

火山成粗粒土の水浸に伴う圧縮及びせん断特性の変化について

後 藤 恵之輔*・山 中 稔*
小 川 鉄 平**・Abdelhadi Monther***

Changes in Compressive and Shear Strength Properties due to Submergence
of Volcanic Coarse-Grained Soil

by

Keinosuke GOTOH*, Minoru YAMANAKA*, Teppei OGAWA**
and Monther ABDELHADI***

In order to utilize the volcanic coarse-grained soil, the compressive and shear properties tests which will be effected by submergence were carried out from soil mechanics view point. In the compression tests, the compression strains and the pF -value were measured before and after submergence on condition that the density of the specimen and the loading stress were varied. In the direct shear test, the strength and strain were measured before and after submergence similarly.

As a result, for the compressive properties the followings were obtained ;

- 1) On condition of the compaction density, the effect of submergence for the compressive characteristic is very little,
- 2) On condition of the in-site density, the compressive strain after submergence becomes bigger with the increase of the loading stress.

For the shear properties the followings were also obtained ;

- 1) Shear strength of the specimens at compaction density is higher than of it in case of in-situ density.
- 2) Comparing the bearing capacity at in-situ density condition with it at the compaction density condition, it is clear that compaction is very important in order to subsidize the reduction of bearing capacity due to submergence.

1. はじめに

雲仙・普賢岳の噴火活動により、水無川流域に大量に堆積した火山成粗粒土は、現在、盛土や埋立土などへの利用が行われつつある。しかし、一般に火山灰質土やまさ土のような脆弱な粒子からなる土質材料では、水浸によって沈下や強度低下が起こることが考えられる^{1) 2)}。雲仙・普賢岳火山成粗粒土の粒子形状は、流水による淘汰が少なく角張った粒子形状を呈していることから、水浸時には沈下現象や強度低下が発

生することが予想される。水浸沈下の発生は、不等沈下や、盛土表面などの破壊を生じさせる。また、水浸による強度低下は、盛土や建築構造物等のすべりや破壊を生じさす。したがって、火山成粗粒土を土構造物に有効利用する場合は、予め十分な水浸時の検討が必要である。

著者ら^{3) 4)}は、雲仙・普賢岳土石流堆積物を試料とした、一連の物理・力学実験を行ってきた。本研究は、火山成粗粒土の水浸に伴う圧縮及びせん断特性の

平成9年4月25日受理

*社会開発工学科 (Department of Civil Engineering)

**大学院修士課程社会開発工学専攻 (Graduate Student, Department of Civil Engineering)

***大学院博士課程海洋生産科学研究科 (Graduate School of Marine Science and Engineering)

定量的把握を目的として行った、圧縮及びせん断試験の結果を報告するものである。

2. 試料採取位置

室内実験に供した土質試料の採取位置は、島原市水無川下流域より1996年7月31日に採取した。この地点は度重なる土石流発生の中でも、初期段階での堆積にあると言える。採取位置周辺には、直径10cmから1mを越える岩石が点在しているが、主として粗粒の砂質土が堆積している。運搬性と室内実験の方法を考慮して、直径5cm程度の礫を排除した堆積物を試料として乱した状態で採取した。

Figure 1 には、用いた試料の粒径加積曲線を示す。最大粒径は19mm、細粒分含有率は8%と少なく、また粒度分布は良いと言える。日本統一分類法 (JGS M 111-1996) では、火山灰質土まじり礫質砂 (SG-V) に分類される。土粒子の密度は $\rho_s = 2.57 \text{ g/cm}^3$ であり、鹿児島産しらすと比較して、やや大きい傾向にある。

