複合基礎の地震応答解析法に関する実証的研究

STUDY ON EARTHQUAKE RESPONSE ANALYSIS METHOD FOR COMPOSITE FOUNDATION OF WALL AND PILE GROUP

福岡篤信*¹, 宮本裕司*², 酒向裕司*³, 古江 守*³, 安達直人*⁴
喜多村 英司*¹, 岩本賢治*⁵

*Atsunobu FUKUOKA, Yuji MIYAMOTO, Yuji SAKO,
Mamoru FURUE, Naohito ADACHI, Eiji KITAMURA
and Kenji IWAMOTO*

Dynamic characteristics of a composite foundation of wall and pile group are investigated using the results of forced vibration test and earthquake observation. It is clarified that the interior piles show similar vibration mode to that of the wall foundation, and the existence of basement and interior piles restrict the natural vibration of the interior soil. The analytical results using an axisymmetric FEM show the shear force during earthquake is largely burdened by the wall foundation and that is large at the deep part of the soil. The effectiveness of the simplified lumped-mass model is verified through earthquake response analyses.

Keywords: Composite foundation, Wall-foundation, Pile, Dynamic soil-structure interaction,
Forced vibration test, Earthquake observation
複合基礎、地中連続壁、杭、動的相互作用、強制加振実験、地震観測

1. はじめに

軟弱地盤に建設される高層建物では、その基礎構造に地中連続壁（以下、連壁と呼称）を口の字型に配置し、その内外に杭を打設した複合基礎がしばしば採用される。複合基礎では、周辺地盤と内部地盤が比較的剛性の高い連壁により分離されること、杭が連壁に囲まれた内部地盤中に存在すること、一般に高層建物では地下室を有すること等が、複合基礎の地震応答を複雑にする要因となっている。複合基礎を有する高層建物の耐震設計を合理的に行うためには、連壁内部の地盤および杭の動的挙動を明らかにし、地盤と複合基礎の動的相互作用効果、すなわち慣性の相互作用（INERTIAL INTERACTION）と入力相互作用（KINEMATIC INTERACTION）¹⁾を適切に評価する必要がある。また、複合基礎の耐震性を評価するためには、地震時の連壁、杭に生じる応力の発生機構を明らかにすることが必要となる。

複合基礎の応答性状を調べた研究としては、長さ5m程度の地中壁体を外周と内部に配置した基礎の地震観測結果に基づく若松らの研究^{2),3)}、目の字状の平面を有する連壁の地震観測結果に基づく阿部らの研究⁵⁾、杭間を連壁で結合して連壁の根入れ効果による構造物への入力低減効果を振動台実験により調べた堀田らの研

究⁶⁾などがあり、連壁で囲まれた内部地盤は連壁とほぼ同様な挙動を示すことが報告されている。連壁で囲まれた内部地盤の挙動を調べた研究としては、円筒形の連壁を対象に検討した安井の研究⁷⁾や連壁の配置方法をパラメータとして検討した高橋ら⁸⁾の解析的研究がある。また、林ら⁹⁾は連壁を使用した煙突基礎の振動実験と地震観測を行い、連壁に囲まれた土が応答に及ぼす影響を考察している。これらの研究では、内部地盤が基礎の応答性状に影響を与えることが示されているが、地下室や内部杭は扱われておらず、それらの効果については明らかにされていない。

複合基礎の動的解析法としては、Penzienらが提案した杭基礎の解析法を応用した方法⁴⁾、格子型モデルを用いる方法¹⁰⁾、二次元あるいは三次元FEMを用いる方法^{5),8)}などを挙げることができる。筆者らも、静的三次元FEM解析および軸対称FEMによる動的解析の結果に基づいて、連壁と内部杭を1本の曲げせん断系にモデル化した解析法を提案し、実大の複合基礎の強制加振実験結果との比較によりその適用性を検討してきた¹¹⁾。

本論文では、新たに実施した地下室を有する複合基礎の強制加振実験結果と地震観測結果および軸対称FEMによるシミュレーション解析を通じて、連壁および内部杭の動的挙動に与える地下室、

本論文は、参考文献13),14)で既に発表したものを加筆したものである。

*¹ 鹿島 A/E 構造設計部 設計主査
*² 鹿島小堀研究室 主任研究員・工博
*³ 鹿島小堀研究室 研究員
*⁴ 鹿島技術研究所 研究員
*⁵ 鹿島情報システム部

Senior Structural Eng., A/E Structural Engineering Dept., Kajima Corp.
Senior Research Eng., Kobori Research Complex, Kajima Corp., Dr. Eng.
Research Eng., Kobori Research Complex, Kajima Corp.
Research Eng., Kajima Technical Research Institute, Kajima Corp.
Intelligent Systems Dept., Kajima Corp.

