

令和 2 年 5 月 4 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2019

課題番号：16K06575

研究課題名（和文）繰返し高圧力を受ける土粒子の破碎特性に関する研究

研究課題名（英文）Crushing characteristics of soil particles under high pressure cyclic loads

研究代表者

山本 春行（YAMAMOTO, HARUYUKI）

広島大学・国際協力研究科・特任教授

研究者番号：60158293

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）： 粒子破碎現象が発生すると粒状体に急激な体積減少が生じると同時にせん断強度が大きく低下していくため地盤の支持力が減少し、特に杭基礎先端支持力設計においては相当厳しい問題となる。上、急激な沈下の原因となる。また、高層建築物を支持する杭基礎においては、地震時のロッキングにより杭頭には繰返し荷重が作用することとなり、杭周摩擦抵抗力の減少効果も加わって杭先端部には相当大きな繰返し力が発生している。

このような問題を解明し、繰返し破碎実験から定量的な設計根拠を得ることが主目的であり、本研究における破碎実験結果から繰返し高圧力作用下の粒子破碎に関する基本的な性質が明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果の学術的意義は、高圧拘束下における地盤の変形強度特性を表す構成関係を土粒子の破碎現象そのものを基に構築する場合に土粒子の破碎に伴う地盤の体積収縮傾向や土粒子の微細化に伴う内部摩擦角の急激な減少傾向を定量的に説明するための基礎データとなるということである。

高圧拘束下の粒子破碎現象を考慮した地盤の変形や破壊現象が合理的に推定できるようになれば、破碎性地盤中の杭先端部近傍地盤の変形・支持力の推定精度が向上し、さらに繰返し効果をも考慮すれば地震時の杭先端支持力問題にも応用できるものと考えられ、より安全で合理的な設計根拠となる点に社会的な意義がある。

研究成果の概要（英文）： In practice, it may be important that the behavior of volume shrinkage and decreasing of shear strength due to particle crushing around pile tip in crushable sandy soils. The particle crushing of sandy soils are reasons of the rapid increasing of settlements and the decreasing of pile tip bearing capacity. The repeated forces acting on the pile tip of high-rise building foundations are large by the cyclic additional load on pile head and decreasing effect of pile skin frictional resistance due to seismic rocking of superstructure.

In this study, the fundamental features of particle crushing under the cyclic high-stress conditions are found by the results of particle crushing tests with the high pressure true tri-axial compression apparatus. The experimental results are used for the designs and simulations of pile foundations under considering the particle crushing of soils.

研究分野：地盤・基礎工学

キーワード： 粒子破碎 せん断強度 三主応力制御型高圧圧縮試験機 繰返し荷重 応力経路 粒子破碎量 塑性仕事量 杭先端支持力

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 高圧縮力を受ける土粒子の破砕現象は、よく知られており三方向からの圧力を等しく作用させる等方圧縮実験や、側方への変位を拘束して鉛直方向にのみ载荷する K_0 圧縮実験等が以前より行われており、粒子破砕に伴う応力～体積ひずみ関係ならびせん断強度の低下現象、さらに破砕粒子の形状測定等が実験的に行われてきた。ただし、それらは限られた単調増加応力経路下のものであり、三次元応力下における一般的な性状を抽出した結果とは見なせず、繰返し高圧载荷下での粒子破砕性状をも考慮した構成関係式(増分型応力～ひずみ関係)の構築までに至っていない。

(2) 地震時の応力経路に対応させて三主応力を制御しつつ繰返し高圧縮力を作用させた実験結果は皆無であり、特に杭先端面の角部近傍地盤では非常に大きな拘束圧の中で繰返しせん断力が作用するものと考えられ(図1参照)、このような応力経路が実現できる三主応力制御型高圧圧縮試験機により繰返し応力履歴下の破砕性状と力学特性を調べそれらを定量化することを着想した。