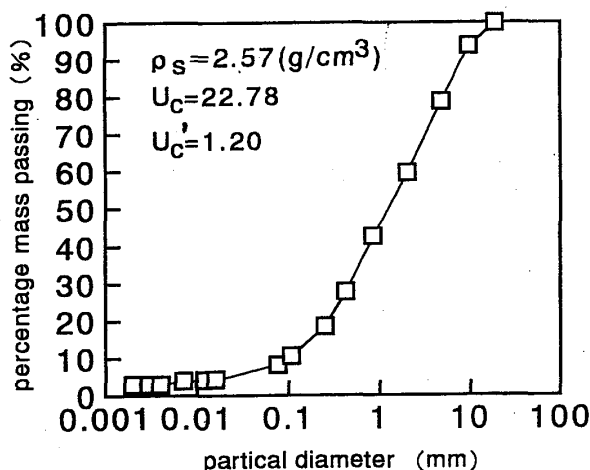


Fig. 1 Grain size distribution.

3. 圧縮特性に及ぼす水浸の影響

3. 1 試験装置及び実験条件

Figure 2 に、圧縮特性に及ぼす水浸の影響を調べるために製作した試験装置の概略図を示す。有孔底板に固定した直径15cmのCBR モールド内に、予め乾燥させた試料（最大粒径19mm）を用いて二種類の乾燥密度となるよう供試体を作成した。

Table 1 に、供試体の密度条件を示す。砂置換法で測定した現場密度 ($\rho_d = 1.57 \text{ g/cm}^3$) と、室内締固め試験 (A-b法) で得られた ρ_{dmax} の95%の乾燥密度の値 ($\rho_d = 1.76 \text{ g/cm}^3$) で行った。作成した供試体中には、上方と下方の二つの深度に、サクションを測定するための pF 計を設置している。供試体上面に載荷板

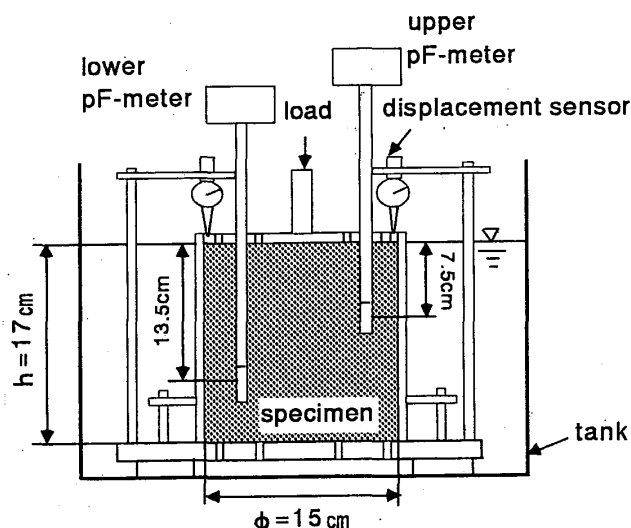


Fig. 2 Submergence settlement measuring apparatus.

を載せ、載荷シリンダーにより載荷する。載荷圧力は、49, 98, 147, 196kPa の4条件で行った。測定はまず、載荷後24時間（水浸前）までの沈下量を測定した後、供試体下部より一定速度（約1.7cm/分、約10分で供試体上面まで水浸）で水位を上昇させ、その後さらに継続して24時間沈下量を測定した。

Table 1 Condition of specimen density.

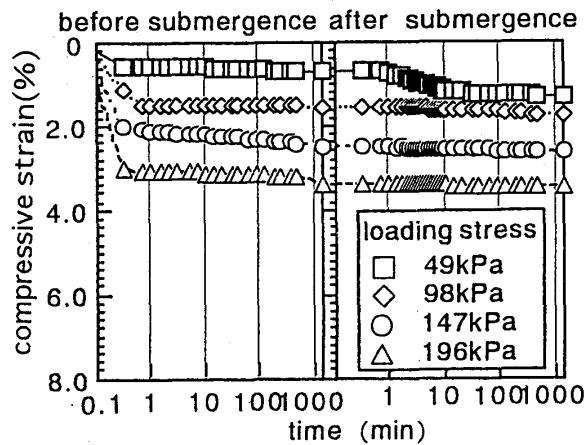
density condition	in-situ	compaction
dry density $\rho_d (\text{g/cm}^3)$	1.57	1.76

