治³

¹正会員 工博 群馬大学助教授 工学部建設工学科 (〒376 群馬県桐生市天神町1-5-1)

²正会員 工修 ダイヤコンサルタント(株) (〒171 東京都豊島区南池袋2-34-5)

³正会員 Ph. D. 広島大学教授 工学部第四類(建設系) (〒724 広島県東広島市鏡山1-4-1)

本論文では、2種類の自然堆積砂礫土について、拘束圧最大8 MPaまでの圧密排水三軸圧縮試験を実施し、せん断中にボンド構造が形成された結果を述べている。試験試料は、いずれも火山性堆積物からなる粒子破碎性の強い材料である。高拘束圧下でのせん断試験後供試体について一軸圧縮試験、プラジリアン試験、水浸試験を実施した。その結果、圧力レベルの増大とともにせん断中に発達する粘着力の大きさが増加し、また高圧での粘着力の発達には、粒子破碎が大きく影響していることが明らかにされた。

Key Words: naturally deposited soils, bonding, particle breakage, cohesion, high pressure

1. まえがき

著者らは、2地点の工事中のニューマチックケーン内を利用して実施された直接基礎の現場載荷試験^{1), 2)}のサイトより、自然堆積砂礫土を乱さない状態で採取し一連の力学試験を行い、それらの強度・変形特性について検討した^{3), 4)}。また、同一サイトより採取した乱した試料による力学実験から、試料の搅乱の影響について定量的な評価を行った結果、自然堆積砂礫の強度・変形特性の理解には、粒子破碎、異方性、粘着力に代表される土の構造特性⁴⁾を正しく評価することが重要であることが明らかにされた。特に、現場載荷試験より得られた極限支持力を解釈する上で、高圧力を受けた基礎直下での粒子破碎ならびに強度定数における粘着力の精度良い評価が重要であること、またその評価の難しい点についても指摘された²⁾。

粒子破碎と粒状材料の力学的特性の関係については、我が国では三浦・山内^{5), 6)}による先駆的研究により明らかにされている。豊浦砂で行った拘束圧1 MPaを超える高拘束圧下での排水三軸圧縮試験の結果より、粒子破碎が粒状材料の圧

縮・せん断特性に大きな影響を及ぼすことを定量的に明らかにしている。また、三浦⁷⁾は、模型砂地盤中において杭の載荷試験を実施し、杭先端付近の砂の粒子破碎と支持力との関係を調べている。その結果、砂の粒子破碎が、要素の高圧三軸圧縮試験で認められた場合と同様に、マスとしての杭の先端支持力・破壊特性にも、大きく影響していることを示している。

自然堆積土に含まれるボンド構造に関しては、近年その重要性が改めて指摘され始めており⁸⁾、実験室内での高温圧密養生によるセメントーション効果の再現についての研究も進められている⁹⁾。また、1100°Cの高温下で砂とカオリンを混合させた砂粒子間に、ボンド構造が発達することも指摘されている¹⁰⁾。

地震工学の分野においては、自然砂地盤の有する僅かな粘着力が液状化現象に大きく影響し¹¹⁾、また斜面安定解析の精度には、粘着力の評価が敏感であることも明らかにされている¹²⁾。

不飽和土の安定問題では、低拘束圧下の条件でのせん断強度、特に粘着力を精度良く評価することが重要であることが指摘されている^{13), 14)}。

また、不飽和土のせん断試験結果では、見かけの粘着力は含水比の関数となることが報告されている^{15), 16)}。

低拘束圧のせん断時の強度定数 c , ϕ のモビライズについて、Bjerrum¹⁷⁾は、乱さない粘土では c はせん断初期の非常に小さいひずみレベルで発揮されるが、 ϕ のモビライズには大きいひずみを必要とし、同時に発揮されないことを指摘している。同様な知見は、国内外の多くの自然堆積砂の実験結果でも報告されており^{18), 19), 20), 21)}、また本研究で使用した 2 種類の自然堆積砂礫土でも確認された^{3), 4)}。

一方、Lee²²⁾は、粒子破碎性の強いサクラメント砂による拘束圧最大 $\sigma_3' = 14$ MPaまでの高圧三軸圧縮試験を行い、高圧時のせん断中の供試体にも、ボンド構造が発達することを実験的に確かめている。Coop²³⁾も、同じく $\sigma_3' = 8$ MPaまでのカーボナイト砂の三軸圧縮試験を行い、試験後の供試体が自立することから、高圧時に粘着力の発達することを指摘した。これとほぼ同様な知見は、既に三浦・山内²⁴⁾による、豊浦砂供試体についての $\sigma_3' = 49$ MPaの高拘束圧下の非排水三軸圧縮試験の結果によっても指摘されている。

以上、高圧時の粒子破碎とせん断中の粘着力の発達についての研究を概観してみたが、ここで注意しなければならないことは、試験試料はすべて $c=0$ の再調整試料であり、また材料により粘着力の生じる圧力レベルの異なる点である。すなわち、せん断中の粘着力の発達には、粒子の硬さや粒径というような、粒子そのものの構造特性と圧力レベルも影響することが予想される。

