基礎底面の絶縁と複合改良地盤の埋込み効果による
地震応答低減に関する基礎的研究FUNDAMENTAL STUDY ON EARTHQUAKE RESPONSE REDUCTION
OF BASE ISOLATED SPREAD FOUNDATION WITH BACKFILLED
BY IMPROVED COMPOUND GEO-MATERIAL

宮本裕司*, 島村 淳**, 藤井 達***, 星澤 府美子****, 柏 尚稔*****

Yuji MIYAMOTO, Atsushi SHIMAMURA, Satoru FUJII,
Fumiko HOSHIZAWA and Hisatoshi KASHIWA

This paper addresses the developing of spread foundation surrounded with improved soil which reduces the response of the superstructure. The mechanical properties of the improved compound soil are investigated by laboratory tests. Then earthquake response behaviors of model structures are discussed with various contact conditions at the foundation bottom and different improved backfill soil around foundation by shaking table tests. Furthermore analysis results by 3D-nonlinear FEM are also discussed to clarify the effect of the contact conditions at the foundation bottom and the improved compound soil to seismic response of building.

Keywords: Nonlinear Soil-structure Interaction, Seismic Isolated Foundation, Improved Compound
Geo-material, Shaking Table Test, 3D-FEM

非線形相互作用, 絶震基礎, 複合改良地盤, 振動台実験, 3D-FEM

1. はじめに

建物の基礎底面と地盤間の非線形相互作用や基礎の埋込み効果が、上部構造の地震被害低減に大きな影響を与えることが指摘されている^{1)~3)}。本研究では、地震応答を低減する構造として、建物基礎と地盤間で生じる相互作用すなわち地震力の授受において、基礎底面と支持地盤間の摩擦を小さくし絶縁に近い状態にすることで、基礎入力動の低減と非（避）共振化を目指す。さらに加えて基礎側面に靱性のある複合改良地盤を用いることで、塑性化による震動エネルギーの吸収と基礎変位を抑制する基礎絶震構造の開発を目的とする。

埋込みによる基礎側面地盤は建物の挙動を拘束し、震動エネルギーを吸収、逸散させることにより建物の応答を低減させる。しかし、埋込み地盤の材料物性や非線形特性の不確かさなどにより、その効果を適切に評価し影響度を確かなものにするには難しい。ここで用いる基礎側面地盤は、近年、耐震対策に多く採用されているセメント系改良地盤では、強度の増加にともない脆性的な特性を示し、耐震性能が低下することが指摘されているため⁴⁾、これらを改良するためゴムチップと繊維材を混合した複合改良地盤である。ゴムチップの添加による剛性の可変性や変形性能の向上に加え、繊維材の添加により靱性の向上を目指したものである^{5),6)}。また、基礎底面

の絶縁方法としては、支持地盤と基礎底面の間に大変形時に剛性が低下し、減衰が大きくなる非線形特性をもつ地盤材料^{7),8)}を用いることや、摩擦をできるだけ小さくした合金材を敷きすべり現象を生じさせることや、鉛直支持力を保持して水平方向の地震力を極力伝達しないようにするすべり支承の設置、さらに将来的な技術として強磁場での磁気力等による基礎浮上を考えている。このように、基礎の側面地盤に大変形時にも靱性があり力学特性の明らかな改良地盤と、基礎底面に絶縁機構を施し地震入力と建物応答を低減できれば地震被害の軽減に有効な基礎構造となる。

本報では、このような基礎絶震構造を開発する基礎研究として、まず直接基礎の埋込みに用いる複合改良地盤の室内試験（一軸圧縮試験、繰返し単純せん断試験）により本材料の物性を把握した。次に、本複合地盤材料を基礎側面の埋土地盤へ適用し、基礎底面と支持地盤の接触条件を変えた建物モデルの振動台加振実験を行った。基礎底面の接触条件として、支持地盤に接着させた場合、接着させない場合、ネオジウム磁石により完全に絶縁した場合を考えた。また、3次元非線形有限要素法を用いた解析検討を行うことにより、基礎底面の接触条件と基礎側面に複合改良地盤を用いた基礎構造の地震応答低減効果について検討を行った^{9),10)}。

* 大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻
建築工学部門 教授・工博

** ケミカルグラウト(株)技術本部技術開発部
課長代理・博士(工学)

*** (株)大林組技術研究所
(元 大阪大学大学院工学研究科 大学院生)

**** 大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻
建築工学部門 大学院生

***** 大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻
建築工学部門 助教・博士(工学)

Prof., Dept. of Architectural Eng., Div. of Global Architecture, Graduate School of Eng.,
Osaka Univ., Dr. Eng.
Senior Eng., Eng. Development Dept., Chemical Grouting Co., Dr. Eng.

