

# 平成30年7月豪雨により発生した災害廃棄物分別土砂のキャラクタリゼーションとその有効利用

吉本 憲正<sup>1</sup>

<sup>1</sup>山口大学大学院創成科学研究科

平成30年7月豪雨により、広島県内で災害廃棄物混入土砂から廃棄物などを分別処理して発生した分別土は、約94万トンと、過去の豪雨災害では例を見ないほどの土砂量となった。分別土などを有効利用する際には、利用用途に応じた品質基準に依拠することから、分別土の土質特性および力学特性は調査される必要がある。本研究では、広島県内で発生した分別土の土質特性を室内土質試験を実施することで解明した。水面埋立材料としての有効利用を念頭に、中空ねじりせん断試験機を用いた液状化強度試験およびハイブリッド地震応答実験を実施し、分別土の液状化特性および地震応答特性を調査した。

キーワード：分別土、土質特性、液状化特性、ハイブリッド地震応答実験、地震応答特性

## 1. はじめに

近年、西日本を中心に全国的に広い範囲で集中豪雨による河川の氾濫や土砂災害が発生している。中国地方には花崗岩の地質範囲に属する地域が広く分布し、花崗岩が風化したまさ土は、これまで斜面崩壊などの危険性が高い土として扱われている。平成30年7月豪雨においては、広島県を含めた広範囲の中国地方で、まさ土を主体とする土砂が下流に大量に流れ、交通網などが寸断され、経済・物流に大きな被害をもたらした<sup>1)</sup>。

広島県の発表<sup>2)</sup>によると、平成30年7月豪雨災害により広島県内で災害廃棄物混入土砂から廃棄物などを分別処理して発生した分別土は、約94万トンと見積もられており、過去の豪雨災害では例を見ないほどの土砂量となっている。発生した分別土に関しては、広島港出島地区埋立第3工区に搬出され、水面埋立材料として有効利用されることが決定している。しかしながら、復旧が優先であることや土砂災害発生箇所が多いことなどから、分別土の土質特性および力学特性が十分に把握されていないまま利用されているのが現状である。災害などで発生した分別土などを有効利用する際には、利用用途に応じた品質基準に依拠することから、分別土の土質特性および力学特性は調査すべき事項といえる。

そこで本研究では、平成30年7月豪雨によって広島県内で発生した分別土の土質特

性を、室内土質試験を実施することで明らかにし、また水面埋立材料として有効利用されることから、中空ねじりせん断試験機を用いた液状化強度試験およびハイブリッド地震応答実験を実施し、分別土の液状化特性および地震応答特性を調査することにした。

## 2. 土質特性（キャラクタリゼーション）

本研究では、広島県内の被災現場(坂西・小屋浦)、二次仮置き場(北新地・ベイサイド)、有効利用先の仮置き場(採取時期が異なる、出島(8月)・出島(9月))から採取した計6種類の分別土の土質特性を調査した。また、一般的な土木資材である山口県で採取された宇部まさ土と岩国まさ土を比較材料として用いた。

分別土の品質を評価するにあたり、国土交通省の発生土利用基準に基づき<sup>3)</sup>、地盤材料の工学的分類もしくはコーン指数を調査し、建設発生土として利用可能か調査する。採取した分別土の中には、粒径が50mmの超える岩石や木片などの夾雑物がわずかではあるが含まれてい

表-1 粒度調整した試料の土質特性

Sample	Kitasinchi	Koyaura	Sakanishi	Dejima (Au)	Beisaido	Dejima (Se)	U.Masado	I.Masado	Miyako (B) <sup>3)</sup>
$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.617	2.614	2.611	2.610	2.612	2.621	2.632	2.633	2.636±0.049
$F_c$ (%)	6.2	4.5	5.8	7.4	5.2	9.2	10.9	16.2	17.7±12.5
$L_i$ (%)	1.41	1.10	1.05	2.01	1.57	2.42	2.41	3.50	6.6±3.5
$w_p$ (%)	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	/
$w_L$ (%)	NP	30.9	33.4	NP	NP	31.0	30.5	33.4	/
Soil classification	SG-F	SG	SG-F	SG-F	SG-F	SG-F	SG-F	SFG	SF/SG
$w_{opt}$ (%)	10.4	11.0	10.5	11.1	10.5	9.6	10.2	14.3	/
$\rho_{dmax}$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.707	1.680	1.705	1.755	1.746	1.838	1.895	1.762	/
$q_c$ (kN/m <sup>2</sup> )	4615	4683	5235	5119	4859	7014	7520	4362	/

