

石炭灰造粒物を用いた SCP 改良地盤の液状化振動台実験

Liquefaction Shaking Table Tests of Improved Ground with SCP Using Granulated Coal Ash

山本 陽一 YOICHI YAMAMOTO
高橋 直樹 NAOKI TAKAHASHI
三上 博 HIROSHI MIKAMI
中田 雅夫 MASAO NAKATA

砂代替材として開発された石炭灰造粒物を SCP 工法の中詰材料に使用した場合の液状化対策としての有効性を確認すること、SCP 改良地盤の振動前後の土圧係数の変化について明らかにすることを目的として、実施工を模擬するように模型地盤を作製し振動台実験を実施した。実験の結果、石炭灰造粒物を用いた場合の改良効果は従来の良質な砂を用いた場合と同等以上であることが確認された。また、加振後の土圧係数は 1.0 に収束する傾向を示し、SCP 改良地盤の静止土圧係数は地震後に低下する可能性が指摘された。

キーワード：液状化，サンドコンパクション，振動実験，石炭灰，土圧係数

The objectives of this study were to verify the effectiveness of using granulated coal ash as the fill material in an SCP method for liquefaction countermeasure, and to identify the changes in coefficient of earth pressure after the vibration. A model soil layer that simulated the actual improved ground was subjected to the shaking table test. It was verified from the cone penetration resistance and post-vibration excess pore pressure of the model soil layer that granulated coal ash was as effective as or more effective than high-quality sand for improving soils. The post-vibration coefficient of earth pressure tended to finally reach 1.0.

Key Words: coal ash, coefficient of earth pressure, liquefaction, sand compaction pile, vibration test

1. はじめに

近年、環境負荷低減またはリサイクルの促進を目的として、サンドコンパクションパイル工法（以下 SCP）の中詰材料に再生骨材^{1),2)}や建設発生土^{3),4),5)}、石炭灰^{6),7)}等を用いた施工法が検討・開発されている。今後、SCP 工法に使用される中詰材料はこれらのリサイクル材料が主流になってくると予想される。

一方、SCP 工法では、締固めによる密度増加のみならず地盤内の平均有効応力（静止土圧係数）の増加が、改良地盤の液状化抵抗を増大させることが知られている。SCP 改良地盤の改良効果は、通常、標準貫入試験の N 値から確認されるが、改良後の N 値増分の 2~8 割は静止土圧係数の増加に伴うものであるとの報告^{8),9)}もある。この割合は改良前の N 値、初期間隙比、細粒分含有率等によって変わると考えられるが、静止土圧係数の増加は無視できない影響であることが明らかである。また、

SCP 打設に伴う静止土圧係数の増加は原位置計測^{9)~13)}や室内模型試験^{14),15)}により測定されているが、液状化を生じるような大きな地震動を受けた後にどのように変化するかは明らかとなっていない。

このため、本研究では、砂代替材として開発された石炭灰造粒物⁷⁾と従来の良質砂相当品を使用した場合の振動台実験結果を比較することにより、砂代替材の液状化対策としての有効性確認を目的に、振動台実験を実施した。さらに、実施工を模擬するように土槽内に突き固めた杭を作製することによって、改良地盤の作製から加振、加振後の間隙水圧消散に至る一連の過程の水平土圧を継続して計測し、振動前後の土圧係数の変化について明らかにすることも目的の一つとした。

表-1 実験試料の物理特性

試料		浜岡砂	まさ土
土粒子の密度	ρ_s	2.699 g/cm ³	2.679 g/cm ³
粒 度	砂分	100.00%	84.56%
	シルト分	0.00%	12.14%
	粘土分	0.00%	3.30%
	均等係数	2.31	10.00
	曲率係数	1.03	1.01
最大乾燥密度	$\rho_{d \max}$	1.694 g/cm ³	1.549 g/cm ³
最小乾燥密度	$\rho_{d \min}$	1.396 g/cm ³	1.223 g/cm ³

※まさ土は2mmアンダー試料に対する結果

表-2 Hiビーズの基本配合

石炭灰	セメント	ベントナイト	水
87%	10%	3%	20~24%

※すべて重量比, 水は粉体総重量に対する比



写真-1 石炭灰造粒物 (Hiビーズ)

2. 実験概要

(1) 実験試料

実験には遠州浜岡砂 (以下浜岡砂) と広島産のまさ土 (以下まさ土), そして石炭灰造粒物 (商品名 Hi ビーズ) を用いた。表-1 に浜岡砂とまさ土の物理特性を示す。実験ではまさ土を上層の液状化層として使用し, 浜岡砂は下層の非液状化層として使用した。また, 模型杭中詰め材料には, 良質の砂相当品とみなす浜岡砂と砂代替材とする Hi ビーズを用いてそれぞれのケースを比較した。

Hi ビーズは SCP 工法および SD (サンドドレーン) 工法の中詰め材料として開発され⁷⁾, 長期安定性¹⁶⁾や環境影響評価¹⁷⁾の他, 実証打設試験による改良効果 (N 値分布等)^{18),19)}や施工性^{20),21)}が既に確認され商品化されている。Hi ビーズは表-2 に基本配合を示すように, 主材料を石炭灰, セメント, ベントナイトおよび水としており, 連続ミキサー内でベントナイトを微量添加する