3. 2 実験結果及び考察

(1) 圧縮ひずみ及び pF 値の経時変化

Figure 3 に、一例として現場密度条件における載荷圧力98kPaでの、圧縮ひずみと pF 値の経時変化を示す。圧縮ひずみは、水浸前は載荷後約1分でほぼ沈下が終了し、水浸後は約10分までに沈下の進行が認められる。pF 値の経時変化についてみると、水浸前は徐々に大きくなっており、水浸前24時間後の値はどちらも2.8である。これは、pF 計の先端にあるポラスカップが土になじむまでの時間であると考えられる。水浸後は、供試体内の水位の上昇により、約1分で下方に設置した pF 計からまず pF 値は下がり始め、次に水浸後約5分から上方の pF 値が下がり始めている。圧縮ひずみとの関係では、pF 値が下がり始めている時に若干ではあるが、圧縮ひずみが生じる傾向、すなわち水浸による沈下の発生が見られる。

Figure 4(a), (b)に、現場密度条件及び締固め密度条件における、水浸前と水浸後の圧縮ひずみの経時変化をそれぞれ示す。Figure 4(a)の現場密度条件では、水浸前において、載荷圧力が大きくなるにしたがい圧縮ひずみも比例して大きくなっている。一方、水浸後は、最も載荷圧力の小さい49kPaが最も沈下が大きい、どの載荷圧力においても、水浸後10分までには沈下がほぼ終了していることが分かる。Figure 4(b)に示す締固め密度条件では、水浸前において、載荷圧力が大きくなるほど沈下量も大きくなっているが、Figure 4(a)の現場密度条件ほど、載荷圧力の違いによる圧縮ひずみの差は見られない。さらに、水浸後においても沈下はほとんど生じていないことが分かる。



(a) In-situ density condition.

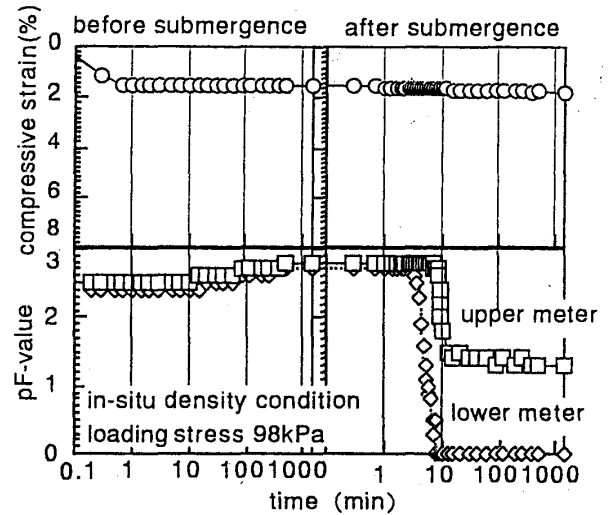
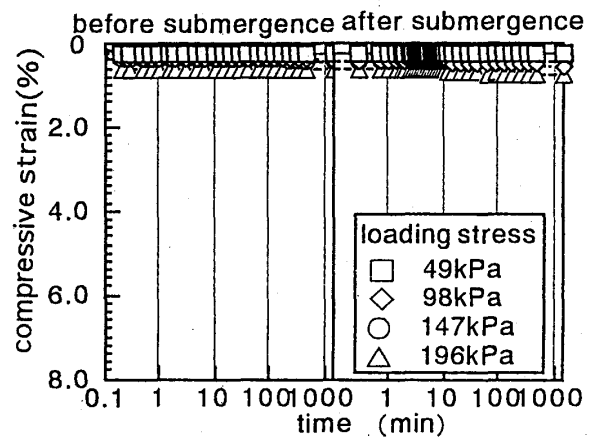


Fig. 3 Changes of compressive strain and pF-value.



(b) Compaction density condition.

Fig. 4 Changes of compressive strain.