る。そのため、土質試験ではそれら夾雑物を取り除き、各試験基準の許容最大粒径に従い、粒度調整を行った後に試験を実施した。

表-1は、20mm以下に粒度調整した試料の物理的性質を示している。分別土と比較として用いた2つのまさ土は、概ね似たような性質を示すことが各数値からわかる。地盤材料の工学的分類から、分別土は、礫質砂(SG)もしくは細粒分まじり礫質砂(SG-F)に分類された。このことから分別土は、花崗岩地帯から発生し、まさ土を主体とする土砂と推察される。強熱減量の値は、1.0~2.5%の間で、東日本大震災により発生した宮古市(B種)分別土<sup>3)</sup>の約 $6.6\pm 3.5\%$ の値に比べ低いことから、有機物がさほど含まれていないことが判明した。コーン指数試験の結果より、全試料で第2種建設発生土の基準である $800\text{kN/m}^2$ を超える $4000\text{kN/m}^2$ 以上と非常に高い値を示したことから、地盤材料の工学的分類と併せて分別土を評価すると、今回採取した分別土は、第1種建設発生土もしくは第2種建設発生土に分類され、建設材料として有効利用することが十分可能であると言える。

細粒分含有率に関しては、出島(9月)を除く分別土において、2つのまさ土と比べ低い値を示し、細粒分含有率が低い分別土は最大乾燥密度も低い値を示したことから、細粒分含有率が低いことで締固め特性に影響を及ぼすことが判明した。

### 3. 液状化特性

#### (1) 試験条件

本研究では、繰返し中空ねじりせん断試験装置を用いて液状化強度試験を実施した。供試体は、外径10cm、内径6cm、高さ10cmの中空円筒形である。液状化強度試験およびハイブリッド地震応答実験に用いた試料として、分別土(出島(9月)・ベイサイド)と、前記した土質特性より分別土の細粒分含有率が低いことに着目し、岩国まさ土の細粒分含有率を変化させた3試料、さらに粒径が均一で粒径幅が狭く、液状化しやすいとされている豊浦砂の計6種類を用いることにした。各試料を試験機の許容最大粒径の2mm以下に粒度調整した。図-1は、2mm以下に粒度調整した試料の粒度分布を記す。供試体作製方法については、2種類の分別土は、水中落下法により相対密度が50%と80%、90%と3ケースを作製し、岩国まさ土は、水中落下法により相対密度が50%となるように作製した。豊浦砂は、空中落下法によって相対密度が50%となるよう作製した。間隙圧係数B値が0.95以上になるまで脱気水を通水して供試体を飽和させ、有効拘束圧 $\sigma'_c=50\text{kPa}$ で等方圧密を行った。その後、非排水状態及び単純せん断状態で0.1Hzの正弦波形を用いて繰返し載荷試験を行った。液状化発生の判断基準は、両振幅せん断ひずみ $\gamma_{DA}=7.5\%$ に達したときとした。