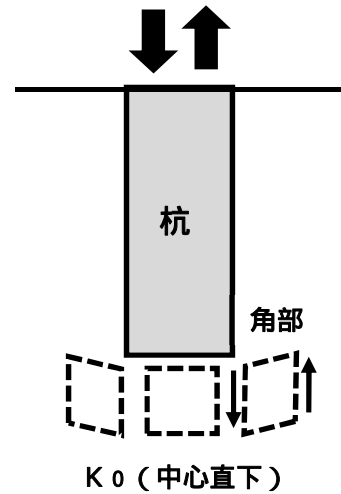


図1 杭先端面角部の繰返しせん断力

2. 研究の目的

三主応力制御型繰返し高圧圧縮試験機を用いて、土粒子に破砕が生じる場合の地盤の変形性状ならびに強度特性について調べ、地震時の支持杭の先端支持力と沈下の推定に役立てる。杭先端近傍地盤中の土粒子は、ある限度以上の高圧下では粒子破砕が発生することが知られており、特に地震時には周面摩擦力の低下ならびに上部構造物のロッキングによる杭への押込み力の増大により土粒子破砕傾向は顕著になるものと考えられる。そして、土粒子破砕が発生すれば地盤の圧縮性は増大し、土粒子の微細化に伴い内部摩擦角も急激に減少していくため、杭の沈下が急増し、設計時に粒子破砕現象を想定していない破砕性地盤上の構造物の非可逆的な沈下や傾斜が進行していく。このような粒子破砕問題の解決に資する基礎的な研究であり、想定される繰返し高圧応力経路下での破砕の進行現象についても調査することを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 図2に示す三主応力制御型高圧圧縮試験機を用いて、最大平均主応力の大きさがそれぞれ異なる等方圧縮、 K_0 圧縮(側方変位を拘束)ならびにせん断破壊直前に至る状態の3ケースの応力経路を設定し、それぞれの応力経路毎に繰返し载荷回数(1, 10回)を変えた载荷実験を行い、土粒子の破砕性状について調べた。この試験機は本研究のために設計・製作したオリジナルな装置であり、三次元応力場における任意な応力経路により破砕実験を実施できる。図2中の拡大図に示すように、試験機の中心部に角部を平らにした $50 \times 50 \times 50\text{mm}$ の立方体形状の試験体を設置し、試験体には载荷板を通して最大で 200MPa まで加圧可能な油圧ジャッキによって载荷される。载荷装置や载荷板等の可動部分はすべてボールプッシュで支持され、摩擦抵抗なく自由に移動が可能である。相対する载荷板は一方の载荷板の反力を利用して载荷されるため、ボー

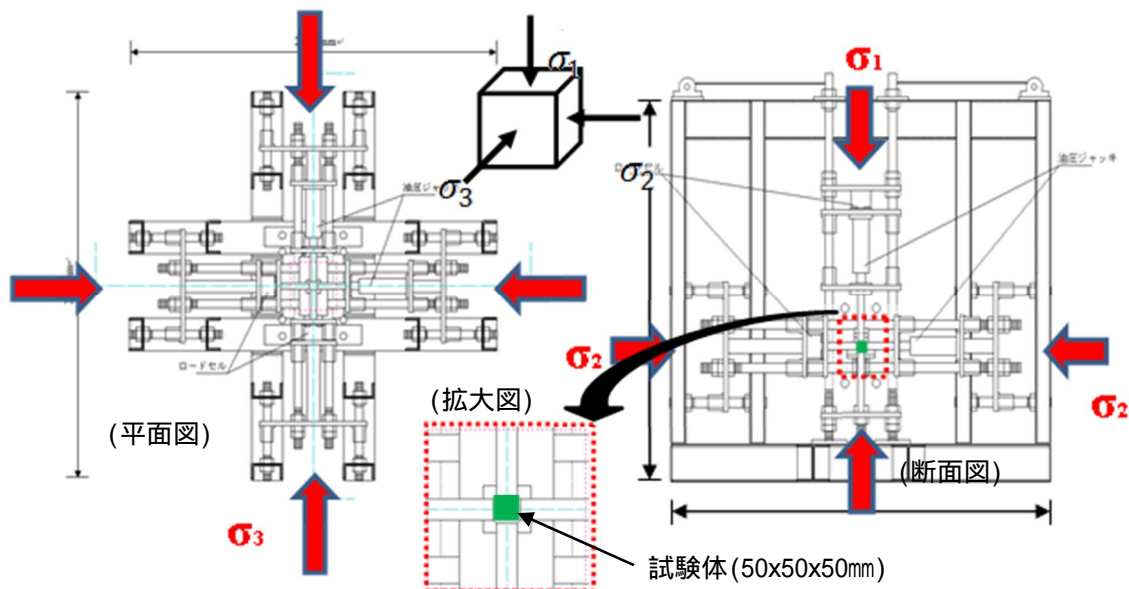


図2 三主応力制御型高圧圧縮試験機(200Mpa max)