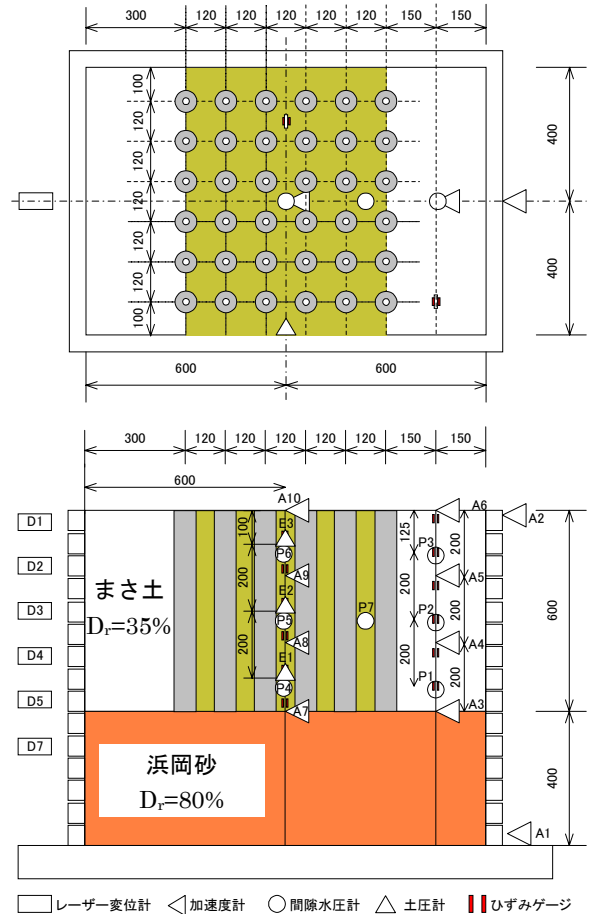


図-1 模型地盤概要および計測器配置

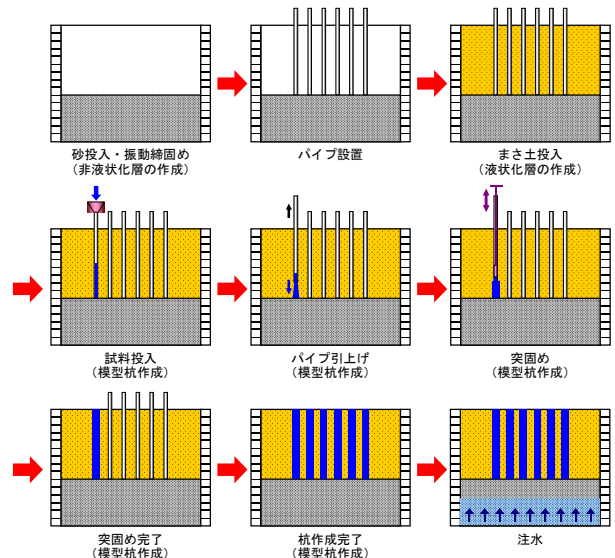


図-2 模型地盤作成方法

ことにより安定した造粒物の作製を可能としている (写真-1)。本実験では模型縮尺 (約 1/10) の関係から, 5mm ふるい通過試料の Hi ビーズを使用した。



写真-2 模型杭の状況（地中）

表-3 実験ケース

実験ケース	改良方法	中詰材料
ケース1	無改良	—
ケース2	SCP	浜岡砂
ケース3	SCP	石炭灰造粒物

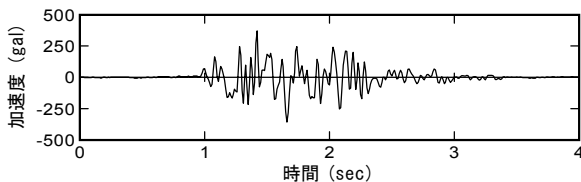


図-3 入力加速度波形（土槽底面の計測値）

(2) 振動台実験

振動台実験は、幅1.2m×奥行0.8m×高さ1.0mのせん断土槽を用いて重力場で行った。図-1に模型地盤概要および計測器配置を示す。模型地盤は下層40cmの非液状化層（浜岡砂にて作成）と上層60cmの液状化層（まさ土にて作成）の2層構造とした。

図-2に模型地盤の作製方法を示した。下層は非液状化層とするため乾燥した浜岡砂を投入後、高周波の振動加振により相対密度 $D_r=80\%$ に締固めた。その後、所定の位置に外径27mmのパイプを設置した状態で、まさ土を空中落下させて上層液状化層を作製した。この時（模型杭突固め前）、上層のまさ土層の相対密度は $D_r=35\%$ であった。

模型杭の作成は、あらかじめ設置したパイプ内にまず所定量の中詰材料を投入し、パイプを5cm引上げた状態でランマーにより突き固めて行った。この工程を繰り返して模型杭を所定数打設し、改良地盤を作製した。

模型杭は120mmピッチの正方形配置で、突固め後の杭径はおおむね65mmとなることから、改良率は $a_s=20\%$ 程度となる。写真-2に実験終了後の地中における模型杭の状況を示す。模型杭の突固め後、土槽下部より通水