内部地盤の影響を明らかにする。また、複合基礎に生じる地震時応力について検討するとともに、連壁に生じる応力を建物の慣性力による応力と地盤震動による応力に分離して検討する。さらに、筆者らの提案した解析法に基づく質点系モデルにより地震観測結果のシミュレーション解析を行い、解析法の有効性を検証する。

2. 対象建物および地震観測概要

対象建物の複合基礎の杭配置と地震観測点位置を図1に示す。建物は東京臨海部に建つ地上33階、地下2階の高層住宅であり、平面形が約30m角で高さ約104mの高層棟と外周の低層部からなる。複合基礎は、高層棟直下に配置された平面形が約30m角、厚さ1.2mの連壁とその内部に打設された軸径1.8m、拡底径3.0mの場所打ち鉄筋コンクリート杭20本と、さらに連壁の外側に低層部を支持する杭径0.6mのPHC杭65本から構成される。地上部はRC造の純ラーメン構造で、高層棟部分は各杭位置と連壁上部に柱を有する整形な架構である。

地震観測は図1に示した高層棟の3フロア（33F, 17F, B1F）と連壁の5深度（GL-12.5m, -16.0m, -19.5m, -23.0m, -26.5m）、内部杭の3深度（GL-12.5m, -19.5m, -26.5m）および建物から約14m離れた地盤系の4深度（GL-1.0m, -15.0m, -20.5m, -27.5m）の加速度について行っている。また、地盤系（GL-14.3m）と建物直下地盤では間隙水圧の観測も行っている。水平方向の加速度の計測はX方向を対象にしており、地震観測は建物竣工後から行っている。建物と地盤系の加速度計はサーボ型加速度計（ $f_0=5\text{Hz}$ ）を、連壁、内部杭の加速度計は動ひずみ型加速度計（ $f_0=100\text{Hz}$ ）を使用しており、データ収録はサンプリング周波数100Hzでデジタル収録している。

地盤系の地震計設置位置の地盤調査結果に基づく地盤定数を表1に示す。地盤層序は地表から約7mが盛土・埋土、GL-7~-13m付近が下部有楽町層に当たるシルト層、GL-13~-26mが東京層で粘性土層と砂層の互層になっており、GL-26m付近から複合基礎の支持層となる東京礫層が出現する。N値は、盛土・埋土で3~9、下部有楽町層で0~2であり、東京層ではGL-13~-14m付近の粘性土層で19、GL-14~-19m付近の砂層で32~50、GL-19~-26m付近の粘性土層で4~19となっている。

3. 軸対称FEMモデル

強制加振実験と地震観測結果の解析は軸対称FEMを用いて行った。地震観測記録検討時の解析モデル図を図2に示す。要素サイズにより決まる有効振動数範囲はS波の1/8波長に対して10.8Hzであり、解析では8Hzまでを対象振動数とした。複合基礎の軸対称モデルへの置換は次のように行った。地下室は剛要素とし、B1FおよびB2Fの面積がそれぞれ等価になる円形基礎にモデル化した。連壁はB2F部分と同一の半径で、有効せん断剛性、断面2次モーメントが等価となるシェル要素にモデル化した。杭は群杭として断面2次モーメントが等価となるように内部杭を2重、外部杭を1重のリングパイル要素¹²⁾に置換した。地盤モデルの側面にはエネルギー伝達境界を、底面には粘性境界を考慮した。

建物は設計時に使用した立体精算モデルをもとに以下のようにモデル化した。立体精算モデルは柱に曲げ・せん断・軸方向変形を、梁に曲げ・せん断変形を、柱-梁接合部パネルにせん断変形を考慮