さらに、乱したスコリア地盤・乱した早川河口砂地盤上で、正方形基礎を用いた支持力遠心実験の結果、換算基礎幅が 0.4 m の模型実験より得られた支持力係数は、これらの地盤とほぼ等しい内部摩擦角を有する豊浦砂地盤の実験結果に比べて、特にスコリア地盤ではかなり大きい値となった。これは乱した地盤であっても内部摩擦角成分のみからでは、これらの支持力を十分説明できないことを示しており、載荷に伴うフーチング直下での地盤材料の粘着力の発達が示唆された²⁵⁾。

このように高拘束圧下でのせん断中に粘着力が発達する原因として、材料の粒子破碎、化学的な構造の変化、水分の影響、粒子表面同士の接着等の指摘がなされている²²⁾。しかしながら、実験的に詳細な検討をした事例は少なく、高圧下での粘着力の発達のメカニズムを明らかにすることは、今後、高圧力の作用する実地盤の支持力評価を行

う上でも重要であると考えられる。

そこで、本研究では、上記の点に着目して、火山性堆積物からなる 2 種類の自然堆積砂礫について、拘束圧最大 8 MPaまでの圧密排水三軸圧縮試験を行い、高圧下のせん断中の供試体にボンド構造が形成された結果と、そのメカニズムについて粒子破碎の視点より検討を行った。

2. 実験概要

(1) 試 料

実験に用いた試料は、静岡県東名足柄橋工事中のニューマチックケーン内の深さ約 20 m の地点より採取したスコリアと、神奈川県小田原市の西湘バイパス改築工事中のニューマチックケーン内の、深さ約 7 m の地点より採取した早川河口砂である。

スコリアは、富士および箱根火山を起源とする第四期更新世の火山噴出物からなる洪積堆積物である。スコリア粒子は多数の空隙を有し、非常にアンギュラーな粒子構造をもつ材料である。早川河口砂は、完新世に火山岩が早川を経由し、河口沖積堆積物として生成されたものである。早川河口砂の構成鉱物は、硬度の低い斜長石が主成分であり、雲母も含有しており、やや風化作用を受けている。従って、スコリア、早川河口砂とも現場載荷試験、支持力遠心実験、ならびに高拘束圧でのせん断試験時には、強い粒子破碎を示すことが明らかにされている^{1), 2), 3), 4)}。

表-1 に試料の物理・力学特性を、図-1 に試料の粒径加積曲線を、豊浦砂の結果とともにそれぞれ示している。スコリアは、早川河口砂に比べて均等係数、平均粒径とも大きい。また早川河口砂は、豊浦砂とほぼ等しい粒度分布を示している。

乱さない試料の低拘束圧で行った三軸圧縮試験より得られた強度定数は、スコリアで $c_d = 100$ kPa, $\phi_d = 41.9^\circ$ ($\sigma_3' < 294$ kPa), 早川河口砂で $c_d = 5$ kPa, $\phi_d = 47.7^\circ$ ($\sigma_3' < 98$ kPa) であり、スコリアは強い固結性の材料である。

(2) 実験方法

a) 三軸圧縮試験

スコリアは、乾燥状態で十分ほぐした後、脱気水で水浸させ負圧を加えて飽和させた。供試体は、2 つ割れの剛性モールド内（直径 10 cm, 高さ 20 cm）に試料を 5 層に分けて注ぎ、1 層 40 mm で試料上部より、板を置いた上から約 1 分間ハンドバイプレーターにより締固めて作成した。その後、

表-1 試料の物理・力学特性

Sample	Scoria	Hayakawa	Toyoura
G_s	2.85	2.76	2.64
D_{50} (mm)	1.15	0.17	0.18
細粒分(%) ($\leq 75\mu$)	2.4	2.1	0
U_c	4.25	1.73	1.52
e_{max}	1.74	1.36	0.98
e_{min}	1.17	0.85	0.61
三軸圧縮試験(乱さない試料)			
ϕ_d (°)	41.9	47.7	—
c_d (kPa)	100	5	—
三軸圧縮試験(乱した試料)			
ϕ_d (°)	43.5	43.0	41.0

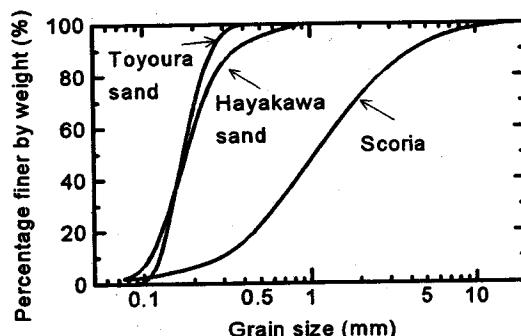


図-1 試料の粒径加積曲線

-20°Cの冷凍庫内で凍結させて、ダイヤモンドカッターで成形した。ここで凍結する方法を用いた理由は、供試体密度を乱さない供試体と同等な密度とすることを目標としたため、三軸試験装置のペディスタイル上で供試体を作成することが困難であったためである。