(2) 載荷圧力の影響

Figure 5 に、両密度条件における載荷圧力 p と圧縮ひずみ ϵ との関係を示す。ここで、載荷圧力によるひずみとは外挿法により求めた載荷48時間後の値を、水浸によるひずみ $\Delta\epsilon$ とは水浸24時間後のひずみから載荷圧力による沈下量を差し引いた値を示している。載荷圧力によるひずみは、現場密度条件では載荷圧力が大きくなるにしたがい圧縮ひずみも比例して大きくなっているが、締固め密度条件においてはどの載荷圧力においても0.2~0.6%と小さく、現場密度条件の最小値よりも小さい。水浸による圧縮ひずみは、現場密度条件においては0.1~0.6%の範囲に、締固め密度条件では0.2%以内の範囲にあるが、いずれも圧縮ひずみは小さい。

(3) 密度の影響

Figure 6 に、各圧力条件における水浸により生じた増分ひずみと乾燥密度との関係を示す。乾燥密度が

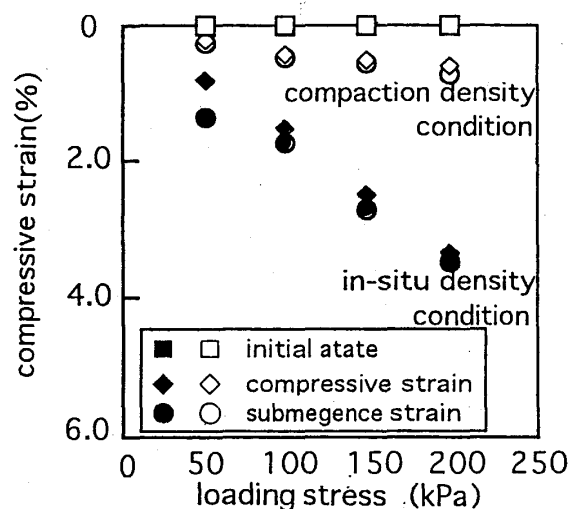


Fig. 5 Relation between stress and compressive strain.

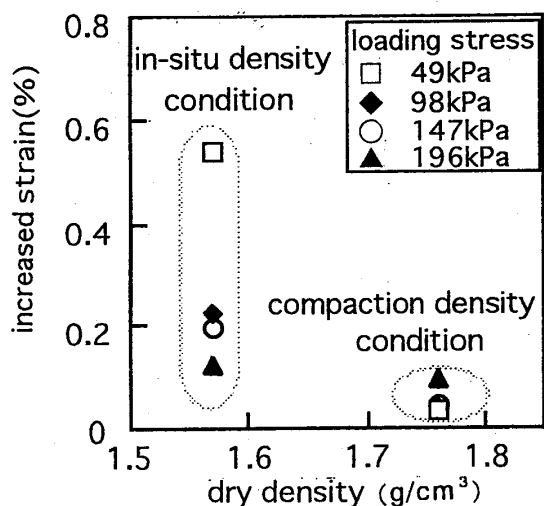
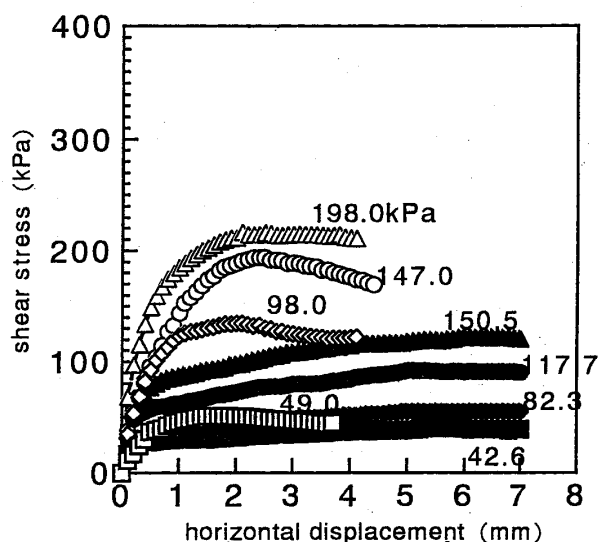


Fig. 6 Relation between dry density and increased strain.