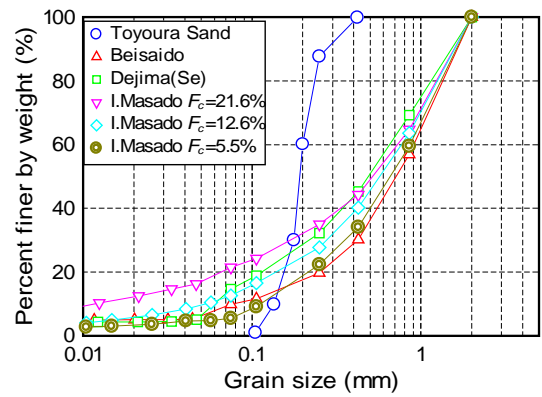
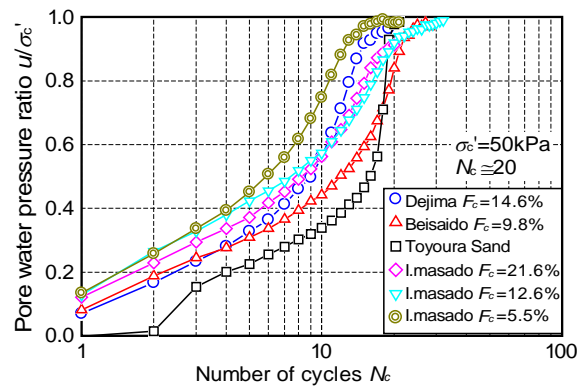
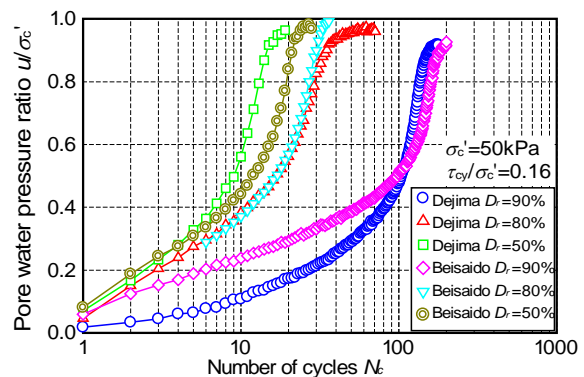


図-1 2mm以下試料の粒度分布



(a) 種々の試料における物理特性の違い



(b) 分別土試料における相対密度の違い

図-2 過剰間隙水圧比と繰返し回数の関係

#### (2) 液状化挙動

図-2(a)は、相対密度が50%で繰返し回数が20回程度の時の分別土を含む物理特性が異なる種々の試料の過剰間隙水圧比と繰返し回数の関係を、(b)は、繰返しせん断強度比が0.16付近の分別土の相対密度の違いにおける過剰間隙水圧比と繰返し回数の関係を示している。(a)より、全試料において、過剰間隙水圧比が0.6付近までは同じような挙動を示すが、粒径が均一な豊浦砂に関しては、その後急激に水圧が上昇するのに対し、分別土は緩やかに上昇する挙動を示したことから、分別土は粘り強さを発揮しながら液状化に至る挙動を示すことが確認された。また、細粒分含有率を変化させた岩国まさ土も同

様な液状化挙動を示した。(b)より、分別土は相対密度が90%の場合、剛性が高くなり、過剰間隙水圧比が0.85付近までしか達せず、液状化破壊まで至らないことが明らかになった。

### (3) 液状化強度特性

図-3(a)は、相対密度が50%時の細粒分含有率が異なる種々の試料の液状化強度曲線を示している。図より、相対密度が50%と比較的緩い条件下では、細粒分含有率の違いによる液状化強度曲線の位置に、大きな違いは現れず、全試料においてなだらかな曲線を描くことが確認された。これは細粒分含有率が0~20%の間の砂質土試料では、骨格構造に大きな違いがないことから、液状化強度に差異が生じないことが理由として考えられる。

図-3(b)は、種々の相対密度における粒径が異なる試料の液状化強度曲線を示している。図より、相対密度が50%で粒径が均一な豊浦砂の液状化強度曲線が最も低く位置し、出島(9月)の相対密度が50%時の液状化強度曲線と十勝砂の相対密度が75%時の液状化強度曲線、相馬珪砂6号の相対密度が50%時の液状化強度曲線が、ほとんど同じ箇所に位置し、液状化強度がほとんど変わらない。このことから相対密度が50%時には粒径の違いによる液状化強度の違いは大きく表れないと言える。出島(9月)の相対密度が90%時の液状化強度曲線と相対密度が70%の豊浦砂の液状化強度曲線、十勝砂の相対密度が85%時の液状化強度曲線は、それぞれ相対密度が50%に比べて曲線の位置が上昇し、相対密度の上昇に伴い液状化強度も上昇したことが示される。