Technical Research Institute, Obayashi Corporation, M. Eng.

Graduate Student, Dept. of Architectural Eng., Div. of Global Architecture, Graduate School
of Eng., Osaka Univ.

Assist. Prof., Dept. of Architectural Eng., Div. of Global Architecture, Graduate School of
Eng., Osaka Univ., Dr. Eng.

2. 複合改良地盤の室内試験

2.1. 複合改良地盤の概要

本研究では、建設現場発生土を利用した固化処理土（セメント系改良地盤、以下「PL」）、固化処理土に廃タイヤリサイクル品である廃タイヤゴムチップと繊維材（ナイロン系短繊維）を混合した複合改良地盤（以下、「TR」）、固化処理土に高減衰ゴム（ブチル系高減衰ゴム）を破碎した高減衰ゴムチップと繊維材を混合した複合改良地盤（以下、「HDR」）について室内試験（一軸圧縮試験、繰返し単純せん断試験）を行い、地盤特性の確認を行った。

複合改良地盤（TR、HDR）とセメント系改良地盤（PL）に使用する各材料の物性を表 1 に示す。泥土は建設発生土で、これに加水および砂分調整を行い、一般的な固化処理土で用いられている性状と一致させた。ゴムチップは、廃タイヤを破碎した粒径 1～5mm のリサイクル品とブチル系高減衰ゴムを粒径 5mm 以下に破碎したものを使用した。繊維材には、長さ 30mm 程のナイロン系繊維を使用した。また、固化材は、高炉セメント B 種を用いた。

室内試験は、表 2 に示す 3 種類の配合について行った。セメント添加量はベースとなる固化処理土（セメント+泥土）1m³あたり 75kg に一定として、ゴムチップの添加量を 0、300kg、繊維材添加量を練り上がり全体量の 0、5%と変化させた材料特性の把握を行った。

2.2. 試験方法

(1) 一軸圧縮試験

一軸圧縮試験は、表 2 に示した配合 No.1～3 について、材齢 28 日の水中養生を行った直径 50mm×高さ 100mm の円柱供試体を用い、ひずみ速度 1%/min にて実施した。また、結果の整理については、最大圧縮応力点（ q_u ）を破壊点、その時のひずみを破壊ひずみ（ ϵ_d ）と定義した。ペディングエラーにより応力-ひずみ曲線の初期部に変曲点が生じる場合については、変曲点以降の直線部を延長し、ひずみ軸との交点を破壊ひずみ算出の修正原点とした¹¹⁾。

(2) 繰返し単純せん断試験

広範囲のひずみ域（0.001% $\leq \gamma \leq 10\%$ 程度）での変形特性を確認する繰返し単純せん断試験は、配合 No.1～3 について、材齢 28 日の水中養生を行った直径 100mm×高さ 30mm の円柱供試体をリングで拘束して実施した¹²⁾。供試体は一定の上載圧（ $\sigma_v=0.1\text{N/mm}^2$ ）で圧密終了後、各載荷段階の試験中は上載圧一定、非排水の条件の下で行った。入力波は正弦波として 11 波入力し、応力制御、一部ひずみ制御（No.1、 $\gamma > 1\%$ ）にてせん断ひずみ $\gamma=10\%$ 程度まで行った。入力波の振動数は、0.1、1.0、3.0Hz の 3 ケースを選択した。なお、結果の整理に際して、 $\gamma=0.001\%$ 付近のせん断剛性（G）の値を初期せん断剛性（ G_0 ）と定義した。