早川河口砂供試体は、気乾状態の試料を1層(30mm)あたり100回木槌でモールド側面に打撃を加え、5層に分けて作成した。

スコリア供試体は、直径10cm、高さ20cm、早川河口砂供試体は、直径7.5cm、高さ15cmの寸法にそれぞれ成形した。供試体の相対密度は、スコリアは95%、早川河口砂は84%として、乱さない試料の密度の平均値とほぼ同程度となるように調整した。また、比較のため、相対密度84%の豊浦砂供試体についても実験を行った。締固め方法は、早川河口砂と同一の方法である。

実験は、まず供試体に19.6kPaの負圧を加えて、2時間程度二酸化炭素を回し、脱気水を十分に循環させてB値が0.95以上になるようにした。背圧は98kPaとした。なお、スコリア供試体は、凍結状態にあるので、19.6kPaの負圧をえた状態で一夜解凍した。そして、所定の拘束圧で一次圧密後、スコリアはひずみ速度0.2%/min、早川河口砂と豊浦砂は0.1%/minでそれぞれ排水せん断試験を実施した。

せん断試験終了後、供試体に乱れや振動を加えないように留意して、メンブレンをカッターで割き、供試体を105°Cの下で炉乾燥した。

三軸圧縮試験後の供試体は、試験時の圧縮・せん断履歴の影響をある程度受けているものと考えられる。本研究では、特に粒子破碎の卓越した高い拘束圧下において、せん断中に生じた粒子破碎

と粘着力の関係を調べることを目標とした。また、本研究の試験試料であるスコリア、早川河口砂では、高拘束圧の三軸圧縮試験で受けるせん断変形には、粒子破碎の影響が卓越しているものと判断した。このため、三軸圧縮試験後の供試体を、次に述べる一軸圧縮試験、プラジリアン試験、水浸試験に使用した。

b) 一軸圧縮試験

スコリア、早川河口砂とともに、せん断試験終了後の乾燥供試体を、成形せずにそのまま一軸圧縮試験を行った。供試体寸法は、スコリアで直径約10cm、高さ約16cm、早川河口砂と豊浦砂で直径約7.5cm、高さ約12cmである。一軸圧縮試験は、三軸圧縮試験時の拘束圧が1372, 2744, 4704kPaの試験後試料を用いて行った。

c) プラジリアン試験^{26), 27)}

炉乾燥後の供試体は、スコリアは直径約10cm、長さ約5cm、早川河口砂は、直径約7.5cm、長さ約3.5cmの寸法にそれぞれ成形した。その後、直径方向に荷重を加えるプラジリアン試験を行った。プラジリアン試験は、拘束圧294kPaから6664kPaの範囲で実施した三軸圧縮試験後試料を用いて行った。

d) 水浸試験²⁸⁾

水浸試験は、せん断試験終了後の供試体を用いて直ちに実施した。直径21cm、高さ17cmのアクリル製の水槽内に供試体を置き、3mm/minの浸水速度で水を下から加えて水浸させ、供試体が崩れた時点の水位を測定した。水浸試験は、三軸圧縮試験時の拘束圧が294~4704kPaの早川河口砂

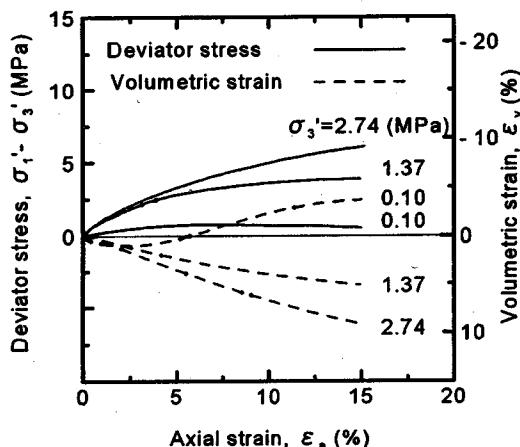


図-2 スコリアの三軸圧縮試験結果

の供試体を用いて行った。

3. 実験結果と考察

(1) 三軸圧縮試験

図-2は、スコリアの三軸圧縮試験結果を、図-3は、早川河口砂と豊浦砂の三軸圧縮試験結果をそれぞれ示している。

スコリア、早川河口砂とも、主応力差一軸ひずみ挙動は、拘束圧レベルにより大きく変化していることがわかる。すなわち、せん断挙動が圧力レベルの増加とともに、脆性的なものから延性的なものへと変化している。また、 $\sigma_3' = 2.74 \text{ MPa}$ での軸ひずみ15%の体積ひずみは、スコリア、早川河口砂とも圧縮側に約10%にまで達しており、体積圧縮性の著しいことがわかる。これは、同じ拘束圧で実施した図-3に示す豊浦砂と早川河口砂の三軸試験結果と比較しても、早川河口砂はせん断中に体積圧縮傾向が強いことが明らかである。