### (4) 液状化強度特性と物理特性の関連性

液状化強度曲線の繰返し回数が20回における繰返し応力比を液状化強度比と定義し、分別土の液状化強度比と相対密度の関係を図-4に示す。比較材料として、粒径が均一で非塑性の砂質土試料の豊浦砂と十勝砂の結果も併せて示す。図より、粒径幅が広い分別土は、ある一定の相対密度の値を超えたあたりから急激に液状化強度比が上昇するのに対し、粒径が均一な豊浦砂や十勝砂は、相対密度が上昇すると液状化強度比も上昇する傾向を示し、相対密度が90%のときに関しては、分別土と約2倍の液状化強度比の差が生じている。これは、豊浦砂などの粒径が均一な試料では、供試体内の粒子がかみ合いやすいため、締固めエネルギーが伝わりやすく、相対密度の上昇で密になりやすいことが要因と考えられる。一方で、分別土のような粒径幅の広い試料は、粒子同士の密着面が小さく、締固めエネルギーが伝わりづらいため、相対密度がある一定の大きさに到達しないと締固めエネルギーが伝わらず、液状化強度が発揮しづらいことが考察される。

図-5は、細粒分含有率が異なる2種類の分別土と岩国まさ土の細粒分含有率を変化させた3ケース、粒径が均

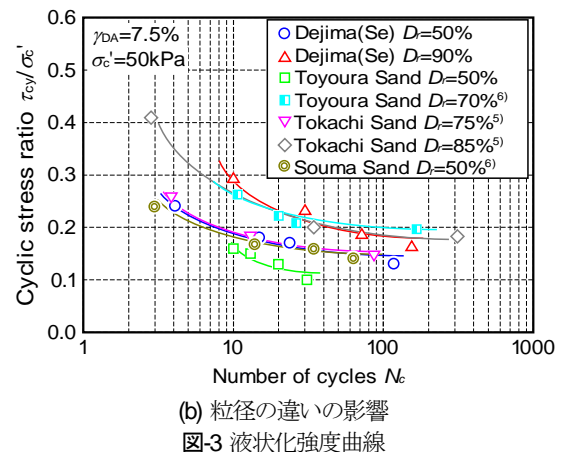
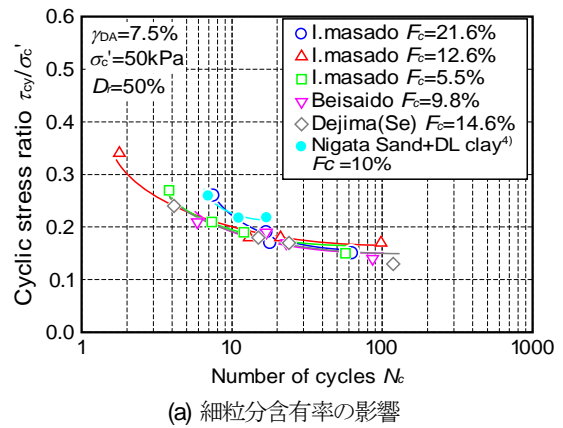