して地盤を飽和させた後に、振動台による加振実験を行った。実験は表-3に示す3ケースについて行い、入力波には図-3に示すホワイトノイズ（0～30Hz）を用いた。

3. 改良地盤の状態

(1) コーン貫入試験結果

図-4(a), (b)に、それぞれケース2, ケース3の模型地盤改良範囲外の周辺地盤に相当するコーン貫入抵抗の深度分布を示す。また、図-5(a), (b)には、それぞれケース2, ケース3の改良地盤内でのコーン貫入抵抗の深度分布を示す。いずれも上層まさ土層での結果である。周辺地盤の締固め前の相対密度は $D_r=35\%$ と緩く、貫入抵抗も最大 50kN/m^2 程度の値に収まっている。また、貫入抵抗は深部で大きくなる傾向にあり、拘束圧依存性が伺える。模型杭突固め後（通水前）の貫入抵抗は周辺地盤においても増加しているが、その値は 100kN/m^2 を超えるに至っていない。一方、模型杭突固め直後（通水前）の改良地盤の貫入抵抗値は、周辺地盤のそれと比較して大幅に増加しており、模型杭作製により十分な締固め効果を発揮したことを表している。この時の、改良地盤の相対密度は杭の拡径（ $\phi 27\text{mm} \rightarrow \phi 65\text{mm}$ ）による体積変化から算出すると $D_r=122\%$ となる。相対密度が 100% を超えるのは、細粒分を多く含む土に対する現行の最大最小密度試験の限界が指摘²²⁾されているところによるものと考えられる。

模型杭作製後、地盤の飽和のための通水により、貫入抵抗値は通水前に比べて大きく低下し、周辺地盤ではまさ土層全層にわたり抵抗値を示さなかった。改良地盤でも大きく貫入抵抗値は減少したが、締固め前の状態よりは大きな貫入抵抗値を示している。このような通水後の貫入抵抗の低下は、まさ土層が水浸によりコラップスを生じて収縮・脆弱化したことによる。

加振後の貫入抵抗は周辺地盤、改良地盤で加振前に比していずれも増加しており、過剰間隙水圧消散による再圧縮により密度が増加したことを表している。

図-6には、加振後の模型杭の貫入抵抗をHiビーズと浜岡砂の場合で比較して示した。深部においてHiビーズの結果が大きいのが、両者の模型杭はほぼ同程度の強度を有していると考えられる。ただし、同じ杭径とするのに、浜岡砂ではHiビーズに対して4倍程度の突固め回数を必要とした。突固め後の改良地盤（通水前）の貫入抵抗はいずれも高い値を示していたことから、Hiビーズの方が杭周辺地盤を効率的に締固めたと考えられる。

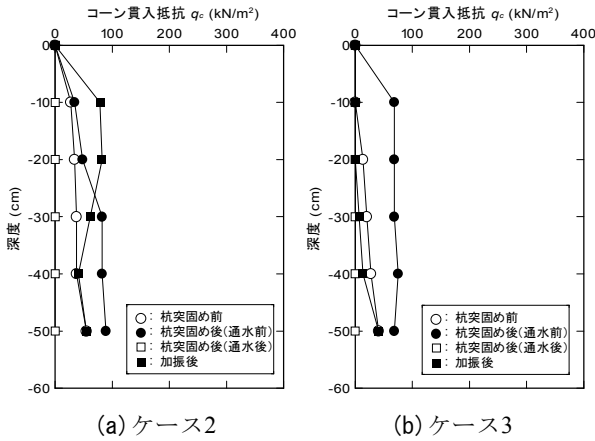
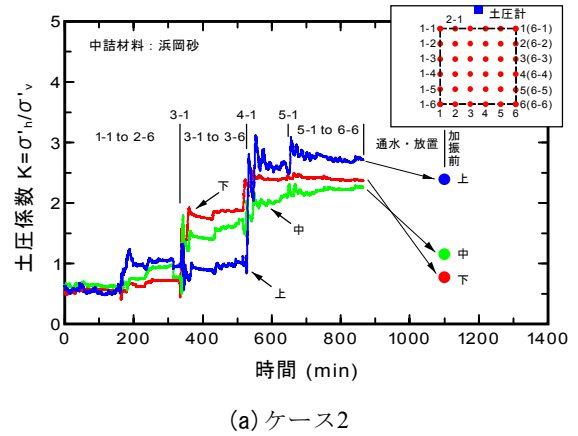
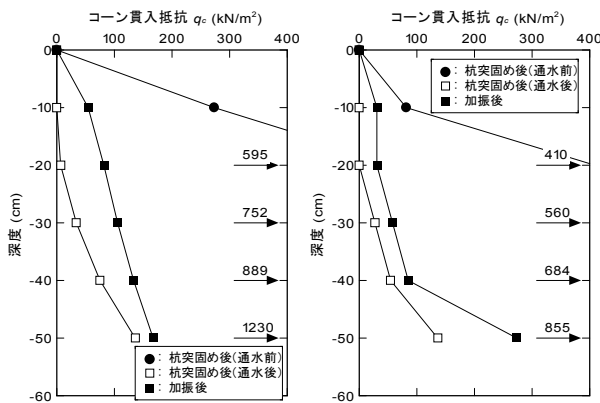


図-4 コーン貫入抵抗深度分布 (周辺地盤)