2つの試料は、粒度分布がほぼ等しく、ほぼ同等な相対密度に調整し、同一な試験方法で実験を行ったので、これらのせん断挙動の違いは、2つの試料の粒子形状および粒子そのものの強さの相違に依存すると考えられる。そしてこのことは、次節に述べる粒子破碎程度の相違にも関係すると考えられる。すなわち、豊浦砂は、破碎しにくい硬い石英を主体とした鉱物構成であるのに対して、早川河口砂の粒子は、硬度の低い斜長石を主体としている。従って、49MPaの高圧下で生じる豊浦

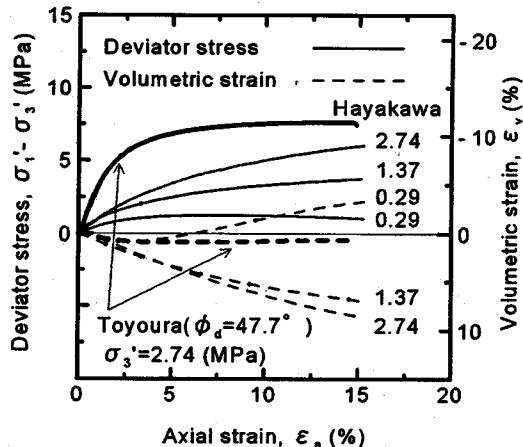


図-3 三軸圧縮試験結果
(早川河口砂、豊浦砂)

砂の粒子破碎現象²⁴⁾が、早川河口砂では2.74MPa程度の拘束圧の下で生じていることがわかる。

(2) 等方圧密、せん断による粒子破碎の評価

粒子破碎を数量化する尺度は、これまでにいくつかの方法が提案されている²⁹⁾。Marsal³⁰⁾は、試験前後の試料について一組の粒度試験を行い、各ふるいにおける試料の残留率について試験前後の差を求め、それらの正値の和をもって粒子破碎を表わす尺度とした。一方、三浦・山内⁶⁾は、粒子破碎前後における試料の表面積の増加量が、粒子破碎特性を表わす指標として有用であることを指摘している。本研究では、粒度試験により簡便に求めることができ、これまでに比較的良く利用されている指標として、Marsalの粒子破碎率を用いることとした。

そこで、等方圧密・せん断試験による粒子破碎の程度を調べるために、試験後の試料をふるい分けして粒度分布を求めた。試験後スコリア試料について、試験前試料と粒度分布を比較した結果を図-4に示す。

図より、等方圧密時とせん断試験時の粒度分布を比較すると、等方圧密後の粒径加積曲線は試験前試料とほとんど変化していないことがわかる。これに対して、せん断試験時では、拘束圧の増加とともに粒度分布は左側へシフトし、粒子破碎が生じたことを示しており、細粒分含有率も増加する傾向を示している。従って、粒子破碎は、主にせん断中に起ったものと考えられる。

図-5は、Marsalの粒子破碎率 B_M ³⁰⁾と破壊時平均主応力 p_f' との関係を示したものである。ス

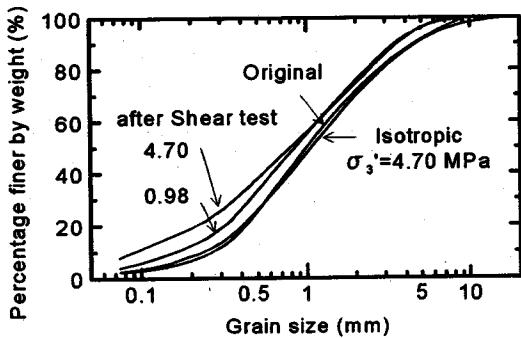


図-4 等方圧密、せん断による粒度分布の変化
(スコリア)

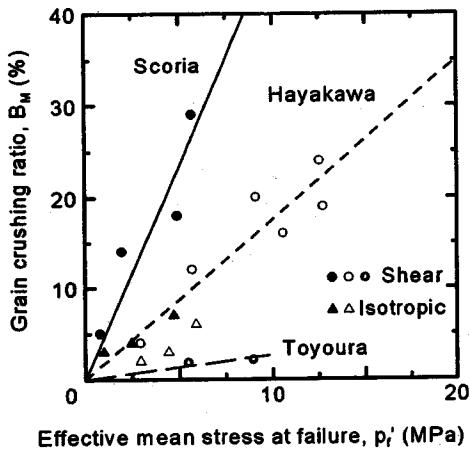


図-5 粒子破碎率と破壊時平均主応力の関係

コリア、早川河口砂とともに p_f' が増加すると B_M もほぼ比例して増加している。 $p_f' = 10 \text{ MPa}$ までは、豊浦砂には粒子破碎はほとんど認められず、スコリア、早川河口砂の破碎程度の大きいことが分かる。また、等方圧密による粒子破碎程度は、せん断時に比べて著しく低くなっている。従って、粒子破碎の程度は、せん断時に作用する平均主応力の大きさに依存しているものと考えられる。