図1 杭配置および地震観測点位置

したモデルで、基礎底面位置に軸対称FEMモデルにより計算される水平と回転の地盤ばねを接続している。この設計モデルを用いて得られた固有振動数と後述する地震観測および修正設計モデルによる固有振動数を比較して、表2にまとめて示す。ここで、固有振動数は33F/B1Fのフーリエ・スペクトル比のピーク振動数から求めた。観測結果は設計値に比べ1次振動数で一割程度高振動数側となり、高次モードでは差の割合が大きくなっている。この理由として、各部材剛性の算出根拠としているコンクリート強度を設計モデルでは設計基準強度を用いていること、設計モデルでは考慮していない非構造壁が剛性に寄与していることが考えられる。修正設計モデルでは、コンクリート強度として現場水中養生された供試体の28日強度の平均値（設計基準強度の1.36倍）を用いて部材剛性を変更し、さらに非構造壁を考慮して設計モデルを修正した。修正設計モデルの固有振動数は観測値によく対応していることがわかる。軸対称FEMモデルでは、立体モデルのX方向に対してねじれの影響が少ないことから、この立体の修正設計モデルを1本の多質点曲げせん断棒に置換し、減衰は2%の複素減衰とした。

表1 地盤定数

図2 軸対称 FEMモデル

表2 固有振動数の比較

	(Hz)		
	1次	2次	3次
設計モデル	0.53	1.67	2.86
観測結果	0.59	1.94	3.47
修正設計モデル	0.60	1.98	3.46

図3 強制加振実験解析ケース

4. 強制加振実験結果の検討

強制加振実験は、B1Fの床スラブの施工が完了した段階に実施した。加振実験時の地表面レベルは図1に示したようにB1Fの床スラブ面と同レベル (GL-4.5m) であった。実験は、最大加振力 3 ton の偏心質量一定方式の起振機1台をB1Fの床スラブ中央に設置して、

X方向を対象に実施した。実験では振動数を段階的に上昇させた場合と下降させた場合を実施し、両者の実験結果に差がないことから、線形範囲の実験であることを確認した。計測は各階の床上に配置した水平と上下方向の変位計および地震観測用に連壁と内部杭の深さ方向に埋設した水平(X)方向の加速度計により行った。

図4 B1Fの共振曲線の比較

図5 Case-1とCase-2の振動モードの比較

図6 連壁と杭の振動モード図

各階床に配置した変位計の計測結果から、各階床スラブはほぼ水平と回転の2自由度の剛体振動をしていることが確認できたため、最小2乗法により各階の水平変位と連壁中央Y軸を回転軸とする回転変位を求めた¹³⁾。解析は、加振実験時の状態に合わせ、B1F床レベルより下部の地下室と複合基礎をモデル化¹³⁾して行った。解析では、地下室の有無と周辺低層部の外部杭が複合基礎の振動性状に与える影響を検討するため、図3に示す3ケース (Case-1~Case-3) を実施した。

B1F位置の水平変位と回転変位の共振曲線を解析結果とともに図4に示す。実験結果には、複合基礎と地盤の動的相互作用効果による大きな逸散減衰のため明瞭なピークがみられない。解析結果についてCase-1とCase-2を比較すると、水平、回転方向とも3Hz付近までの低振動数域では両Caseの振幅はほぼ一致している。高振動数域ではCase-1の応答には実験結果にみられない周波数特性が現れ、Case-2と様相を異にしている。これらの理由は、図5に示す振動モードから次のように考えられる。低振動数域では2.0Hzの振動モード図に示されるように、地下室と内部杭が存在することによる影響は小さく、両Caseとも連壁と内部地盤が一体となった振動モードを呈し、複合基礎の剛性として連壁の剛性が内部杭の剛性に比べ支配的であるためである。一方、高振動数域では、4.8Hzの振動モード図にみられるように、Case-1では内部地盤固有の振動が励起され連壁の振幅が小さくなっているが、Case-2ではCase-1において卓越する地表近くの内部地盤の振動が地下室および内部杭の存在により抑えられているためである。外部杭をモデル化したCase-3では、Case-2に比較して周波数特性に大きな変化はみられないが、加振振動数全域で基礎の応答が低減し、その違いは水平方向に比べ回転方向で大きくなっている。この理由として、外部杭の存在による水平、回転方向の剛性と逸散減衰の増大を挙げることができ、特に、外部杭の上下抵抗に起因する回転方向の剛性の増大の影響が大きいためと考えられる。また、実験結果との比較では、水平、回転方向ともCase-3が実験結果に対応してくる。