低い場合は、载荷圧力が小さいほど増分ひずみが大きくなっていることが分かる。一方、乾燥密度が大きい場合は、载荷圧力が大きくなるにしたがい、増分ひずみは大きくなることが分かる。これは、実験に用いた試料が流水による淘汰が少なく角張っているため、粒子が大きな圧力によって破壊されたため¹⁾ ひずみが進行したものと思われる。さらに乾燥密度が 1.57 g/cm^3 の現場密度条件において、载荷圧力が 49 kPa のときはひずみ増分が 0.6% であるのに比較し、载荷圧力が2倍の 98 kPa ではひずみ増分は3分の1の 0.2% になっており、载荷圧力の増加によって増分ひずみが減少することが分かる。

4. せん断特性に及ぼす水浸の影響



(a) Shear stress~horizontal displacement.

4. 1 せん断試験方法

改良型三笠式一面せん断試験機を用い、定圧一面せん断 (CD) 試験を行った。

Table 2 に供試体条件を示す。含水比は現場含水比と同じになるように調整し、乾燥密度はTable 1 の値と一致している。直径 6 cm 、高さ 2 cm のせん断箱に試料を成形後、所定の圧密圧力で圧密を実施する。圧密終了後、せん断速度 1% でせん断試験を行った。特に水浸条件でのせん断過程では、圧密過程終了後に供試体下部より水浸させて、せん断を行った。なお、実験にはせん断箱の大きさより 2 mm ふり通過試料を用いており、現場試料とは粒度が異なっている。

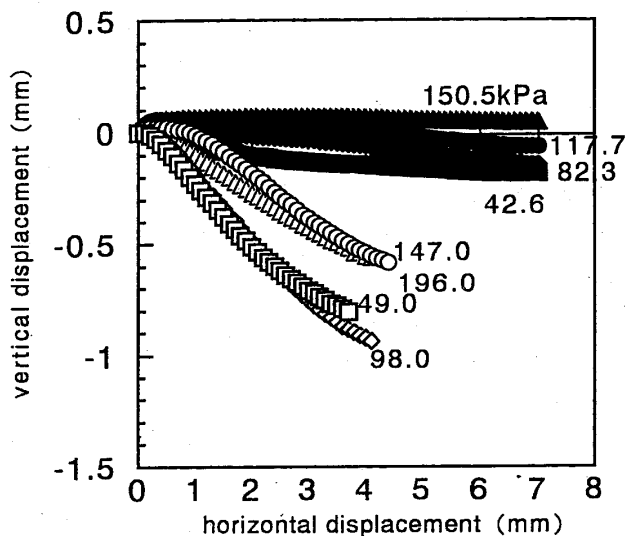
Table 2 Condition of specimen for shearing test.

density condition	in-situ	compaction
dry density $\rho_d (\text{g/cm}^3)$	1.57	1.76
water content $w (\%)$	5.1	7.7

4. 2 試験結果及び考察

(1) 応力-ひずみ曲線

Figure 7 (a), (b) には、現場密度条件における、非水浸時及び水浸時の定圧一面せん断試験結果を示している。Figure 7 (a) に示すせん断応力-水平変位関係に関しては、まず非水浸時 (白抜き印) には、水平変位の増加に伴いせん断応力はなだらかに上昇し、水平変位 2 mm 程度でせん断応力はピークを呈した後、



(b) Vertical displacement~horizontal one.

Fig. 7 Direct shear test for in-situ density condition.