2.3. 試験結果

(1) 一軸圧縮試験

図 1 に応力（ σ ）とひずみ（ ϵ ）の関係を示す。通常のセメント系改良地盤である No.1（PL）は、脆性の著しい応力-ひずみ関係が認められ、破壊ひずみが 1%程度で、それを超えると写真 1(a)のように脆性的に破壊した。しかし、廃タイヤゴムチップと繊維を混合した複合改良地盤（No.2、TR）、高減衰ゴムチップと繊維を混合した複合改良地盤（No.3、HDR）は、破壊ひずみが 7.5%程度と増加し、ピーク強度を示した後のひずみ域における強度低下が小さく、15%以上変形させても写真 1(b)、(c)のように形状を保持していた。

表 1 使用材料

材 料	性 状
セメント	高炉セメント B 種* 密度：3.04g/cm ³
泥土	現場発生土 + 加水 密度：1.50 $\pm$ 0.02g/cm ³ 砂分率**：40 $\pm$ 2.5% スランプフロー値***：400 $\pm$ 50mm
ゴムチップ	a) 廃タイヤゴムチップ 廃タイヤリサイクル品 密度：1.1g/cm ³ 粒径：1～5mm
	b) 高減衰ゴムチップ ブチル系高減衰ゴム 密度：1.1g/cm ³ 粒径：5mm 以下
繊維材	ナイロン系短繊維 長さ：30mm 程

*JIS R 5211 **簡易砂分計による砂分率 ***JHS 313-1992

表 2 改良地盤の配合

		No.1 (PL)	No.2 (TR)	No.3 (HDR)
セメント	[kg/m ³]	75	75	75
廃タイヤ	[kg/m ³]	0	300	0
ゴムチップ	[%]	0	27	0
高減衰	[kg/m ³]	0	0	300
ゴムチップ	[%]	0	0	27
繊維材	[%]	0	5	5
密度	[g/cm ³]	1.54	1.38	1.38

(2) 繰返し単純せん断試験

図 2 に各配合のせん断剛性（G）と減衰定数（h）のひずみ依存性を示す。せん断剛性は、各配合ともひずみの増加にともない、せん断剛性が減少する。通常のセメント系改良地盤である No.1（PL）は、初期せん断剛性が 75N/mm²であるのに対して、廃タイヤゴムチップと繊維を混合した複合改良地盤（No.2、TR）、高減衰ゴムチップと繊維を混合した複合改良地盤（No.3、HDR）はそれらの混合により初期せん断剛性が 30N/mm²程度と小さくなる。なお、本実験範囲（振動数 0.1～3.0Hz）では、すべての配合において、加振振動数のせん断剛性への影響はほとんどみられなかった。

減衰定数（h）は、各配合ともひずみの増加にともない増加する。No.2（TR）と No.3（HDR）の複合改良地盤では、減衰定数が超大ひずみ（ $\gamma=10\%$ 付近）で約 15%であった。なお、No.1 の $\gamma > 1\%$ で減衰定数の急激な増加がみられるが、これは、供試体がせん断破壊を起こしたためである。また、本実験範囲（振動数 0.1～3.0Hz）では、すべての配合において、加振振動数が減衰定数に与える影響はほとんどみられなかったが、より高い振動数域での減衰特性の把握は今後の課題である。

(a) No.1 (PL)

(b) No.2 (TR)

(c) No.3 (HDR)

図1 応力-ひずみ曲線

(a) No.1 (PL, $\varepsilon < 2\%$)

(b) No.2 (TR, $\varepsilon > 15\%$)

(c) No.3 (HDR, $\varepsilon > 15\%$)

写真1 一軸圧縮試験後の供試体

(a) No.1 (PL)

(b) No.2 (TR)

(c) No.3 (HDR)

図2 せん断剛性 (G), 減衰定数 (h) のひずみ依存性

3. 振動台実験

本実験では、直接基礎建物の基礎側面埋土地盤の違いと、基礎底面と支持地盤 ($V_s=200\text{m/s}$ 程度) との接触条件の違いによる建物の地震応答の違いを 1G 場における振動台模型実験にて検討した。なお、本実験では想定する実物スケールに対する模型の相似比^{13),14)}は表3の通りとした。また、加振実験では時間軸を 1/10 としたが、後述の実験結果は時間軸を 10 倍して示している。