ルブッシュ部分での摩擦がなければ相対する二つの載荷板に同時に等しい大きさの圧力を加えることができ、変位も二つの載荷板でほぼ等しくなる。上下方向においては載荷装置や載荷板の重量はすべて滑車を通した重りによって支えるようにし、相対する載荷板からの荷重が水平二方向の場合と同様に等しくなるよう工夫した。また、それぞれの載荷板面には薄紙を介してシリコングリースを塗布し、砂試験体との間の摩擦を低減させた。

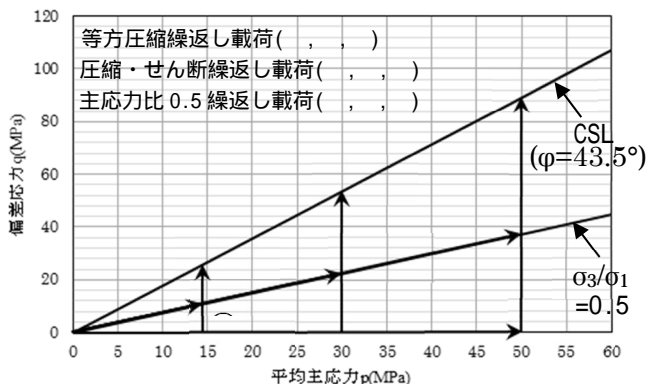


図3 p-q面における繰返し応力履歴

(2) 本実験で用いた豊浦砂は円みをおびたほぼ単一粒径の粒子から成る珪砂で、組成はそのほとんどがシリカ(SiO₂)である。一般的な方法で豊浦砂の粒度試験を行うと、粒径が 125 μm ~ 297 μm の間の粒子の重量割合が多く、74 μm 以下の粒子はほとんどない。試験体の初期相対密度が 90% 以上になるように締固めを行い、図3に示す平均応力 p - 偏差応力 q 面における各応力経路での繰返し圧縮・せん断試験を行った。同図中の CSL (限界状態線)は、内部摩擦角 $\phi = 43.5^\circ$ (相対密度 90% における低拘束圧下での三軸圧縮試験より得られた値) に対応しており、まず、垂直応力、水平応力が等しい状態での繰返し等方圧縮を行い、試験体の変位および荷重を計測した(, ,)。次に等方圧縮後、平均応力 p が一定のままに偏差応力を加えていく経路での繰返し圧縮・せん断試験を行った(, ,)。ただし、試験体の鉛直変位が急速に増加し、せん断破壊が始まると判断した時点で偏差応力 q を減少させた。さらに、主応力比が常に 0.5 となる状態での繰返し圧縮試験を行った(, ,)。主応力比が 0.5 となる場合、側方変位がほとんど生じないため Ko 圧縮に近い応力経路となる。なお、それぞれの試験における繰返し回数は 1 回と 10 回の場合とを比較した。繰返し 1 回の試験はそれぞれの応力経路における粒子破砕に関する基本値を得るためであり、繰返し 10 回の試験は 1 回の地震における主要動を 10 回程度と想定したものである。

4. 研究成果

(1) 図4に繰返し回数 1 回と 10 回の場合の粒子形状の変化を比較して示す。なお、これらは各実験後に 20 個の粒子をランダムに取り出し、デジタルマイクロスコープにより計測した平均値である。同図より、多数回の繰返し荷重を受けるに従って、より細長く、表面の凹凸が大きくなることが分った。

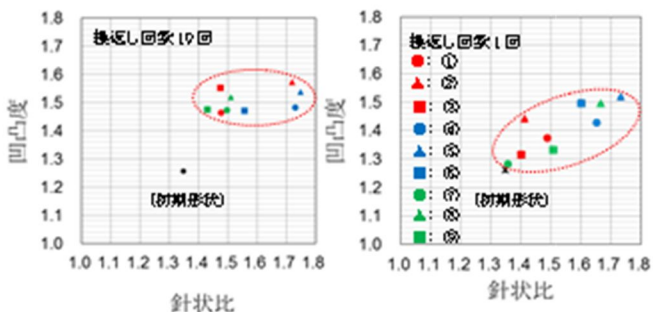


図4 凹凸度～針状比関係

(2) 図5は、粒子破砕量 Br と最大平均応力 p との関係を示したものである。最大平均応力 p が小さいケース(, ,)では、繰返し荷重の影響はあまり見られないが、最大平均応力 p が大きくなると(, ,)、繰返し荷重により粒子破砕はさらに進行していくことが分った。