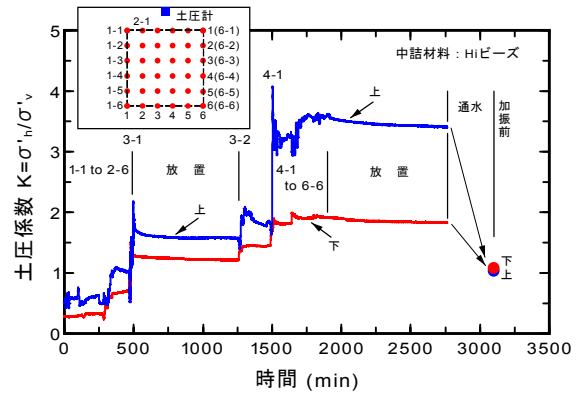
(a) ケース2



(a) ケース2

(b) ケース3

図-5 コーン貫入抵抗深度分布 (改良地盤)



(b) ケース3

図-7 土圧係数の経時変化 (突固め開始～加振前)

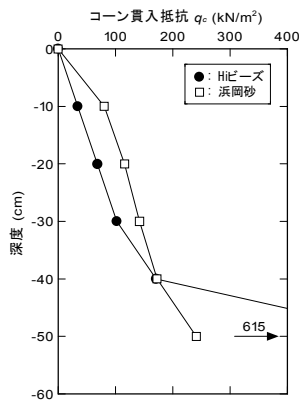


図-6 コーン貫入抵抗深度分布 (加振後模型杭)

(2) 土圧係数

図-7(a), (b)に, それぞれケース2, ケース3の模型杭突固め開始～加振前の状態における土圧係数 K の経時変化を示した。ここで, 土圧係数 K は $K = \sigma'_h / \sigma'_v$ と定義している。水平有効応

力は, 図-1に示す位置に設置した壁面土圧計 (上: GL-10cm, 中: GL-30cm, 下: GL-50cm) の値から求めている。図中の番号は模型杭の番号を表している。ケース3については, GL-30cmに配置した土圧計の不良のため示していない。

突固め開始前の K 値 (静止土圧係数 K_0 に相当) はほぼ 0.5 を示しているが, 締固め開始により増加し始め, 土圧計直近の模型杭作成時 (3-1, 4-1) において, 著しく K 値の増加する様子が認められる。突固め後の K 値はいずれのケースも 2~3 程度の範囲にあり, 地表に近いほど高くなる傾向にある。この値は, 本実験と同じ改良率である $a_s=20\%$ の実際の工事で確認されている SCP 打設後の静止土圧係数^{9),12),13)} と整合している。通水による飽和過程において, まさ土のコラップスにより水平土圧は減少し, 加振前の K 値はケース2, ケース3ともに 1~2.5 の範囲に低下している。しかしながら, 締固め開始前に比べると大きな値を維持していることから, 杭打設による締固め効果は低下したものの残存していると考えられる。

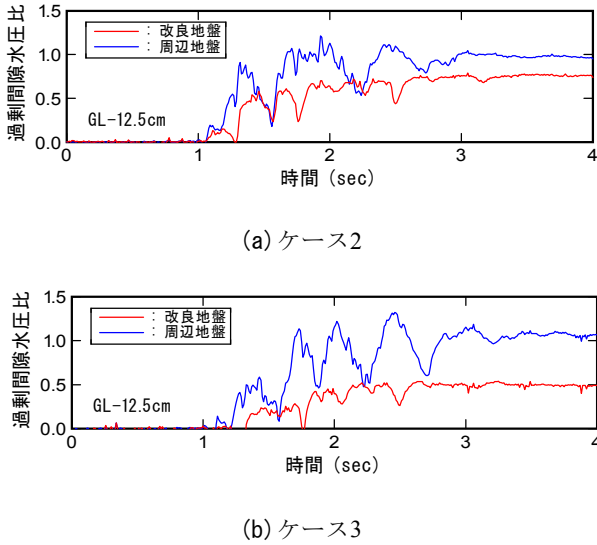


図-8 過剰間隙水圧比の時刻歴 (GL-12.5cm)

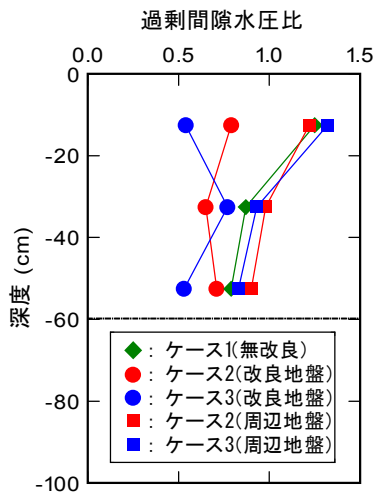


図-9 最大過剰間隙水圧比深度分布

4. 振動台実験結果

(1) 過剰間隙水圧比

図-8(a), (b)に、それぞれケース 2, ケース 3 の GL-12.5cm における過剰間隙水圧比の時刻歴を改良地盤 (中央計測位置) と周辺地盤と比較して示す。いずれのケースもこの深度における周辺地盤が過剰間隙水圧比 1.0 に達して液状化を生じているのに対して、改良地盤では液状化に至っておらずケース 2 で 0.7 程度、ケース 3 では 0.5 程度の過剰間隙水圧比の発生に留まっている。また、周辺地盤で過剰間隙水圧比は 1.0 を上回っているが、これは液状化による地表面の上下揺動の影響と考えられる。