表3 相似比

諸元	次元	相似比 (模型/実物)
長さ	L	1/100
質量	M	1/1,000,000
時間	T	1/10
加速度	LT^{-2}	1/1
密度	ML^{-3}	1/1

3.1. 振動台実験の概要

図3に実験モデルの平面図と断面図を示す。長さ 600mm×幅 400mm×高さ 250mm の鋼製土槽内に、セメント系改良地盤 (PL) と同様の配合で支持地盤 ($V_s=200\text{m/s}$ 程度) を作製した。埋土地盤は深さ 30mm、厚さ 30mm として基礎側面に設置した。加速度計は、建物模型頂部、基礎上部、支持地盤上部 (地表面)、土槽底板に設置した。建物模型は剛体モデルと板ばねモデルの2種類で総重量 21.5N であり、建物上部と下部は真鍮製 (密度 8.4g/cm³)、基礎部はアルミニウム製 (密度 2.7g/cm³) である。柱部は剛体モデルは鉄製 (密度 7.9g/cm³)、板ばねモデルは真鍮製で基礎固定時の固有振動数は 67.2Hz である。図4に剛体モデルの平面図と側面図を示す。

3.2. 基礎側面埋土地盤の種類と基礎底面の接触条件

基礎側面の埋土地盤の違いによる建物応答を検討するため、埋土地盤は、砂地盤 (S) とセメント系改良地盤 (PL) および、2種類の複合改良地盤 (TR, HDR) を用いた。さらに、比較対象として埋土地盤がない場合 (埋込みなし) の計5種類とした。なお、砂地

(a) 平面図

(b) a-a' 断面図

図3 実験モデル

(a) 平面図

(b) 側面図

図4 建物模型

(a) 実験モデル

(b) 基礎底面

(c) 支持地盤

写真2 実験モデルとネオジウム磁石設置状況

盤は豊浦砂を用いて締め固めた。

基礎底面と支持地盤の接触条件は、まず、密着状態を再現するため、基礎底面をエポキシ樹脂にて接着した場合（「Non-slip」）、加振が大きくなることによる滑り現象を再現するため、基礎底面を接着しないで支持地盤上にそのまま置いた場合（「Slip」）、さらに、基礎底面と地盤を絶縁し、摩擦が無い状態を再現するため、ネオジウム磁石で基礎底面を 10mm 浮かした場合（「Isolation」(写真 2)）について、これらの Non-slip, Slip, Isolation の計 3 種類の接触条件で実験を行った。

3.3. 入力地震動

実験で用いた入力地震動は、図 5 に示す最大加速度が 386gal の告示波 JMA 神戸（1995NS）位相である。入力レベルは、加速度の振幅を 1/5 倍（「小加振」）、1 倍（「大加振」）、1.5 倍、2 倍と変化させ、時間軸を 1/10 に縮尺し、水平方向加振で実験を行った。

図5 加速度時刻歴波形（告示波 JMA 神戸位相）

3.4. 実験結果

(1) 最大加速度による比較

剛体モデルの建物上部（ABL）と地表面（AGL）の加速度時刻歴波形の最大値を比較した。ここでは、基礎底面の接触条件が、接着ありの場合（Non-slip）、接着なしの場合（Slip）を図 6 に示す。

Non-slip の場合は、埋込みがない場合と埋込みが砂地盤（S）である場合に最大加速度が増幅していることから、低拘束圧下となる砂地盤では埋込み効果が発揮できていないことがわかる。これに対して、側面にセメント系地盤（PL）や複合改良地盤（TR, HDR）を用いた場合には増幅が小さい結果となっている。

Slip の場合は、埋込みがない場合の小加振と大加振入力の際は、地表面に対して建物上部の加速度最大値は増幅されていないが、それよりも入力が大きき場合には増幅されている。これは基礎の過度のすべりや浮き上がりが生じ応答最大値が大きくなったものと考えられる。複合改良地盤（TR, HDR）を側面地盤とした場合には増幅が小さく、Slip の場合では高減衰ゴムを用いた HDR で応答低減が大きい。