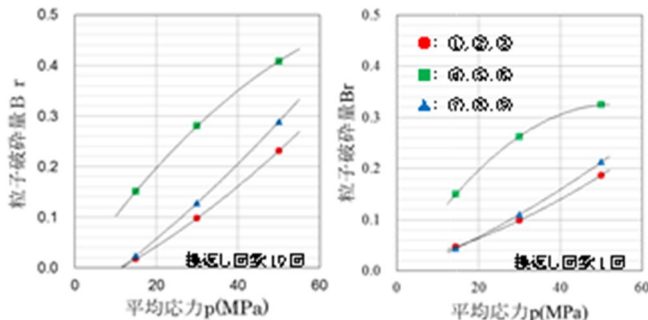


図5 粒子破砕量 Br ~ 最大平均応力 p 関係

(3) 図6は、偏差応力 - 偏差ひずみ関係、ならびに平均応力 - 体積ひずみ関係の曲線が描く 1 サイクル毎の面積の集計から得た単位体積当たりの塑性仕事量と最大平均応力 p との関係を示したものである。同図より、等方圧縮のケース(, ,)に対して、圧縮・せん断のケース(, ,)では、せん断力が作用することにより、粒子破砕がより進行し、塑性仕事量はかなり大きくなることが分る。なお、繰返し荷重する毎に、その間の塑性仕事増分量は次第に小さくなっていき、土粒子の細粒化に伴い粒子破砕の進行も緩慢になっていく様子も分った。つまり、同じ到達最大荷重下での繰返し荷重により粒子破砕は進行していくものの第 1 回目の作用荷重下での破砕が主要量であり、5 回目の繰返し荷重で 1 回目の約 1.5 倍程度に増加し、10 回程度繰返し荷重すれば粒子破砕の進行は 1 回目の約 2.0 倍程度となりほぼ停止する。

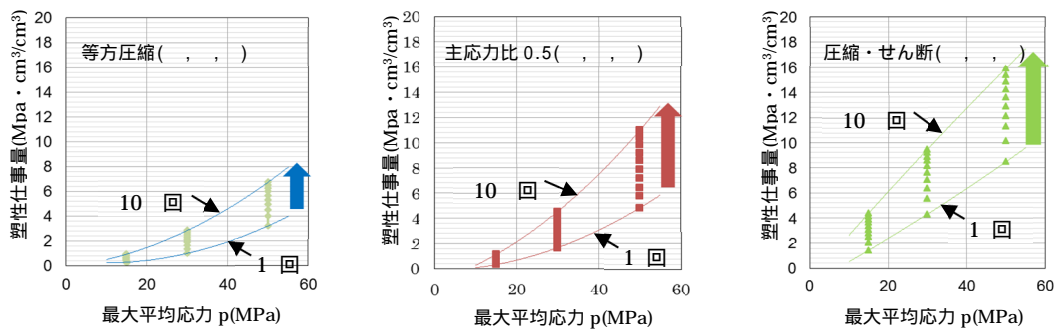


図6 塑性仕事量～最大平均応力 p 関係

(4) 図7は、粒子破砕量 Br と繰返し
 载荷回数 1 回目、ならびに 10 回目
 における蓄積された塑性仕事量との関
 係を示したものである。今回用いた塑
 性仕事量には粒子破砕以外で消費さ
 れたエネルギーも含まれているが、両
 者の間にはかなりユニークな関係が
 存在することが分る。また、繰返し載
 荷回数 10 回目に相当する近似直線は
 1 回目に相当する近似直線の延長上
 から外れており、繰返し効果によっ
 て粒子破砕量の増分よりも塑性仕事量
 の増分の方が大きくなる性状がある。
 2 回目以降の载荷過程においては、
 塑性仕事として費やされるエネルギ
 ーの内、粒子破砕分の増加よりも粒
 子間摩擦他の塑性変形に起因するもの
 の増加分が次第に増してくるものと
 考えられる。