さらに、スコリアの方が早川河口砂よりも直線の傾きが急であり、粒子破碎の程度の大きいことが分かる。これには、主に2つの原因が考えられる。1つには、スコリアが早川河口砂よりも多孔質な材料からなるということである。すなわち、スコリアは、粒子の骨格自体の強さが早川河口砂よりも脆弱なため、同等の応力が作用した場合、スコリアの方が早川河口砂に比べ、粒子破碎をより多く起こしやすいと考えられる。もう一つは、

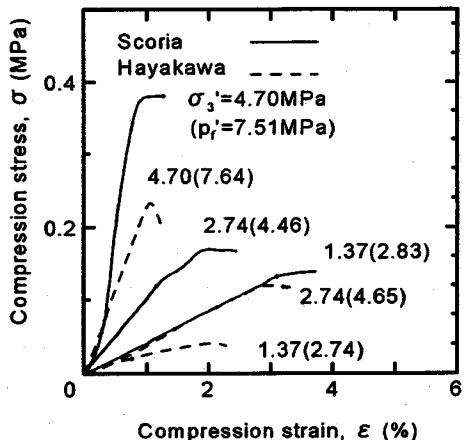


図-6 せん断試験後試料の一軸圧縮試験結果

スコリアの粒径が早川河口砂のそれよりも大きいことである。粒径が大きい程粒子接点数が少なくなり、一つの粒子に対してより大きな力が加わるため、顕著な粒子破碎が生じるものと考えられる。

(3) 一軸圧縮試験

三軸圧縮試験終了後の供試体をそのままの状態で、一軸圧縮試験、プラジリアン試験を行う場合には、試験開始前までに、含水比等の変化により供試体が不飽和状態となり、サクションの影響が出ることが予想された。また、本研究では、乾燥状態という同一な条件で各供試体を比較すること、および粒子破碎に起因した粘着力の発達を調べることを試験目的とした。このため、一軸圧縮試験、プラジリアン試験は、三軸圧縮試験終了後に炉乾燥した供試体を用いて実施した。

図-6は、一軸圧縮試験の結果より得られた応力-ひずみ曲線である。三軸圧縮試験時の破壊時平均主応力 p_f' が大きい程、より脆性的な応力-ひずみ挙動を示す曲線となっている。一軸圧縮試験は、いずれも供試体に縦方向のクラックが生じた時点で終了した。

図-7は、 p_f' と一軸圧縮強度 q_u 、変形係数 E_{50} の関係を示している。 p_f' が大きい程、 q_u 、 E_{50} が大きいことが明らかである。

スコリア、早川河口砂とともに、乱した供試体を使用したので、供試体作成時には粘着力は存在しないと考えられる。ところが、せん断試験終了時の供試体は、自立できるようになっており、その

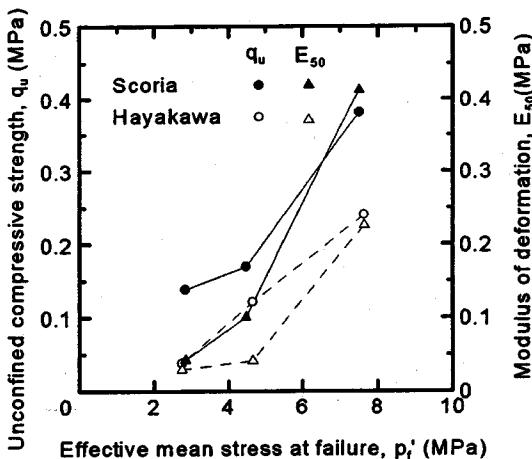


図-7 一軸圧縮強度、変形係数と p'_f の関係



図-8 ブラジリアン試験後の供試体破壊状況
(早川河口砂 $\sigma'_3=4.7$ MPa)

表-2 各試料の $(q_u/2)/p'_f$ の比較

試料	$(q_u/2)/p'_f$
Sacramento River Sand	0.005-0.008
Toyoura ²⁴⁾	0.001-0.003
Scoria	0.019-0.025
Hayakawa	0.011-0.016

p'_f : せん断時の最大平均主応力

q_u : 一軸圧縮強度

後、炉乾燥させた後でも自立していた。このことから、供試体の自立は、毛管水による吸着現象によるものではなく、固結力が原因と考えられる。

なお、炉乾燥のプロセスで粒子接点での軽いセメントーションなどによる結合力が発達している可能性も考えられる。しかしながら、図-7よりせん断中の応力レベルが高い程、せん断試験後試料の一軸圧縮強度、すなわち粘着力の値が大きいことがわかる。従って、せん断中に粘着力が発達した結果、この固結力が形成されたものと推定される。これに対して、豊浦砂供試体は、三軸圧縮試験終了後間際に水分を保有していた時点では自立していたが、炉乾燥後には崩壊した。従って、豊浦砂は $\sigma'_3 = 4704$ kPa の拘束圧下のせん断中に、粘着力が発達しなかったものと考えられる。