図6に実験結果から得られた連壁と内部杭の振動モード図を示す。連壁と内部杭の挙動は各振動数においてはほぼ同じモードを示しており、高振動数になるにつれて深さ方向の測定点間の位相差が大きくなり高次モードに移行している。

このように、複合基礎では地下室や内部杭が存在することにより内部地盤が卓越する固有振動が拘束されること、連壁と内部杭はほ

ぼ同じ振動モードを呈することがわかる。また、本実験のように低加振力レベルの複合基礎の応答に、外部杭の存在による水平、回転方向の剛性と逸散減衰の増大が影響することがわかる。

5. 地震観測記録の検討

5.1 地盤-建物系の応答特性

検討対象とした地震は、表3に示す1996年9月に発生した千葉県東方沖地震である。地盤系GL-1m位置の最大加速度は20.9Galであった。また、当該地震時の地盤系のフーリエスペクトル比 (GL-1m/GL-27.5m) は他の小地震時と有意な差はみられず、過剰間隙水圧の発生も認められなかったことから、地盤は線形状態にあったと考えられる。

解析は、地盤系観測点GL-27.5m位置を基準とした伝達関数を算定し、応答波形は同位置の観測波を伝達関数への入力として求めた。ただし、後の図7の(a)に示すように地盤系の観測記録には複合基礎の存在による拘束効果が認められたため、伝達関数の基準点は、軸対称FEMモデルにおいて地盤系観測点と建物の位置関係を考慮し、連壁中心から42.85mでX軸から34度方向の点のX方向成分とした。なお、以後の観測記録のスペクトルは、建物系の3次振動数までを十分に包含する5Hzまでの範囲を示す。

地盤系および地盤-建物系の観測記録のフーリエスペクトル比を解析結果と比較して図7に示す。なお、地盤系のスペクトル比 (GL-1m/GL-27.5m) には、複合基礎の影響が無い自由地盤の解析結果を併記する。地震計位置の地盤系の解析結果は、自由地盤と比較しピーク振動数が高くなり振幅は大幅に小さくなる。また、自由地盤に比べ観測結果とよく対応することから、地震計位置の地盤応答が複合基礎の影響を受けていることが確認できる。33F/GL-27.5mの観測結果には、地盤-建物連成系の1次~3次のピークが明瞭に認められる。解析結果は2次のピークでやや大きめとなるが各ピーク振動数は対応し、建物の応答性状をよく捉えている。B1F/GL-

表3 検討対象地震諸元

発震日時	1996年9月11日11時37分
震央位置	千葉県東方沖
マグニチュード	6.2
深さ	53 km
震央距離	130 km
震源距離	140 km

図7 フーリエスペクトル比

27.5mの観測結果は、2.4Hz付近に地盤系と同様なピークがみられ、建物の1次～3次に対応する振動数で多少変動している。解析結果は1次、2次の振動数における応答性状とよく対応している。建物の3次振動数に相当する3.5Hz付近では観測結果に鋭い落ち込みがあるが、解析結果はあまり明瞭ではない。この振動数はGL-13m

図8 建物33F, B1Fの加速度波形と入力加速度波形

図9 連壁と内部杭 (GL-19.5m) の加速度波形

以浅の地盤の1次振動数にほぼ対応しており、解析ではこの振動数における地盤の振動モードを十分に表現できていないためと考えられる。

建物33FとB1Fにおける加速度波形を解析結果と比較して図8に示す。図中には、解析の入力波として用いたGL-27.5mの観測波形も合わせて示した。建物33Fの応答振幅は、地盤系で主要動が終了した後の100秒以降にも大きくなる部分がみられるが、入力波に含まれる比較的長い周期の後続波成分により建物の1次周期が励起されて応答が継続したと考えられる¹⁴⁾。解析結果は33Fの最大加速度値を小さめに評価しているが、観測波形の包絡形状、後続波に対する応答ともよく対応していることが確認できる。