(a) Non-slip

(b) Slip

図6 加速度最大値の比較

図7 基礎底面と支持地盤の接触条件によるフーリエスペクトル比の比較 (ABL/AGL) (剛体モデル)

図8 基礎側面埋土地盤の違いによるフーリエスペクトル比の比較 (ABL/AGL) (剛体モデル)

(2) 基礎底面の接触条件と側面地盤の違いによる比較

地震動入力時 (小加振, 大加振) に計測された, 地表面に対する剛体モデルの建物上部の加速度フーリエスペクトル比 (ABL/AGL) を比較した。接触条件としては, 接着あり (Non-slip), 接着なし (Slip), 絶縁 (Isolation) の3種類である。ここでは, 基礎側面地盤がセメント系改良地盤 (PL), 複合改良地盤 (TR, HDR) のケースを図7に示す。図7(a)と(a')には Non-slip で埋込みがない場合

の結果も比較して示す。また, 側面地盤がセメント系改良地盤 (PL) と2種類の複合改良地盤 (TR, HDR) の3ケースで, 基礎底面と支持地盤の接触条件が, 接着あり (Non-slip), 接着なし (Slip), 絶縁 (Isolation) の場合を図8に示す。なお, 図では最大振動数を20Hzとしているが, これは振動台の加振性能限界が20Hz (実際の振動数で200Hz) であるためである。

まず, 埋込みがない場合の結果に比べ, 側面の改良地盤の効果は

応答振幅を低減すること、地盤との連成系のピーク振動数が **Non-slip** の条件では高振動数側となるが、基礎底面の接触条件により低振動数側に移行することが確認できる。

埋土地盤がある全てのケースにおいて、連成系のピーク振動数は **Non-slip**, **Slip**, **Isolation** の順で小さくなる。また、最大振幅は、**Slip** に比べ **Isolation** で小さくなる。**Non-slip** の場合は、**PL** の振幅が小さくなる。**Slip** と **Isolation** の最大振幅は入力レベルが大きくなると小さくなり、その傾向は **PL**, **TR**, **HDR** の順で大きい。また、側面改良地盤の剛性の違いにより、ピーク振動数が **PL**, **TR**, **HDR** の順に低振動数側に移行している。このように、大地震時に建物応答を低減する方法として、基礎底面と支持地盤間の摩擦抵抗を小さくして入力動を低減するとともに、靱性のある側面改良地盤との非線形相互作用の効果により、側面地盤でのエネルギー吸収を大きくすることが有効であることがわかる。

(3) 建物モデルの違いによる比較

次に、建物モデルの違いとして図 9 に板ばねモデルの大加振入力時の結果を示す。側面地盤が **PL** に比べ **HDR** の方が最大振幅が小

さくなることが確認できるが、板ばねモデルは剛体モデルに比べて側面地盤による効果が小さく、**Non-slip** と **Slip** では板ばねモデルの基礎固定時の固有振動数付近で卓越振動数となる。なお、全ての図の 3Hz 付近に振幅の変化が見られるが、これは振動台のピッチング振動の影響で回転入力が生じたためである。

(4) 建物のロッキング振動による影響

ここでは、大加振時の建物のロッキング振動の影響を検討する。まず、図 3(b) に示した基礎部両端の二つの鉛直加速度の差を基礎幅 0.08m で除して求めた建物の角加速度 $\ddot{\theta}$ (rad/s²) に建物高さ H (m) を乗じるにより、ロッキング振動成分による建物上部の水平加速度 $\ddot{\theta}H$ (m/s²) を求めた。そして、地表面の加速度に対するフーリエスペクトル比 ($\ddot{\theta}H/AGL$) を、基礎底面と支持地盤の接触条件の違い、基礎側面埋土地盤の違いにより比較検討した。

図 10 に基礎側面埋土地盤が **HDR** のケースでの大加振時のフーリエスペクトル比 ($\ddot{\theta}H/AGL$) を、接触条件ごとに示す。また、図 7(C') で示した同ケースの建物上部で計測された水平加速度の地表面に対するフーリエスペクトル比 (ABL/AGL) も併せて示す。