表-2は、一軸圧縮試験より求めた一軸圧縮強度 q_u の $1/2$ を、三軸圧縮試験中の破壊時平均有効主応力 p'_f で除して、正規化した $(q_u/2)/p'_f$ をまとめたものである。 $(q_u/2)/p'_f$ は、スコリアの方が早川河口砂に比べてやや大きい値

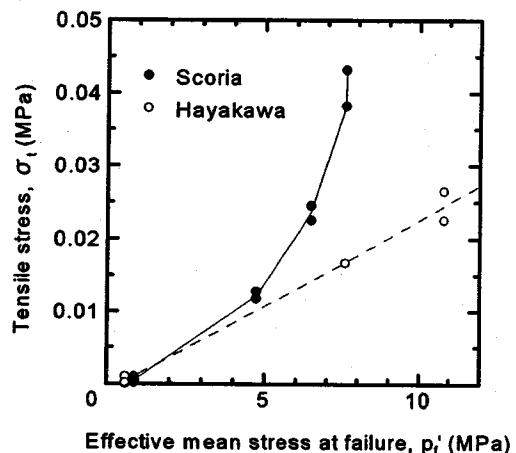


図-9 引張り強度と破壊時平均主応力との関係

を示している。このことから、 $(q_u/2)/p'_f$ は、粒子破碎程度の顕著な方がより大きくなるものと推定される。

(4) ブラジリアン試験

図-8は、ブラジリアン試験により破壊した早川河口砂供試体の状況を示したものである。一軸圧縮試験の場合と同様に、供試体は、縦方向にクラックが見られる脆的な破壊形状を示している。

図-9は、ブラジリアン試験の結果より求めた引張り強度 σ_t と破壊時平均主応力 p'_f の関係である。一軸圧縮試験の結果と同様に、 p'_f が大きい程、引張り強度は大きくなる傾向が認められる。

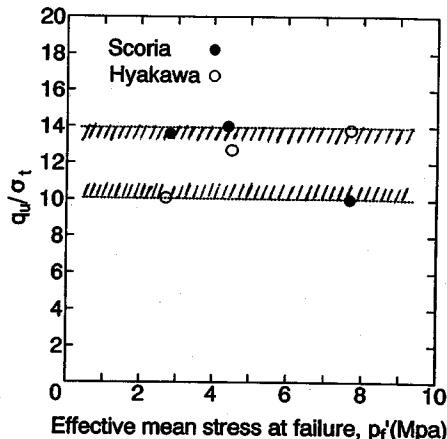


図-10 q_u/σ_t と p_f' の関係

図-10は、引張り強度 σ_t に対する一軸圧縮強度 q_u の比 q_u/σ_t と、破壊時平均主応力 p_f' との関係を示している。 q_u/σ_t は、スコリア、早川河口砂とも10~14の値を示し、これは試料、および拘束圧レベルによらず概ね一定の値をとっている。Cloughら¹⁸⁾の研究では、中位の固結砂で $q_u/\sigma_t=10$ との報告がなされており、今回の実験結果とほぼ一致している。

(5) 水浸試験

図-11は、早川河口砂の水浸試験結果を示したものである。図の縦軸は、供試体初期高さ H_0 に対する崩壊水位 H_f の割合を、横軸は、三軸圧縮試験の破壊時平均主応力 p_f' をそれぞれ示している。図より p_f' が大きい程、崩壊時の水位は高いことがわかる。なお、拘束圧が2704 kPa以上で実施した三軸圧縮試験後供試体では、供試体が完全に水没した後も24時間以上自立していた。浸水供試体は、飽和に近い状態にあるものと考えられる。以上の点と図内に示した $q_u/2$ と p_f' との関係を考慮すれば、供試体の自立は、せん断中に発達した粘着力の影響によること、およびその程度は拘束圧レベルに比例することが再確認される。

(6) 粘着力の発達と粒子破碎との関係

Marsalの粒子破碎指標は、粒子破碎程度を定量的に評価することの難しいことが、これまで指摘されている⁶⁾。しかしながら、今回の実験結果より、拘束圧レベルの増加に対して、粒子破碎程度と粘着力の大きさがいずれも比例的に増加する