図-3 液状化強度曲線

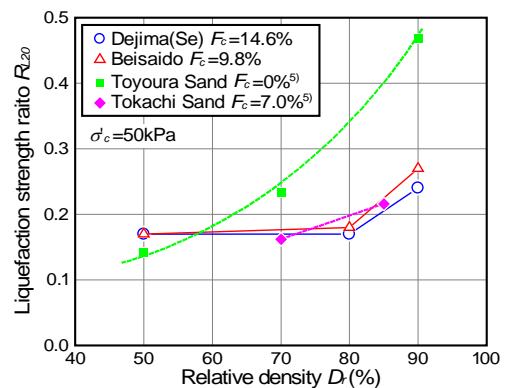


図-4 液状化強度比と相対密度の関係

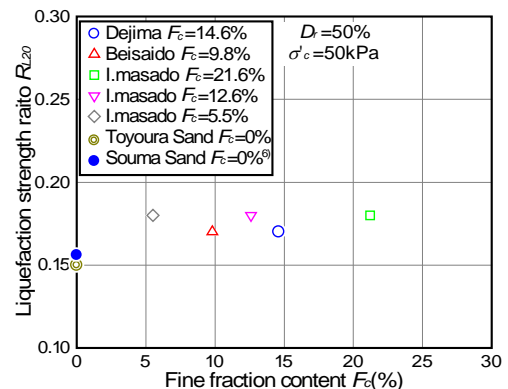


図-5 液状化強度比と細粒分含有率の関係

一で細粒分が含まれていない豊浦砂と相馬珪砂6号の相対密度が50%時の液状化強度比と細粒分含有率の関係を示している。図が示すように、相対密度が50%と比較的緩い条件下では、液状化強度比は0.16~0.18程度に集約され、液状化抵抗を大きく発揮しないことがわかる。細粒分含有率が0%で細粒分が全く含まれていない豊浦砂などに比べ、細粒分が含まれる分別土試料などの方が僅かだが液状化強度が高くなることが確認された。

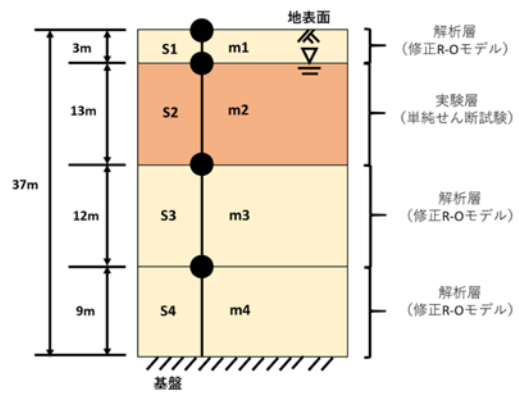


図-6 解析対象地盤のモデル化

#### 4. 地震応答特性

##### (1) ハイブリッド地震応答実験の概念<sup>4)</sup>

ハイブリッド地震応答実験は、解析対象地盤を集中質量法により図-6のように多質点系にモデル化し、基礎面から地震動を入力する。次に、運動方程式を時系列で解き、各時間ステップで応答変位を求める。得られた応答変位に相当するせん断ひずみを供試体に与え、得られた復元力を運動方程式にフィードバックして、次のステップの応答変位を算出する。すなわち、本手法はこれらの過程を地震動が継続する間繰り返す事で、時々刻々に変化する地盤の非線形な復元力を要素試験の供試体から直接求め、それを応答解析と結びつけて地震時の地盤挙動を再現するものである。本研究では、神戸ポートアイランドの水平地盤を対象に、2層目にあたる地下水以下の埋立層を実験層として単純せん断試験を行い、地震時の地盤内挙動を再現することにした。

##### (2) 実験条件

ハイブリッド地震応答実験は、表-2に示すように、2層目の実験層を分別土や物理特性の異なる種々の試料で置き換え、分別土においては異なる供試体密度で試験を実施した。実験層以外の修正R-Oモデルの解析層においては、神戸ポートアイランド地盤データ<sup>5)</sup>を参考に、修正R-Oモデルに必要なパラメータを設定した。入力波は、加速度の最大値を570Galに調整した兵庫県南部地震の際に観測されたSMAC波形を用いた。

##### (3) 実験結果

図-7(a)は、ベイサイド試料の相対密度が50%時の加速度時刻歴を、(b)は、相対密度が90%時の加速度時刻歴を示している。いずれの図からも、質点4から質点3にかけて応答加速度が大きく減衰していることが確認でき、質点2の応答加速度においては、地震波が減衰また長周期化し、応答加速度がさらに大きく減衰していることが確認できる。これらは、3層目の粘土層による影響で地震力が吸収され、2層目の実験層の地盤が液状化もしくは過剰間隙水圧の上昇で、地盤内の剛性が低下したことから、上層への加速度の伝達が小さなものになっていると考えられる。