(a) PL, 大加振

(c) HDR, 大加振

図 9 基礎底面と支持地盤の接触条件によるフーリエスペクトル比の比較 (ABL/AGL) (板ばねモデル)

(a) Non-slip

(b) Slip

(c) Isolation

図 10 フーリエスペクトル比 ($\ddot{\theta}H/AGL$), HDR, 大加振

(a) PL

(b) TR

(c) HDR

図 11 フーリエスペクトル比 ($\ddot{\theta}H/AGL$), Isolation, 大加振

建物上部で計測された水平加速度応答に対応して、 $\ddot{\theta}H/AGL$ のピーク振動数も Non-slip, Slip, Isolation の順に小さくなる。また、建物応答に占めるロッキング成分の割合は、Non-slip では加振振動数範囲ではほぼ一定であるが、Slip と Isolation の場合はピーク振動数付近で最大となり、それ以降の高振動数域でもその割合は大きくなる。これは、建物の水平応答が建物上部と基礎部で逆位相となる振動モードを呈しているためである。

図 11 に基礎底面の接触条件が Isolation の場合での大加振時のフーリエスペクトル比 ($\ddot{\theta}H/AGL$) を、側面埋土地盤の各種類について示す。また、同ケースの建物上部で計測された水平加速度の地表面に対するフーリエスペクトル比 (ABL/AGL) も併せて示す。建物上部で計測された水平応答のピーク振動数付近におけるロッキング成分の割合は PL, TR, HDR とも大きくなる。これより、基礎底面を絶縁した場合には水平応答が著しく低減すること、その水平応答は建物のロッキングに起因する応答成分であることがわかる。なお、基礎底面を絶縁した場合 (Isolation) で埋土地盤が HDR のケースのピーク付近の応答性状が複雑に変化しているのは、前述した振動台のピッチング振動と重なっているためである。

4. 3次元有限要素法による地震応答解析

振動台実験のシミュレーション解析を3D非線形FEM¹⁵⁾を用いて行い、建物の応答性状についてさらに検討する。ここでは、3章で行った実験のうち、剛体モデルにおいて、基礎側面地盤が複合改良地盤 (HDR) で、基礎底面と支持地盤の接触条件が接着あり (Non-slip)、絶縁 (Isolation) の大加振時についてシミュレーション解析を行った。

4.1. 解析モデル

図 12 に FEM 解析モデルの平面図と断面図を示す。断面図中の▽印で示す4箇所の節点をそれぞれ地盤深部・地表面・基礎部・建物上部として水平方向の加速度を求めた。また▼印で示す2箇所で建物基礎部の鉛直方向の加速度を求めた。基礎側面地盤と基礎部はすべりと剥離を考慮した接触条件を用い、摩擦係数は小さいとして0.05とした。基礎底面が接着ありの場合では、基礎底面と支持地盤を節点共有により密着させた。図 13 に基礎底面が絶縁の場合での基礎周辺地盤の詳細図を示す。実験では基礎底面と支持地盤の間に磁石を設置して10mm絶縁させた。解析では磁石による基礎と支持地盤との間の回転反力を回転ばねにモデル化して、絶縁状態を模擬した。回転ばねの値は、使用した磁石の物性よりクーロンの式で磁荷を求めて、 $K=1890N \cdot m/rad$ とした。

本解析で使用した各諸元を表4に示す。鋼製土槽と建物模型 (基礎下部、基礎上部、柱、建物上部) は全て剛体でモデル化し、実験時と同じ重さになるように設定した。また、支持地盤は弾性体で、埋土地盤は Mohr-Coulomb モデルで弾塑性体としてモデル化した。支持地盤の物性値については、材料試験の結果をもとにして、基礎側面埋込みなし・基礎底面接着ありの実験のシミュレーション解析を行い、ヤング係数を調整した。図 14 に支持地盤のヤング係数を $E=113N/mm^2$ とした際の解析と実験によるフーリエスペクトル比を比較して示すが、両結果は良く対応している。また、基礎側面埋土地盤の物性値は、HDR 複合改良地盤の材料試験の結果を用いた。地盤の減衰は質量比例型で1次固有振動数に対して5%とした。

(a) 平面図

(b) 断面図

図 12 解析モデル (1/2 モデル)