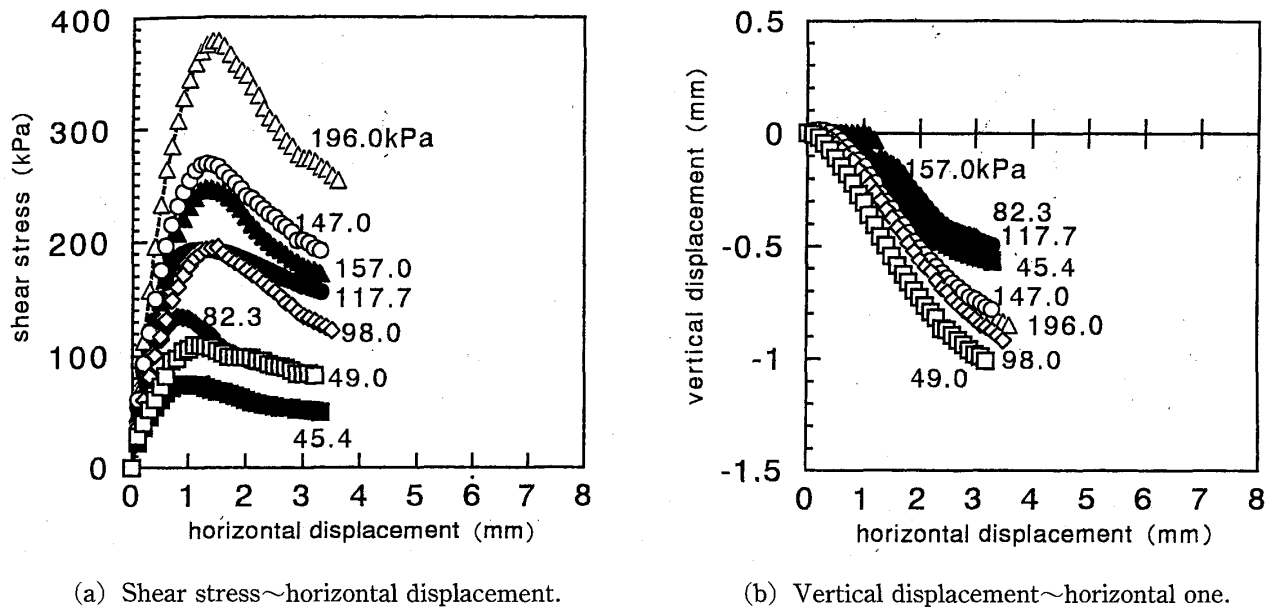


Fig. 8 Direct shear test for compaction density condition.

わずかに低下を続けていく。しかし、水浸時（黒抜き印）には、最大せん断応力は非水浸時と比較して低下するとともに、曲線のピークは見られず上昇を続けていることが分かる。Figure 7 (b)に示す垂直変位—水平変位関係では、非水浸時と水浸時で大きく異なる挙動を示している。すなわち、非水浸時では垂直変位がせん断開始時にやや圧縮側に変化するが、すぐに反転し大きく膨張側に移行している。しかし、水浸時における垂直変位は非水浸時と比較して1/3の大きさで推移し、垂直圧力196kPaの場合には、膨張が抑えられ収縮のまま収束している。

Figure 8 (a), (b)に、締固め密度条件における、非水浸時及び水浸時の定圧一面せん断試験結果を示す。Figure 8 (a)に示すせん断応力の変化は、Figure 7 (a)の現場密度条件の場合と比較して、水平変位の小さい段階（1~2mm）でピークを迎えるようになり、曲線の立ち上がり勾配も大きくなっている。ピーク後2mm経過後の残留強度は、どの垂直応力に関しても最大時の3分の2はあり、大きな強度低下は生じないことが分かる。Figure 8 (b)に示す水平変位と垂直変位の関係では、両者ともせん断開始時から膨張側に推移している。膨張量の大きさは現場密度条件に比べ、若干大きいことが分かる。

(2) 強度定数の変化

Figure 9に、非水浸と水浸における現場密度条件及び締固め密度条件での、垂直応力とせん断応力の関係を示す。またTable 3には、得られた強度定数を一覧する。

非水浸時での強度定数は、どちらの密度条件とも大きな値となっている。特に締固め密度条件では非水浸時に $\phi_d = 58.6^\circ$ と、他の三軸圧縮試験の結果⁵⁾と比較しても大きな値と言える。この原因として、試験機の特徴もしくは、用いた一面せん断試験ではせん断面に規定されるために、せん断面上に粗粒な土粒子が存在した場合にはインターロッキング効果により、想定以上の大きなせん断抵抗が発揮されたものと考えられることができる。