図-9 は、各試験ケースの最大過剰間隙水圧比の深度分布を示しており、ケース 2 およびケース 3 については改良地盤と周辺地盤の結果を比較している。ケース 1 およびケース 2, ケース 3 の周辺地盤で同様の深度分布性状を示し、ほぼ全層で液状化を生じている。これに対して、ケース 2, ケース 3 の改良地盤では液状化に至らず、締固めによる液状化抑止効果が認められる。このことから、中詰材料に Hi ビーズを用いた場合も、従来の良質な砂を用いた場合と同等の改良効果を有していることが確認される。

(2) 地盤加速度

図-10, 図-11に、それぞれケース 2 とケース 3 の加速度時刻歴を、周辺地盤と改良地盤 (中央計測位置) で比較して示す。GL-60cm の層境における加速度波形は、いずれのケースも改良地盤と周辺地盤のそれぞれの計測位置において同一となっている。地表に近い位置ほど長周期化の傾向が強くなり、GL-5cm の周辺地盤の加速度は液状化による応答の低下を顕著に表している。改良地盤は液状化を生じていないことから、GL-40cm の加速度波形において改良地盤と周辺地盤の位相差は明確であるが、GL-5cm 地表部の改良地盤加速度波形は、改良地盤が液状化していないにも拘らず周辺地盤と同様の周期特性を表していることが分かる。

図-12(a), (b)には、最大加速度の深度分布を改良地盤 (中央計測位置) と周辺地盤について示した。ケース 1 は締固めを行っていないことから、両計測位置において GL-60cm 以浅のまき土層で液状化により減衰する同様の傾向を示している。ケース 2, ケース 3 の周辺地盤の加速度応答は、ケース 1 と同様である。改良地盤のケース 2, ケース 3 の締固めを行ったケースについては、液状化を生じていないことから、無改良のケース 1 および周辺地盤の結果に対して、地表面に向かって加速度は増加傾向にある。

(3) 水平変位

図-13, 図-14 にせん断土槽の水平変位とこの結果から求めたせん断ひずみのそれぞれ最大値の深度分布を示す。いずれのケースについても水平変位、せん断ひずみは、ともに GL-60cm 以浅のまき土層において発達している。水平変位に関しては、無改良のケース 1 に対してケース 2, ケース 3 の順で小さくなっており、過剰間隙水圧比の分布に見られた改良地盤の傾向と一致しているが、変位の低減は 1~2 割程度となっている。また、せん断ひずみについては、ケース 1 が最大 2% であるのに対してケース 2, ケース 3 でも最大 1.5% 程度と改良地

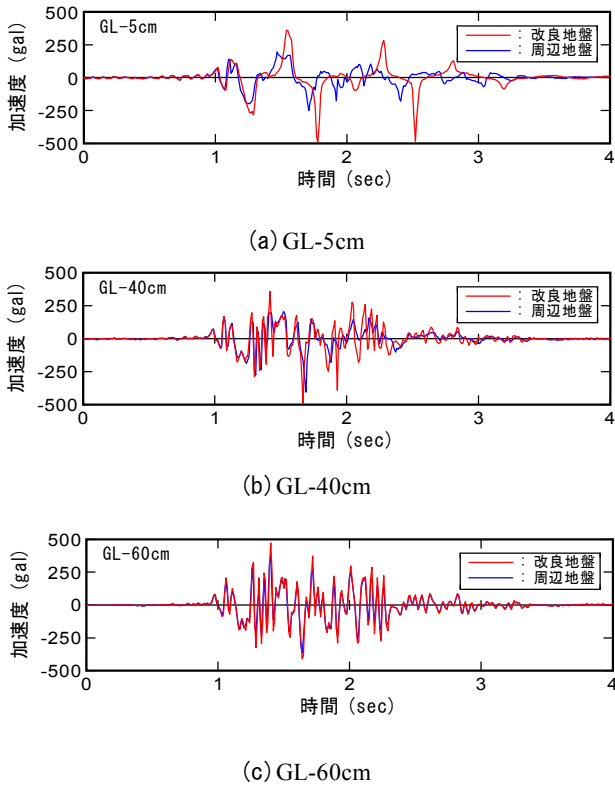


図-10 加速度時刻歴 (ケース2)