表-2 実験ケース

Layer	Test Case							
S1層	不飽和解析層 (不飽和砂層)							
S2層	Beisaido $D_r=50\%$	Beisaido $D_r=90\%$	Dejima (Se) $D_r=50\%$	Dejima (Se) $D_r=90\%$	Toyoura Sand $D_r=50\%$	I.Masado $F_c=21.6\%$ $D_r=50\%$	I.Masado $F_c=12.6\%$ $D_r=50\%$	I.Masado $F_c=5.5\%$ $D_r=50\%$
S3層	飽和解析層 (沖積粘土層)							
S4層	飽和解析層 (沖積砂礫層)							
	基礎							

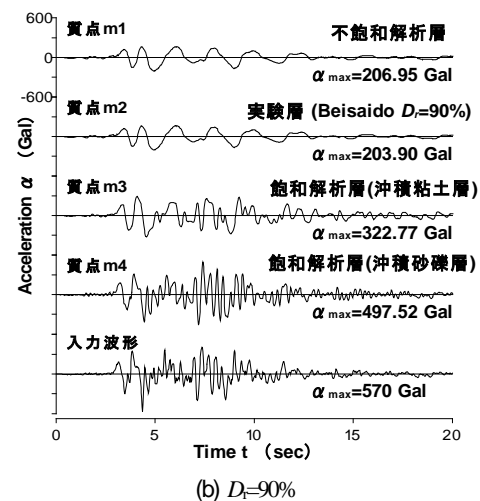
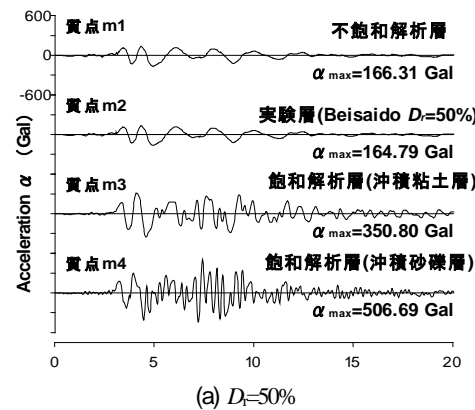


図-7 ベイサイドの加速度時刻歴

図-8は、全実験ケースの最大応答加速度と最大応答水平変位の深度分布を示す。図-8(a)の最大応答加速度では、分別土の相対密度が90%で剛性が高い試料の方が、相対密度が50%の剛性が低い試料よりも、3層目の粘土層において減衰する傾向を示し、2層目の実験層における減衰は、逆に相対密度が50%の剛性が低い試料の方が顕著

に現れた。また、相対密度が50%では、分別土は粒径が均一な豊浦砂に比べ、2層目における加速度の減衰量が小さいことから、豊浦砂よりも剛性が高いことが示された。図-8(b)の最大応答水平変位は、深度が15m付近までは応答変位の違いが見られないが、2層目あたりの深度で急激に応答変位が増加していることがわかる。これは2層目が液状化もしくは過剰間隙水の影響で剛性が低下したことによって、変位が生じたと言える。さらに相対密度が50%の剛性が低い試料に関しては最大応答変位が、25cm以上と大きい変位が発生している。つまり地表面の変形の程度は、実験層の地盤内密度に依存することが判明した。また物理特性の違いによる応答変位は大きな違いが表れず、2層目から顕著に変位が生じる傾向を示す。

## 5. まとめ

本研究では、平成30年7月豪雨災害で広島県内で採取した分別土の土質特性（キャラクターゼーション）、液状化、地震応答特性を調査した。

土質特性（キャラクターゼーション）に関して、分別土は、宇部まさ土や岩国まさ土と類似した土質区分に分類され、物理特性に大きな違いは見られない。一部の分別土において、細粒分含有率がまさ土の細粒分含有率と比較して低い値を示し、そのことが締固め特性に影響を及ぼした。