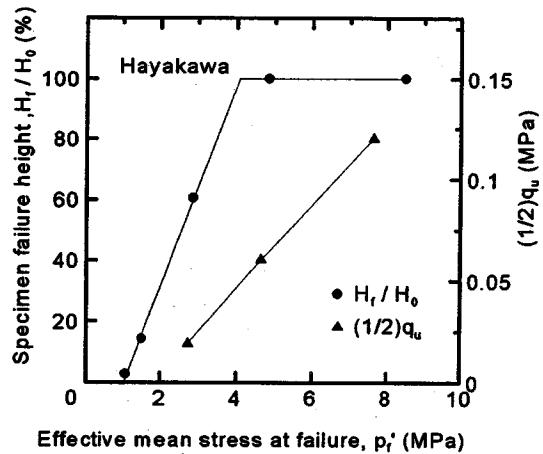


図-11 崩壊水位および $q_u/2$ と p_f' との関係

ことを定性的に示すことができた。

そして、砂礫土の要素において、拘束圧最大8 MPa程度までのせん断中に、粘着力の発達することが示された。さらに、粘着力の発達と粒子破碎の程度は、いずれも三軸圧縮試験の破壊時平均主応力 p_f' と比例関係にあることから、高圧下での粘着力の発生メカニズムの主な原因是、粒子破碎にあると考えられる。

一方、高圧での粒子破碎の程度は、水分に關係することも指摘されている(Miura and Yamanouchi²⁴⁾, Sowers, et al.³¹⁾。従って、高圧力下での土の構造特性の変化は、せん断試験時の排水条件も影響すると考えられる。また、スコリア、早川河口砂と豊浦砂との比較に見られるように、粘着力の発達の程度は、材料そのものの特性と作用する圧力レベルに影響することが明らかにされた。

早川河口砂地盤上で実施した現場載荷試験のせん断層の観察²⁾からも、フーチング直下主働域のせん断層部分は、粒子破碎により周辺部に比べて負のダイレイタンシーを示していることが確認された。さらに、顕微鏡によるせん断層の詳細な観察結果からは、破碎した細かい粒子が大きい粒子表面に多数付着し、粘性をおびている様子も確認された²⁵⁾。これは、要素で今回実証された高圧下でのせん断中の粘着力の発達が、マスでの載荷に伴うフーチング直下のすべり面近傍でも生じていることを示唆するものといえる。

従って、今後はさらに、支持力問題などに関して詳細な検討を行う予定である。

4. 結 論

本研究より得られた主な結論は、以下の通りである。

- (1) 粒子破碎性である自然堆積砂礫試料のスコリア、早川河口砂では、拘束圧 $\sigma_3' = 8 \text{ MPa}$ 程度までの圧力レベルにおいて、せん断中の供試体内に粘着力が発達することが明らかにされた。
- (2) 三軸圧縮試験後供試体で実施した一軸圧縮試験、ブラジリアン試験、水浸試験の結果より、せん断時に発達する粘着力の程度は、せん断中に供試体が受ける平均主応力が大きいほど著しくなることが示された。
- (3) せん断中の粘着力の発達の程度は、試料の粒子特性、すなわち粒子形状、粒径、鉱物構成により異なることが明らかにされた。
- (4) 一軸圧縮強度 q_u と引張り強度 σ_t の関係を求めるとき、 q_u / σ_t の値はスコリア、早川河口砂とも $q_u / \sigma_t = 10 \sim 14$ となり、試料、拘束圧レベルによらずほぼ一定の値をとることが分かった。
- (5) 粘着力の発達と粒子破碎の程度は、いずれも破壊時平均主応力と比例関係にあることから、スコリアと早川河口砂のせん断中の粘着力の発達の主因は、粒子破碎にあると考えられる。