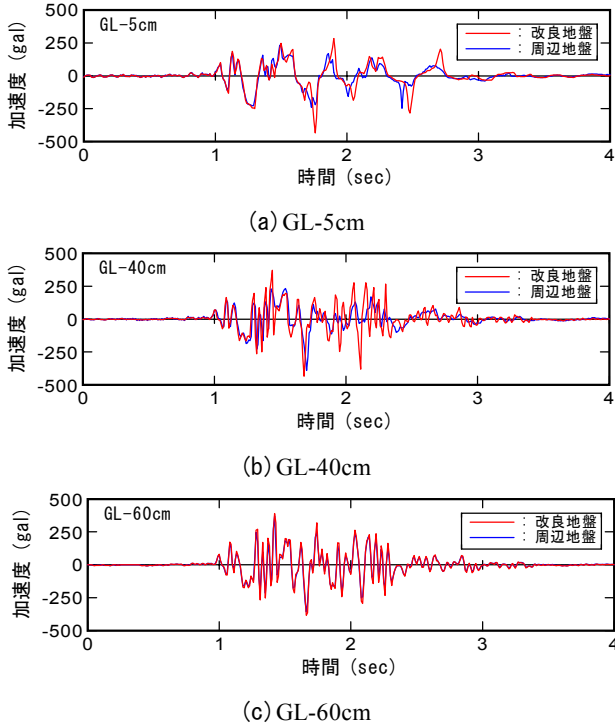
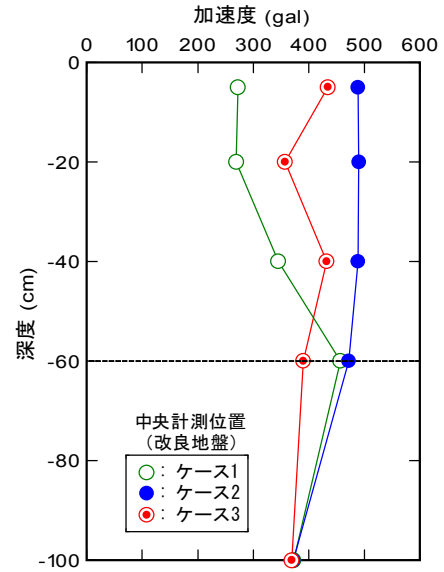
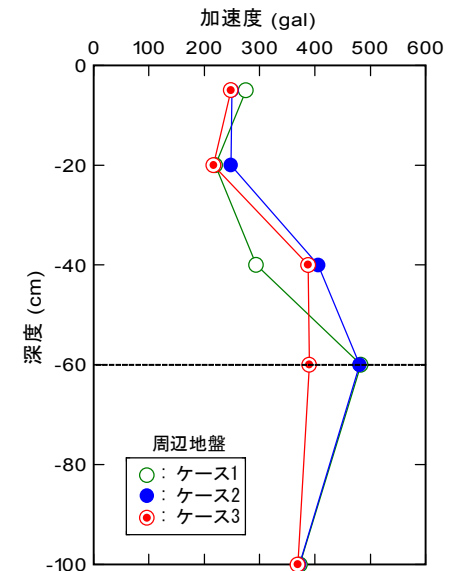


図-11 加速度時刻歴 (ケース3)

盤が液状化を生じていないことを考慮すると比較的大きな値を生じている。ケース1は全土槽の液状化に伴う水



(a) 改良地盤 (中央計測位置)



(b) 周辺地盤

図-12 最大加速度深度分布

平変位, せん断ひずみを表しているが, ケース2, ケース3は必ずしも改良地盤内の変位を代表するものではなく, 周辺地盤も含めた土槽全体の変位から求めた平均的な変形を表していると考えられる。このように, 水平変位の分布からは本実験の改良率に対する改良効果としては十分ではない。これは, 水浸時にまさ土がコラプスを生じて収縮・脆弱化したことにより, 締固め効果が減じられた影響が大きいと考えられる。

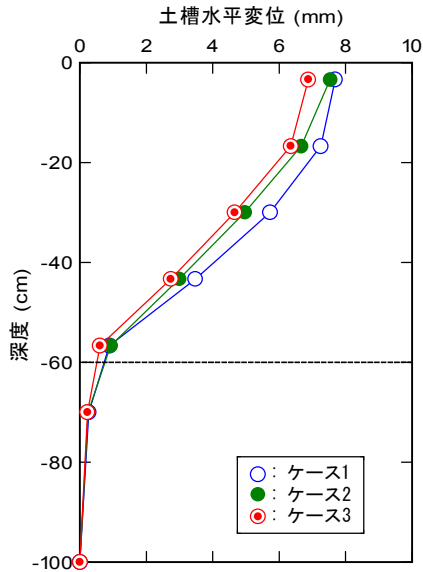


図-13 最大水平変位深度分布

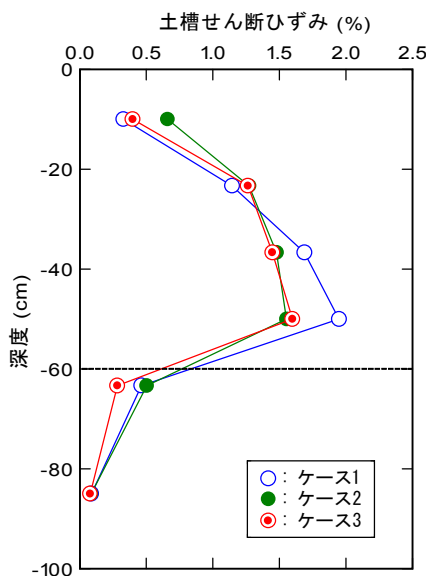
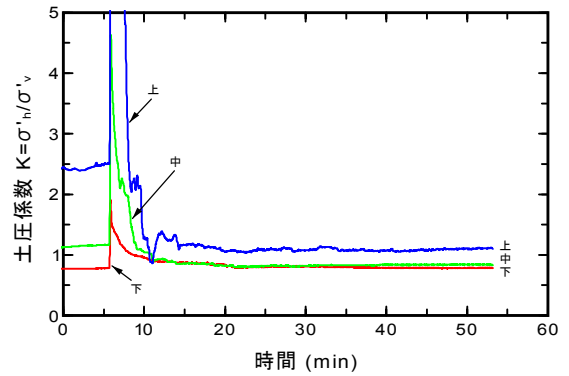