5.2 複合基礎の地震応答

連壁、内部杭の中間深さ位置 (GL-19.5m) の加速度について、その主要動部分を解析波形と比較して図9に示す。連壁と内部杭の加速度波形は非常によく対応した形状を示している。解析結果には観測波形に含まれる高振動数成分はみられないが、連壁と内部杭の波形とも観測波形の特徴をよく捉えている。図10に連壁、内部杭の中間深さ位置 (GL-19.5m) の加速度のフーリエスペクトルを解析結果と比較して示す。連壁、内部杭ともに1Hz付近と3.7Hz付近にピークがみられる。これらのピークは地盤系の観測記録にもみられるピークであり、観測地震波に含まれる卓越成分である。連壁と内部杭の周波数特性もほぼ同じ性状を示しており、解析結果は観測結果にみられる連壁と内部杭の応答性状とよく一致している。なお、解析結果から連壁に囲まれた内部地盤についても連壁、内部杭と同様な

(a) 連壁 (GL-19.5m)

(b) 内部杭 (GL-19.5m)

図10 連壁と内部杭 (GL-19.5m) のフーリエスペクトル

応答性状を示しており、内部地盤の応答が複合基礎により拘束されていることが確認できている。

解析による連壁と杭の最大せん断力分布を図 11 に示す。地震時のせん断力は内部杭と外部杭での負担が少なく、そのほとんどを連壁が負担している。連壁の応力は連壁の頂部よりも GL-19m~GL-25m 付近の粘性土層で大きくなっている。次に、連壁頂部に近い位置 (GL-12.5m) と連壁の応力が大きい粘性土層位置 (GL-23.0m) について、上部建物および地下室部分を無質量とした応答解析から求められる地盤震動による応力 (Kinematic) と全体のせん断力 (Total)

図 11 連壁と杭のせん断力分布

図 12 連壁のせん断力波形

から地盤震動による応力を時刻歴で差し引いて求めた建物の慣性力による応力 (Inertial) とに分離して検討する。得られたせん断力波形を図 12 に示す。両深度とも地盤震動による応力が建物の慣性力による応力に比べ大きくなっており、最大値では GL-12.5m で 2.6 倍、GL-23.0m で 3.1 倍となっている。この理由として、上部構造の慣性力によるせん断力は地下室側面の地盤に流れるため、上部構造から連壁に伝わるせん断力が少なくなること、連壁の剛性が比較的大きいため地盤との変形差が大きくなり地盤震動による応力が大きくなること等が挙げられる。また、連壁の応力が GL-19m~GL-25m 付近の粘性土層で大きくなる理由は、地盤剛性が上下の層に比べ小さい粘性土層では地盤変形が大きくなり、地盤震動によって生じる応力が増大するためと考えられる。図 13 にこれらのせん断力波形のフーリエスペクトルを示す。両深度とも建物の慣性力による応力は建物の 1 次、2 次振動数において大きくなっているが、その他の振動数では地盤震動による応力が支配的である。

このように、建物からの慣性力による応答に加え地盤震動による応答が生じる地震時にも連壁、内部杭はほぼ同じ挙動を示すことが認められた。また、地震時に複合基礎に生じるせん断力はそのほとんどを連壁が負担すること、連壁に生じるせん断力は地盤震動による応力が大きいことがわかった。

6. 質点系モデルによる地震観測記録の検討

複合基礎の地震応答解析モデルとして、既報¹¹⁾では内部杭の剛性

図 13 連壁のせん断力波形のフーリエスペクトル

図 14 質点系モデル

図 15 地盤剛性計算時の要素分割 (平面)

を無視し連壁と内部杭を1本の曲げせん断要素でモデル化した図14に示す質点系モデルを提案した。本論文では、内部杭の挙動も検討対象とすることと外部杭の寄与を取り込むため、既報の解析モデルを一部改良して連壁と各杭に独立な自由度を与えたモデルを用いて地震観測記録のシミュレーション解析を行った。