現場密度条件において、粘着力は非水浸時に $c_d = 9.8 \text{ kPa}$ であったが、水浸により粘着力 $c_d = 0.9 \text{ kPa}$ となり、90.8%低下している。内部摩擦角は、非水浸が $\phi_d = 47.3^\circ$ 、水浸が $\phi_d = 37.2^\circ$ と、 10.1° の違いがあった。このように、水浸によって大きな強度低下が生じることが明らかとなった。これは、現場密度条件においては、土粒子同士の間隔が大きいため、水浸することによって土粒子一つ一つが水の膜に包まれ、土粒子のかみ合わせの力が小さくなり粘着力、内部摩擦角ともに非水浸に比べ低下したと考えられる。締固め密度条件においては、非水浸では粘着力 $c_d = 18.4 \text{ kPa}$ 、水浸では $c_d = 5.0 \text{ kPa}$ であり、72.9%の低下があるものの、内部摩擦角に関しては、非水浸が $\phi_d = 60.9^\circ$ 、水浸が $\phi_d = 58.6^\circ$ と、現場密度条件に比べて低下は少ない。これは、締固め密度条件においては、土粒子同士の間隔が非常に小さいため、水浸しても土粒子同士に働くかみ合わせの効果が保たれるためと考えられる。

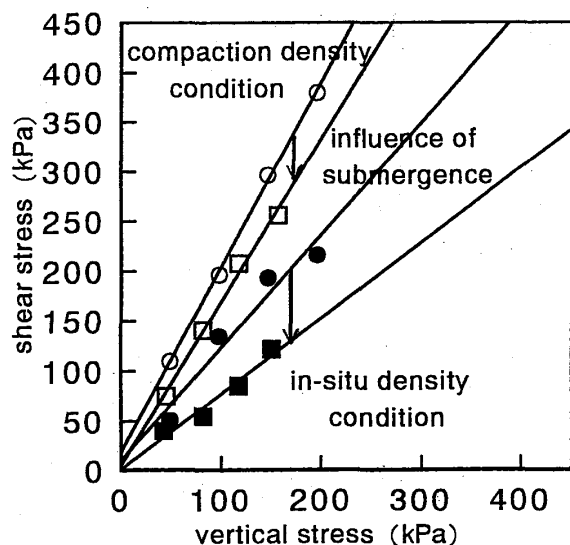


Fig. 9 Relation between vertical stress and shear stress.

Table 3 Strength parameter.

density condition	in-situ	compaction
non-submerged	Cd=9.8kPa $\phi d=47.3^\circ$	Cd=18.4kPa $\phi d=60.9^\circ$
submerged	Cd=0.9kPa $\phi d=37.2^\circ$	Cd=5.0kPa $\phi d=58.6^\circ$

Table 4 Short-time allowable bearing capacity.

density condition	in-situ	compaction
non-submerged (tf/m ²)	357	461
submerged (tf/m ²)	67	178
decreasing ratio (%)	81.2	61.4

(3) 水浸時の支持力の低下

前述の(2)では水浸に伴うせん断特性の変化について検討を行い、水浸により強度定数が低下することが明らかとなった。ここでは、この強度定数の低下が地盤支持力にどの程度影響するかを考察する。

地盤の短期許容支持力算定式として、下記の建築基礎構造設計指針⁶⁾を用いる。

$$q_a = \frac{2}{3} (\alpha c N_c + \beta \gamma_1 B N_\gamma + \frac{1}{2} \cdot \gamma_2 D_f N_q) \text{ (t/m}^2\text{)}$$