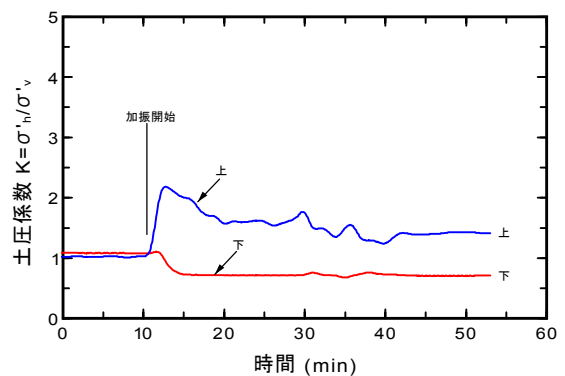
図-14 最大せん断ひずみ深度分布

(4) 土圧係数

図-15(a), (b)に、それぞれケース 2, ケース 3 の加振前～加振～水圧消散・放置過程における土圧係数 K 値の経時変化を示した。ここで、水平有効応力は、改良地盤内に設置した土圧計と間隙水圧計の計測値から算出しているが、それぞれの設置位置が異なるため（深度については 25mm）、過剰間隙水圧の値は深度に対して補正した値を採用した。このため、過剰間隙水圧が存在している過程の土圧係数は、土圧計設置位置の真の値を示すものではない。ケース 2 の加振前の土圧係数（静止土圧係数 K_0 に相当）はまさ土層下（GL-50cm）で 1.0



(a) ケース2



(b) ケース3

図-15 土圧係数の経時変化
(加振前～加振～水圧消散・放置過程)

をやや下回り、中（GL-30cm）で 1.0 程度、上（GL-10cm）で 2.5 程度の値を示している。ケース 3 の加振前の土圧係数は上・下とも 1.0 程度である。土圧係数は加振直後に増加し、過剰間隙水圧の消散とともに低下する傾向を示しており、ケース 2 でこの傾向が顕著である。加振後の全体的な傾向として、最終的な土圧係数は 1.0 に収束している。したがって、初期の土圧係数が 1.0 を上回っている場合は、1.0 に低下する傾向にある。このため、破壊を伴うような大きな地震動を受けた SCP 改良地盤の静止土圧係数は地震後に低下することが指摘される。

5. まとめ

本研究は、良質な砂代替材として開発された石炭灰造粒物を SCP 工法の中詰材料に使用した場合の液状化対策としての有効性を確認すること、SCP 改良地盤の振動前後の土圧係数の変化について明らかにすることを目的

として、実施工を模擬するように模型地盤を作製し振動台実験を実施した。以下に、本研究で得られた主な知見をまとめる。

- ① 改良地盤締固め後（通水前）、コーン貫入抵抗はいずれも高い値を示していたことから、締固め回数の少ないHiビーズの方がより効率的に周辺地盤を締固めることが可能であった。
- ② 締固め開始前の土圧係数は 0.5 を示し、締固め後の土圧係数は 2~3 程度と増加した。
- ③ 通水後の貫入抵抗、土圧係数は、水浸によりまさ土がコラプスを生じて収縮・脆弱化したことによりいずれも低下したが、締固め効果を完全に消失するには至らなかった。
- ④ 過剰間隙水圧に関して、周辺地盤ではほぼ全層で液状化したのに対して、改良地盤では液状化に至らず締固めによる改良効果が認められた。また、過剰間隙水圧比の値から、中詰材料に Hi ビーズを用いた場合は、従来の良質な砂を用いた場合と同等の改良効果を有していることが確認された。
- ⑤ 改良地盤の加速度応答は無改良のケースおよび周辺地盤の結果に対して、増加傾向にあった。
- ⑥ 改良したケースの無改良に対する変位の低減は1~2割程度と改良率に対する改良効果としては十分ではなく、水浸に伴うまさ土のコラプスによる影響が考えられた。
- ⑦ 初期の土圧係数が 1.0 を上回っている場合は、1.0 に低下する傾向を示した。このため、破壊を伴うような地震動を受けた SCP 改良地盤の静止土圧係数は地震後に低下することが指摘された。

謝辞：本研究は、三井住友建設(株)、(株)フジタおよび山口大学地盤地震工学研究所の共同研究として実施したものである。ご指導戴いた山口大学、兵動正幸教授ならびに三浦房紀教授、共同研究メンバーである(株)フジタ、岸下崇裕主任研究員の諸氏に厚く御礼申し上げます。また、実験に使用した石炭灰造粒物の提供および貴重な助言を頂いた(株)エネルギー・エコ・マテリア、齊藤直部長および池田陵志主任の両氏に記して、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 新川直利, 福島信吾, 林正美, 香川明人, 遠近潮見：静的締固め砂杭工法における現地生産再生砕石の使用について, 土木学会第 54 回年次学術講演会概要集, III-B, pp. 528-529, 1999.
- 2) 田中幸芳, 香川明人, 遠近潮見, 原春夫：建設発生土を用いた二重管方式における静的締固め地盤改良