液状化特性に関して、分別土は相対密度が50%の場合、粒径幅が広い砂質土試料の液状化挙動と液状化強度に大きな差異は見られないが、粒径が均一な豊浦砂に比べ、過剰間隙水圧は緩やかに上昇する挙動を示した。さらに分別土は豊浦砂のような粒径が均一な試料に比べ、相対密度の上昇に伴う液状化強度比が上昇しづらい傾向を示し、分別土は相対密度が90%まで達したところで液状化強度比が急激に上昇する傾向を示した。

地震応答特性について、実験層を分別土の相対密度が50%の場合では、地表面の最大応答変位は、豊浦砂に比べ低い値を示すことがわかった。また、分別土の相対密度が90%時の場合には、剛性が高く、液状化破壊に至ら

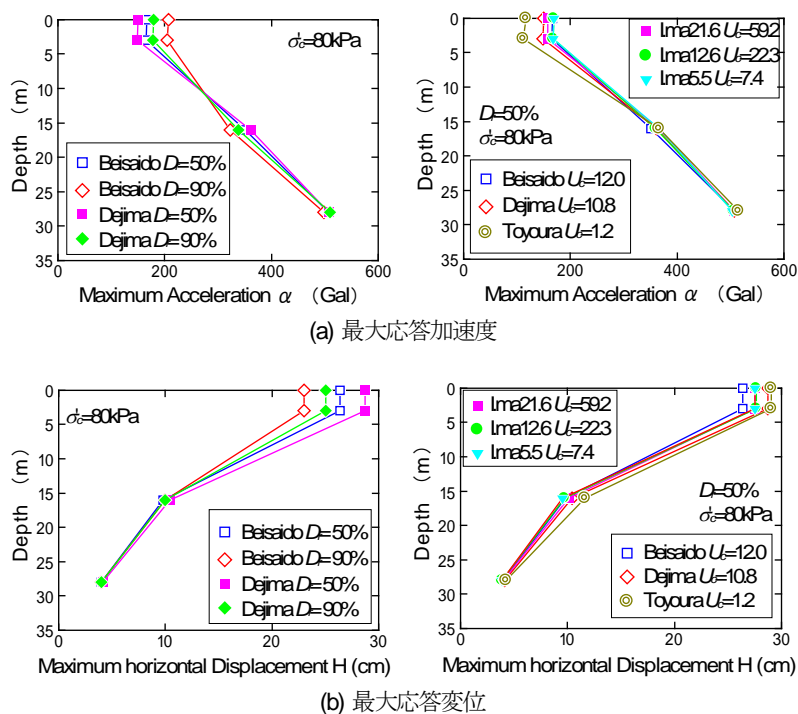


図-8 最大応答深度分布

ないことから、最大応答変位も低い値を示した。

以上のことから、適切に密度を増加させることで、埋立地盤材料として有効利用可能と考えられる。

**謝辞:** 本研究の一部は、中国建設弘済会の技術開発支援事業の助成および西日本豪雨復興支援（A-STEP機能検証フェーズ）の助成を受け実施いたしました。なお、災害現場の情報提供や試料採取については、国土交通省中国地方整備局、広島県港湾局の関係各位に多大な便宜を図っていただきました。研究の実施にあたり、山口大学大学院修了生の遠藤宏朗氏に多大な協力をいただいた。ここに記して、深く謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 広島県: 平成30年7月豪雨災害に係る広島県災害廃棄物処理実行計画, 26p., 2018.
- 2) 国土交通省: 発生土利用基準について, 8p., 2006.
- 3) 高井敦史ら: 東日本大震災で発生した岩手県の災害廃棄物分別土砂の品質とその変化, 土木学会論文集 C(地圏工学), Vol.72, No.3, pp.252-264, 2016.
- 4) 日下部伸ら: オンライン地震応答実験による2層系砂質地盤の液状化挙動, 土質工学会論文報告集, Vol.30, No.3, pp.174-184, 1990.
- 5) 神戸市開発局: 兵庫県南部地震による埋立地地盤変状調査(ポートアイランド, 六甲アイランド)報告書, 119p., 1995.