ここで、地表面上に底面幅10mの正方形基礎が直接載

荷した場合を想定し、地盤定数は本研究で得られた値を適用した。

Table 4に、得られた短期許容支持力度を一覧する。現場密度条件における支持力度は、非水浸時に357tf/m²と大きな値を示すが、水浸により67tf/m²に減少する。その減少率は81.2%であり、水浸によって非常に大きな支持力の低下が見られる。一方、締固め密度条件では、非水浸時では461tf/m²、水浸178tf/m²であった。用いた内部摩擦角が大きいため得られた支持力度は非常に大きい値ではあるが、水浸による支持力低下の割合を考えた場合、減少率は61.4%と大きい。支持力減少率を比較した場合には、締固め密度条件の方が現場密度条件よりも19.8%小さい値となっている。このことから、水浸による強度低下を減少させるためには、締固めにより密度を上昇させる方策が必要であると言える。

5. ま と め

本研究では、雲仙・普賢岳火山成粗粒土を試料として、水浸に伴う圧縮及びせん断特性の変化について実験的に究明するとともに、この得られた結果を用いて支持力の算定を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

・圧縮特性の変化について

- (1) 圧縮ひずみとpF値の関係では、pF値が下がり始める際に、圧縮ひずみが増大する傾向、すなわち水浸沈下の発生が見られる。
- (2) 載荷圧力と圧縮ひずみとの関係から、水浸による圧縮ひずみは、現場密度条件においては0.1~0.6%の範囲に、締固め密度条件では0.2%以内の範囲にあるが、いずれも圧縮ひずみは小さい。
- (3) 水浸により生じた増分ひずみと乾燥密度との関係から、乾燥密度が低い場合は、載荷圧力が小さいほど増分ひずみが大きい、乾燥密度が大きい場合は、載荷圧力が大きくなるにしたがい増分ひずみは大きくなることから分かる。これは、実験に用いた試料が流水による淘汰が少なく角張っているため、土粒子が大きな圧力によって破壊されひずみが進行したためと考えられる。

・せん断特性の変化について

- (4) 定圧一面せん断試験から得られたせん断応力—水平変位曲線は、両密度条件とも、水浸時には最大せん断応力は非水浸時と比較して低下するとともに、曲線のピークはなだらかとなる。
- (5) 水平変位と垂直変位の関係では、締固め密度条件の方が現場密度条件より膨張量が大きい、両密度

条件とも水浸による影響として膨張量の低下が生ずる。

- (6) 水浸により強度定数は低下する。密度の大きい現場密度条件の方が、強度定数の低下割合は大きい。その原因として、密度が高い締固め密度条件においては、土粒子同士の間隔が非常に小さいため、水浸しても土粒子同士に働くかみ合わせの効果が保たれているためと考えられる。
- (7) 水浸による強度定数の低下が地盤支持力にどの程度影響するかを検討した結果、支持力度の減少率を比較した場合、締固め密度条件の方が現場密度条件よりも小さい値となっており、水浸による強度低下を減少させるには、締固めにより密度を上昇させる方策が必要であることが言える。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、中央開発㈱ 中村裕昭氏には有益なご助言を頂いた。また、㈱ウエスコには研究助成金を頂いた。ここに感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 三浦・八木：火山灰質土粒状体の圧密・せん断による粒子破碎とその評価, 土木学会論文集, No.561/Ⅲ-38, pp.257-269, 1997.3.
- 2) 鬼塚・吉武：破碎性まさ土の低圧条件下におけるせん断特性, 土木学会論文集, No.400/Ⅲ-10, pp.141-150, 1988.12.
- 3) 後藤・山中他：雲仙・普賢岳火山性土石流堆積物の有効利用に向けた物理及び力学特性の把握, 火山灰質土の性質とその設計・施工に関するシンポジウム発表論文集, 地盤工学会, pp.313-320, 1995.10.
- 4) 後藤・山中・末久他：火山成粗粒土の水浸沈下特性の実験的研究, 平成7年度土木学会西部支部研究発表論文集, pp.622-623, 1996.3.
- 5) 平・難波他：雲仙土石流土の工学的性質, 自然工学西部地区部会報・論文集, Vol.15, pp.65-71, 1993.2.
- 6) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針, pp.117-128, 1988.