- 工法, 土木学会第 54 回年次学術講演会概要集, III-B, pp. 534-535, 1999.
- 3) 山崎浩之, 高橋邦夫, 善功企, 田居繁, 中里高密：建設発生土を活用した静的締固め杭工法に関する現地実験, 港湾技研資料, No. 887, 1997.
- 4) 松尾稔, 木村稔, 西尾良治, 安藤裕：建設発生土を利用した軟弱地盤改良工法の開発に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No. 547/III-36, pp. 199-210, 1996.
- 5) 松尾稔, 木村稔, 西尾良治, 安藤裕：建設発生土類を活用した軟弱地盤改良工法の開発, 土木学会論文集, No. 567/IV-35, pp. 237-248, 1997.
- 6) 滝英治, 中島英雄, 鈴木英治, 肥後道憲, 仁田尾洋：石炭灰を中詰め材料に利用したコンパクションパイル工法の試験工事, 土木学会第 54 回年次学術講演会概要集, III-B, pp. 522-523, 1999.
- 7) 新谷登, 齊藤直, 樋野和俊, 車田佳範, 名越聖治：石炭灰を活用した海砂代替材の開発とその特性, 土木学会第 54 回年次学術講演会概要集, III-B, pp. 524-525, 1999.
- 8) 原田健二, 大林淳, 山本実, 安田進：締固めによる改良地盤の N 値と液状化強度の評価について, 第 11 回日本地震工学シンポジウム論文集, pp. 707-710, 2002.
- 9) 善功企, 山崎浩之, 加藤久晶, 藤井照久, 菅野雄一：締固め工法によって改良された地盤の静止土圧係数 K_0 に関する調査, 土木学会第 57 回年次学術講演会概要集, III, pp. 169-170, 2002.
- 10) 木村保, 奥村一郎, 三沢久詩, 川鍋修：コンパクションパイル打設地盤の K_0 値について, 第 21 回土質工学研究発表会講演集, pp. 1863-1866, 1986.
- 11) 木村保, 奥村一郎, 三沢久詩, 川鍋修：コンパクションパイル打設地盤の K_0 値について (その 2), 第 22 回土質工学研究発表会講演集, pp. 1795-1796, 1987.
- 12) 山本実, 野津光夫, 山田隆, 小飼喜弘：静的締固め砂杭工法の改良効果—佐原試験工事—, 第 32 回地盤工学研究発表会講演集, pp. 2317-2318, 1997.
- 13) 原田健二, 山本実, 大林淳：静的締固め砂杭打設地盤の K_0 増加に関する一考察, 土木学会第 53 回年次学術講演会概要集, III-B, pp. 544-545, 1998.
- 14) 佐藤毅, 山内亜沙子, 三宅達夫：締固め時のロッド貫入と砂杭直径にともなう地盤内 k 値に関する遠心模型実験, 土木学会第 56 回年次学術講演会概要集, III-A, pp. 252-253, 2001.
- 15) 沼田淳紀, 田雑満孝, 染谷昇, 國生剛治：杭打設に

- ともなう水平土圧増加に関する基礎的実験，第 37 回地盤工学研究発表会講演集，pp. 2053-2054, 2002.
- 16) 車田佳範，浜田純夫，斉藤直，樋野和俊，新谷登：石炭灰を活用した海砂代替材の品質特性～長期安定性について～，土木学会第 55 回年次学術講演会概要集，Ⅲ-B, pp. 466-467, 2000.
- 17) 内田裕二，樋野和俊，斉藤直，車田佳範：石炭灰造粒物の海上 SCP 打設試験における改良特性（その 3. 環境評価），土木学会第 56 回年次学術講演会概要集，Ⅲ-B, pp. 404-405, 2001.
- 18) 樋野和俊，斉藤直，兵動正幸，中田幸男，村田基治：石炭灰造粒物の SCP 打設試験における改良特性（その 1. 改良効果），土木学会第 55 回年次学術講演会概要集，Ⅲ-B, pp. 468-469, 2000.
- 19) 樋野和俊，斉藤直，兵動正幸，中田幸男，村田基治：石炭灰造粒物の海上 SCP 打設試験における改良特性（その 1. 改良効果），土木学会第 56 回年次学術講演会概要集，Ⅲ-B, pp. 400-401, 2001.
- 20) 村田基治，斉藤直，樋野和俊，新谷登，内田裕二：石炭灰造粒物の SCP 打設試験における改良特性（その 2. 施工性），土木学会第 55 回年次学術講演会概要集，Ⅲ-B, pp. 470-471, 2000.
- 21) 村田基治，斉藤直，樋野和俊，新谷登，内田裕二：石炭灰造粒物の海上 SCP 打設試験における改良特性（その 2. 施工性），土木学会第 56 回年次学術講演会概要集，Ⅲ-B, pp. 402-403, 2001.
- 22) 沼田淳紀，染谷昇，嶋本栄治，國生剛治：細粒な土の相対密度（試料の諸特性），第 36 回地盤工学研究発表会講演集，pp. 2191-2192, 2001.