解析モデルでは、連壁を箱型断面の曲げ剛性(EI)とせん断剛性(GA)を有する一本の曲げせん断要素¹¹⁾にモデル化した。内部杭と外部杭は各杭毎に曲げせん断要素に置換し、平面的な位置を考慮して地下室部の剛要素に接続している。各曲げせん断要素には連壁と各杭との連成を考慮した地盤剛性マトリックス¹⁴⁾を接続した。さらに、地下室部の各質点には埋込み基礎の側面ばね(水平と回転)¹⁵⁾を付加した。連壁、杭の地盤剛性マトリックスの算定は、連壁上端を地表面とした薄層要素法の点加振解¹⁶⁾を用いて評価した。地盤剛性マトリックス算定時の離散点は、図15に示す平面的位置で深さ方向に10分割した節点とした。各節点で水平と上下方向の自由度を考慮して地盤の柔性マトリックスを評価した後、連壁部については同一深度毎に平面保持を仮定して、水平と回転の自由度に集約した。なお、既報¹¹⁾では連壁下端の回転ばねを別途評価したが、本論文では、連壁下端の上下方向自由度に基づく回転成分が、上記の地盤剛性マトリックス中に組み込まれている。

質点系モデルへの入力は、GL-27.5mを入力位置とし、地表面レベルまでをモデル化して一次元波動論(SHAKE)により求めた自由地盤応答とし、上記の周波数依存の地盤剛性マトリックスを用いた

図 16 建物 33F の加速度波形

図 17 フーリエスペクトル比

図 18 連壁と内部杭 (GL-19.5m) のフーリエスペクトル

周波数応答解析により各部の応答を評価した。なお、地盤系の観測波には複合基礎の影響が含まれているため、GL-27.5m位置への入力地震波は、軸対称FEMを用いて同深度の地盤系の観測波を自由地盤の応答値に換算して用いた。なお、解析に用いた地盤定数と建物系質点モデルは軸対称FEMと同じである。

図16に建物33Fの加速度波形を解析結果と比較して示す。解析結果は観測波形の包絡形状と振幅をよく捉えており、後続波部分で建物の1次周期が励起される傾向がよく表現されている。図17にGL-27.5m位置の入力波に対する建物33F, B1Fのフーリエスペクトル比を解析結果と比較して示す。33F/GL-27.5mの解析結果は、図7の軸対称FEMの解析結果と同様に建物の1次ピークで若干小さめ、2次ピークで若干大きめであるが、建物の応答性状をよく捉えている。B1F/GL-27.5mの解析結果は、観測記録にみられる3.5Hz付近の鋭い落ち込みは十分に表現していないが、観測結果とほぼ同じ形状を示している。

図18に連壁、内部杭の中間深さ位置(GL-19.5m)の加速度のフーリエスペクトルを解析結果と比較して示す。質点系モデルの解析においても連壁と内部杭は一体となって振動する性状を示していることが確認でき、解析結果は観測結果によく対応していることがわかる。このことから、内部杭の剛性を無視し連壁と内部杭を1本の曲げせん断系に置換した既報¹¹⁾のモデル化によっても、複合基礎の地震時挙動を検討することが妥当であることが確認された。

7. まとめ

連壁と杭を併用した複合基礎を有する高層建物の地震観測結果および基礎部分の強制加振実験結果について検討し、軸対称FEMを用いて複合基礎とその内部地盤の動的挙動を検討した。また、質点系モデルにより地震観測記録のシミュレーション解析を行い、その有効性を検討した。本研究で明らかになったことを以下にまとめて示す。

- (1) 強制加振実験結果の検討から、連壁内部地盤の固有振動は地下室や内部杭が存在することにより抑制され、連壁と内部杭はほぼ同じ振動モードを呈すること、外部杭の存在は剛性と逸散減衰の増大に影響することがわかった。さらに、地震観測記録の検討からも、連壁と内部杭は同様な応答性状を示し、内部地盤の応答は複合基礎により拘束されていることが確認された。また、連壁をシェル要素、内部杭と外部杭をそれぞれリングパイル要素にモデル化した軸対称FEMモデルによる解析結果は、これらの複合基礎の応答性状とよく対応することがわかった。
- (2) 複合基礎の地震時せん断力の分担割合は連壁部が支配的であることが確認された。また、連壁に生じる地震時応力は、連壁のどの深さにおいても地盤震動による応力が建物の慣性力による応力に比べ大きくなることが明らかになった。これは建物の慣性力によるせん断力が地下室側面から地盤に流れ建物から連壁に伝わるせん断力が小さくなること、連壁の剛性が比較的大きく地盤震動による応力が大きくなること等による。また、地盤震動による連壁の応力は地盤剛性の小さい層付近で大きくなることがわかった。
- (3) 連壁と各杭に独立な自由度を与えた質点系モデルを用いて実施した地震応答解析結果は、複合基礎および建物の地震観測結果