図 13 絶縁時の基礎周辺地盤の詳細図 (1/2 モデル)

表 4 解析の諸元

	密度 (g/cm ³)	ヤング係数 (N/mm ²)	ポアソン 比	内部摩擦角 (°)	粘着力 (N/mm ²)	材料モデル
建物モデル	8.4	1.26×10^5	0.3			剛体
柱	0.11	2.05×10^5	0.3			剛体
基礎上部	4.81	2.05×10^5	0.3			剛体
基礎下部	2.4	6.93×10^4	0.3			剛体
高減衰(HDR)	1.38	63	0.45	22	0.1	弾塑性体
支持地盤	1.55	113	0.45			弾性体
鋼製土槽	7.87	205×10^5	0.3			剛体

図 14 地表面に対する建物上部のフーリエスペクトル比 (埋込みなし・接着あり・大加振)

図 15 地表面に対する建物上部の水平方向のフーリエスペクトル比 (HDR・大加振)

図 16 地表面に対する建物上部の回転成分のフーリエスペクトル比 (HDR・大加振)

図 17 最大主ひずみ分布 (HDR・大加振)

4.2. 解析結果

図 15 に、地表面に対する建物上部の水平方向のフーリエスペクトル比を(a)Non-slip, (b)Isolation の場合について実験と解析を比較して示す。両結果の実験と解析は良く対応しており、基礎底面の接触条件の違いによる応答特性を捉えている。次に建物上部でのロッキング成分の比較を図 16 に示す。両接触条件とも実験と解析は良く対応しており、3D 非線形 FEM の解析により基礎側面が HDR 地盤で、基礎底面の接触条件が接着ありと絶縁の場合の建物の応答性状をシミュレーションできた。

ここで、実験時の建物上部での水平加速度応答が最大値に近い時刻における(a)Non-slip, (b)Isolation の場合の最大主ひずみ分布を、最大値と併せて図 17 に示す。接着ありに比べて絶縁では振動方向の前後面の埋土地盤でのひずみが大きくなっている。さらに、基礎底面を絶縁した場合に、側面地盤からの入力により生じた建物のロッキング振動によって、基礎前面の埋土地盤上部と後面での埋土地盤下部の両面で震動エネルギーを吸収し応答を低減していることがわかる。

5. まとめ

本研究では、基礎側面地盤に用いる新しく開発した複合改良地盤の地盤物性を室内試験により把握した。さらに、直接基礎の底面接触条件と本材料を基礎側面の埋土地盤へ適用した場合の地震応答低減効果を振動台模型実験により検討した。また、3D 非線形 FEM を用いた解析検討により、複合改良地盤を用いた基礎の地震応答低減効果について検討を行った。以下に得られた知見を示す。

- 1) ゴムチップと繊維材を添加した複合改良地盤の一軸圧縮試験では、セメント系改良地盤 (PL) は破壊ひずみが 1%程度であるのに対して、複合改良地盤 (TR, HDR) は破壊ひずみが 7.5%程と増加し、ピーク強度を示した後も強度低下が小さく、15%以上の変形に対しても形状を保持し靱性の向上が確認できた。また、繰返しせん断試験では、TR, HDR は PL と比べてせん断剛性は小さく、大ひずみ域 ($\gamma > 1\%$) でも安定した性状を示すことが確認できた。
- 2) 直接基礎の側面をセメント系改良地盤 (PL) と複合改良地盤 (TR, HDR) で埋込んだ建物模型の振動台実験では、地盤-建物連成系のピーク振動数は、基礎底面の接触条件が接着あり、接着なし、絶縁の順で小さくなり、最大振幅は絶縁の条件で低減効果が大きかった。また、接触条件が接着なしと絶縁の場合の最大振幅は入力レベルが大きくなると小さくなり、HDR の複合改良地盤でひずみ依存による応答低減効果が大きかったことが確認できた。
- 3) 3D 非線形 FEM を用いた解析では、基礎底面が接着ありと絶縁の接触条件で、基礎側面が HDR 複合改良地盤の建物応答性状の違いを良く捉えることができた。また、HDR 側面地盤の最大主ひずみ分布より、基礎底面が接着ありよりも絶縁の場合で、建物のロッキング振動による基礎前後面の複合改良地盤の塑性化によって震動エネルギーを吸収し、建物応答を低減することが確認できた。
- 4) 以上から、基礎底面の摩擦抵抗を小さくして入力動の低減と非(避)共振化を図り、基礎側面の複合改良地盤で震動エネルギーを吸収することにより建物の地震応答を大幅に低減できる。さらに、靱性のある複合改良地盤は、大地震時においても埋込みによる応答低減効果と基礎の過度の変形を抑制することが期待できる。一方、基礎底面を絶縁させた条件では、建物の形状によってはロッキング成分が卓越するため、上下動応答を含め対策が必要となる。