参考文献

- 1) 前田良刀、日下部 治、大内正敏：密なスコリア層における大型三次元基礎の支持力特性、土木学会論文集、No. 430/III-15, pp. 97-106, 1991.
- 2) 大内正敏、日下部 治、萩原敏行、阿部慎太郎：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.
- 3) 日下部 治、前田良刀、大内正敏、萩原敏行：不搅乱スコリアの強度・変形特性と搅乱の影響、土木学会論文集、No. 439/III-17, pp. 69-78, 1991.
- 4) 萩原敏行、日下部 治、大内正敏、岡本圭司：構造特性に着目した不搅乱早川河口砂の強度・変形特性、土木学会論文集、No. 487/III-26, pp. 119-128, 1994.
- 5) 三浦哲彦、山内豊聰：高拘束圧下における標準砂の排水せん断特性について、土木学会論文報告集、第193号、pp. 69-79, 1971.
- 6) 三浦哲彦、山内豊聰：砂のせん断特性に及ぼす粒子破碎の影響、土木学会論文報告集、第260号、pp. 109-118, 1977.
- 7) 三浦哲彦：杭先端付近における砂の粒子破碎と杭の支持機構、土と基礎、Vol. 32, No. 6, pp. 45-50, 1984.
- 8) Leroneil, S. and Vaughan, P. R.: The general and congruent effects of structures in natural soils and weak rocks, *Geotechnique*, Vol. 40, No. 3, pp. 467-488, 1990.
- 9) Tsuchida, T., Kobayashi, M. and Mizukami, J.: Effect of aging of marine clay and its duplication by high temperature consolidation, *Soils and Foundations*, Vol. 31, No. 4, pp. 133-147, 1991.
- 10) Maccarini, M.: Laboratory studies of weakly bonded artificial soil, *Ph.D. thesis, University of London*, 1987.
- 11) Yoshimi, Y., Tokimatsu, K. and Hosaka, Y.: Evaluation of liquefaction resistance of clean sands based on high-quality undisturbed samples, *Soils and Foundations*, Vol. 29, No. 1, pp. 93-104, 1989.
- 12) Ishihara, K. and Hsu, H. L.: Considerations for landslides in natural slopes triggered by earthquakes, *Proc. of JSCE*, No. 376, pp. 1-16, 1986.
- 13) 鳥居 剛、中村博久、三笠正人：低応力一面せん断試験結果を用いた模型斜面の安定計算、第44回土木学会年次学術講演会、pp. 544-545, 1989.
- 14) 福島伸二：不飽和砂質土の低拘束圧領域における強度特性、第27回土質工学研究発表会、pp. 607-608, 1992.
- 15) 韓 國成、佐藤剛司、龍岡文夫、田村重四郎：低拘束圧下における不飽和砂の強度変形特性、生産研究、34巻9号、pp. 35-38, 1982.
- 16) 朴 春植、龍岡文夫：締固めた不飽和稻城砂の平面ひずみ圧縮試験、第24回土質工学研究発表会、pp. 505-508, 1989.
- 17) Bjerrum, L.: Problems of soil mechanics and construction on soft clays and structurally unstable soils (collapsible, expansive and others), *Proc. ICSMFE*, Session 4, pp. 111-159, 1973.
- 18) Clough, G. W., Sitair, N., Bachus, R. C. and Rad, N. S.: Cemented sands under static loading, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol. 107, No. GT6, pp. 799-817, 1981.
- 19) O'Rourke, T. D. and Crespo, E.: Geotechnical properties of cemented volcanic soil, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol. 14, No. 10,

- pp. 1126-1147, 1988.
- 20) Hull, T. S., Poulos, H. G. and Alehossein, H.: The static behaviour of various calcareous sediments, *Engineering for Calcareous sediments*, ed. Jewell and Andrews, Balkema, pp. 87-96, 1989.
 - 21) 春山元寿: 講座 c と φ を考える, 土と基礎, Vol. 23, No. 6, pp. 67-74, 1975.
 - 22) Lee, K. L.: Adhesion bonds in sands at high pressures, *Proc. of ASCE*, Vol. 103, No. GT8, pp. 908-913, 1977.
 - 23) Coop, M. R.: The mechanics of uncemented carbonated sands, *Geotechnique*, Vol. 40, No. 4, pp. 607-626, 1990.
 - 24) Miura, N. and Yamanouchi, T.: Compressibility and drained shear characteristics of a sand under high confining pressures, *Faculty of Engineering Report, Yamaguchi University, Tokiwadai, Japan*, Vol. 1, No. 2, 1973.
 - 25) 萩原敏行: 固結性自然堆積砂礫の強度・変形特性とその支持力に関する実験的研究, 東京工業大学学位論文, 1994.
 - 26) 土質工学会編: 土質試験の方法と解説, 土質工学会, 1990.
 - 27) 村田秀一, 山内豊聰: 亂さないシラスの強度特性の要因について, 土質工学会論文報告集, Vol. 17, No. 3, pp. 81-91, 1977.
 - 28) 足立格一郎, 園田紘史, 服部一利, 井澤 勝, 古川雅宣: 砂質試料の「見かけ」および「真」の粘着力と液状化強度, 第25回土質工学研究発表会, pp. 765-766, 1990.
 - 29) 福本武明: 粒子破碎の程度を示す指標, 土と基礎, Vol. 29, No. 12, pp. 64-65, 1981.
 - 30) Marsal, R. J.: Discussion of shear strength, *Proc. of the 6th ICSMFE*, pp. 310-316, 1965.
 - 31) Sowers, G. F., Williams, R. C. and Wallace, T. S.: Compressibility of broken rock and the settlement of rockfills, *Proceedings of the 6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Montreal, Canada*, Vol. II, pp. 561-565, 1965.

(1995.3.9 受付)

THE PARTICLE CRUSHING AND FORMATION OF ADHESION BONDS IN NATURALLY DEPOSITED SANDS UNDER HIGH PRESSURE

Toshiyuki HAGIWARA, Kohji KITAZAWA and Osamu KUSAKABE

This paper describes the observed formation of adhesion bonds during triaxial compression tests on naturally deposited sands under high confining pressures from 1000 kPa - 8000 kPa. The experimental results show that the degrees of particle crushing and adhesive bonding increase with increasing confining pressure. It was also found that the degree and permanence of bonding varied with the type of soil or soil mineral and was strongly affected by the amount of the particle crushing during shearing.