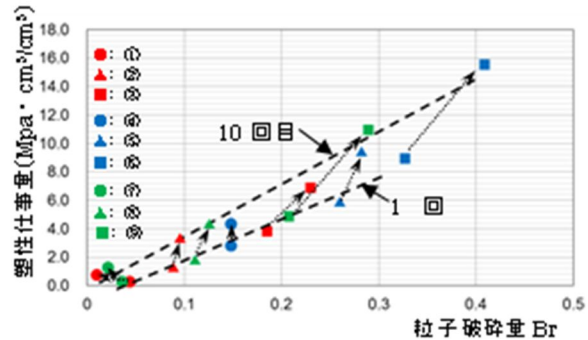


図7 塑性仕事量～粒子破砕量関係

(5) 塑性体積ひずみと粒子破砕量 Br 共に非可逆物理量であり、これらはほぼ直線関係となっており、図7の結果から塑性仕事量と塑性体積ひずみを直接関連付けることができる。これまでの粒子破砕に関する実験的研究は全て1回载荷のみの場合であり、本研究における多サイクル载荷の場合の破砕実験と結果の導出は初めてであり、地震時荷重が問題となるような多サイクル载荷下での粒子破砕を考慮した粒状体の構成関係式を導く際の有効な指標となる。

(6) これら結果の汎用性を担保するためには今後次ぎのようなさらなる検討が必要である。
 本研究における繰返し破砕実験結果とその考察は豊浦砂という比較的破砕強度の大きい種類の粒状体に関するものであり、他の種類の粒状体(破砕強度が小さいものや中程度のもの)の破砕実験を実施すること。

平均応力 p-偏差応力 q 面において設定した応力到達点(最大点)に至る経路は無限にあるが、杭先端直下の地盤に発生する応力経路を類型化(例えば先端中央部や角部等での応力経路)して粒子破砕に及ぼす類型化した応力経路毎の影響について調べる。

< 引用文献 >

Jerry A. Yamamuro, Paul A. Bopp and Poul V. Lade, ONE-DIMENSIONAL COMPRESSION OF SANDS AT HIGH PRESSURES, Journal of Geotechnical Engineering, Vol.122, No.2, 1996, 147-154
 Hardin, B.O., Crushing of Soil Particles, Journal of Geotechnical Engineering, Vol.111, No.10, 1985, 1177-1192

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Shouta Sako, Keigo Fukuda and Haruyuki Yamamoto	4. 巻 7
2. 論文標題 Crushing characteristics of soil particles under high pressure cyclic loads	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of 7th J-P Geotechnical symposium	6. 最初と最後の頁 266-269
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yang Wu and Haruyuki Yamamoto	4. 巻 20
2. 論文標題 Influence of load mode on particle crushing characteristics of silica sand at high stresses	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Geomechanics	6. 最初と最後の頁 1-14
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001600.	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 山本春行, 福田慶吾, 卜部宏紀
2. 発表標題 粒子破碎に及ぼす応力経路の影響について
3. 学会等名 日本地盤工学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 KEIGO FUKUDA and HARUYUKI YAMAMOTO
2. 発表標題 CRUSHING CHARACTERISTICS OF SOIL PARTICLE ON THE EFFECT OF STRESS PATH
3. 学会等名 ASEA SEC-4（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山本春行, 福田慶吾
2. 発表標題 粒子破砕量と平均応力、偏差応力との関係について
3. 学会等名 日本地盤工学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 福田慶吾, 山本春行
2. 発表標題 土粒子の破砕性状に及ぼす偏差応力の影響について
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 福田慶吾, 卜部宏紀, 山本春行
2. 発表標題 土粒子の破砕性状に関する研究(その4 応力経路の影響について)
3. 学会等名 日本建築学会中国支部
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐古翔汰, 福田慶吾, 山本春行
2. 発表標題 土粒子の破砕性状に及ぼす応力履歴の影響について(その1. 破砕試験における応力経路の設定)
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 佐古翔汰, 福田慶吾, 山本春行
2. 発表標題 土粒子の破碎性状に及ぼす応力履歴の影響について(その2. 実験結果)
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 福田慶吾, 佐古翔汰, 山本春行
2. 発表標題 土粒子の破碎性状に関する研究(その3. 破碎における偏差応力の影響について)
3. 学会等名 日本建築学会中国支部
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山本春行, 福田慶吾
2. 発表標題 粒子破碎量と平均応力、偏差応力との関係について
3. 学会等名 地盤工学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山本春行
2. 発表標題 三軸高圧条件下の土粒子の破碎性状に関する研究
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 佐古翔汰, 福田慶吾, 山本春行
2. 発表標題 土粒子の破砕性状に関する研究
3. 学会等名 日本建築学会中国支部
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	呉 揚 (Wu Yang)		