今後、実大建物への適用に向けて、建物モデルの振動特性や入力地震動の特性による応答低減効果や、基礎の絶縁方法についてさらに研究を進める予定である。

謝辞

本研究の一部は、平成 23 年度科学研究費補助金[基盤研究(B) 極大地震入力に対する高耐震基礎の開発と入力機構の解明に関する研究(22360226)]の助成により実施しました。また、複合改良地盤を製作するにあたり、住友ゴム工業株式会社より高減衰ゴムをご提供いただきました。付記して、謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会：建物と地盤の動的相互作用を考慮した応答解析と耐震設計，2006.2.
- 2) 日本建築学会，基礎構造系振動小委員会：第 8 回構造物と地盤の動的相互作用シンポジウム-非線形相互作用の解明と設計への組み込み-，2006.12.

- 3) 壁谷澤寿一, 壁谷澤寿梅: 基礎滑り挙動を伴う直接基礎建物の地震応答推定手法, 日本建築学会構造系論文集, 第 634 号, pp.2151-2158, 2008.12.
- 4) 日本建築センター: 改訂版 建築物のための改良地盤の設計及び品質管理指針, 2002.
- 5) 島村淳, 岸本美季, 柏尚稔, 宮本裕司: ゴムチップと繊維材を用いた複合地盤材料の力学特性に関する研究, 日本建築学会技術報告集, 第 17 巻, 第 35 号, pp.61-66, 2011.2.
- 6) 宮本裕司, 島村淳, 古山田耕司, 見坊東光, 山添正稔: ゴムチップと繊維補強材を用いた複合地盤の非線形相互作用と応答低減(その 1~2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 II, pp.29-32, 2008.9.
- 7) 廣田昌憲, 石村紀久雄, 鈴木康嗣, 三浦賢治, 永野正行, 清田芳治: 地震応答低減地業の開発, その 1 解析的検討と材料試験, 日本建築学会構造系論文集, 第 448 号, pp.37-46, 1993.6.
- 8) 鈴木康嗣, 廣田昌憲, 石村紀久雄, 三浦賢治, 清田芳治: 地震応答低減地業の開発, その 2 高減衰材料の動的変形特性, 日本建築学会構造系論文集, 第 458 号, pp.29-38, 1994.4.
- 9) 岸本美季, 宮本裕司: 三次元有限要素解析による地盤一構造物系の地震応答性状に関する研究, 日本建築学会近畿支部研究報告集構造系, pp.5-8, 2009.6.
- 10) Atsushi Shimamura, Hisatoshi Kashiwa, Yuji Miyamoto: Earthquake Response Reduction Considering Nonlinear Interaction between Composite Geomaterials and Foundation, ASEM'11+ (Seoul), pp.4972-4981, 2011.9.
- 11) 地盤工学会: 土質試験の方法と解説, 2000.
- 12) Akio Hara, Yoshiharu Kiyota: Dynamic Shear Tests of Soils for Seismic Analysis, 9th ICSMFE (Tokyo), Vol. 2, pp.247-250, 1977.
- 13) 日本建築学会: 入門・建物と地盤の動的相互作用, 1996.4.
- 14) 江守一郎, D.J. シューリング: 模型実験の理論と応用, 技報堂出版, 1981.
- 15) 日本総合研究所エンジニアリング事業本部: LS-DYNA 使用手引き Second Edition, 2004.5.

(2013年5月10日原稿受理, 2013年6月14日採用決定)