とよく対応し、質点系モデルの有効性が検証された。また、質点系モデルによる解析結果においても連壁と内部杭は一体となって振動し、連壁と内部杭を1本の曲げせん断系に置換した既報¹¹⁾のモデル化によっても、複合基礎の地震時挙動を検討することが妥当であることが確認された。

謝辞

本研究を進めるに当たり、研究内容と結果の討議に参加頂き、貴重な意見、方向性を呈示下さった鹿島建設の菅野 忠博士をはじめとする関係各位に感謝の意を表します。

なお、本研究は住宅・都市整備公団と鹿島建設との共同研究によるものである。

参考文献

- 1) 井口道雄：研究の現状、第3回構造物と地盤の動的相互作用シンポジウム、pp.3~17, 1991.10
- 2) 若松邦夫、渡辺清治：WFぐいによって支持された構造物の地震観測、日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿）、pp.715~716, 昭和55年9月
- 3) 若松邦夫、渡辺清治：WFぐいによって支持された構造物の地震観測とシミュレーション、日本建築学会大会学術講演梗概集（九州）、pp.739~740, 昭和56年9月
- 4) 中川恭次、渡辺清治、武田寿一ほか4名：WALL FOUNDATIONによって支持された構造物の動的解析に関する一考察（その1）解析仮定、（その2）動的解析結果、日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道）、pp.761~764, 昭和53年9月
- 5) 阿部康彦、杉本三千雄、大飼伴幸ほか3名：ウォーターフロント地区に建つ高層建物の地震時挙動、第8回日本地震工学シンポジウム、pp.1089~1094, 1990.9
- 6) 堀田久則、河村壮一、藤井俊二ほか2名：剛性の高い基礎を有する構造物と地盤との動的相互作用に関する研究（その1）実験概要、（その2）地盤-基礎系モデルの実験結果、（その3）Kinematic Interaction Inertial Interaction、日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿）、pp.971~976, 昭和62年10月
- 7) 安井 諒：建築構造物-地盤連成系の振動解析に関する研究、京都大学博士論文、1983年10月
- 8) 高橋郁夫、林 康裕：連続地中壁と地盤の3次元の挙動に関する基礎的研究、日本建築学会論文報告集第451号、pp.99~110, 1993.9
- 9) 林 高明、田村清美、安井 諒ほか3名：R・C超高煙突の基礎および筒体の振動実験と地震観測（その1基礎の振動実験とその結果の考察-特に地中壁に囲まれた土の影響について）（その2基礎構造のモデル化の相違が筒体の地震応答に及ぼす影響-Siteの地震波による検討）（その3筒体の振動実験と地震観測）（その4筒体の振動実験と地震観測結果のシミュレーション）、日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道）、pp.807~814, 昭和53年9月
- 10) 津川恒久、福澤栄治、奥津一雄ほか1名：30階建鉄筋コンクリート造超高層建物の耐震設計（その3）建物、連壁杭、杭底杭及び地盤の連成地震応答解析、日本建築学会大会学術講演梗概集（東海）、pp.165~166, 昭和60年10月
- 11) 増田 潔、三浦賢治ほか6名：地中連続壁と杭の複合基礎の地震応答解析法、日本建築学会論文報告集第437号、pp.41~49, 1992.7
- 12) Tyson, T.R. and Kausel, E.: Dynamic Analysis of Axisymmetric Pile Groups, M.I.T., Department of Civil Engineering, Order No.751, 1983.6
- 13) 酒向裕司、宮本裕司ほか3名：地中連続壁と杭の複合基礎の動的相互作用、第9回日本地震工学シンポジウム、pp.1165~1170, 1994.9
- 14) 福岡篤信、安達直人、宮本裕司ほか8名：複合基礎を有する高層RC建物の地震観測結果とその解析的検討（その1）地震観測概要と観測記録の分析（その2）複合基礎の地震応答性状（その3）SRモデルによる検討、日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）、pp.447~452, 1997.9
- 15) 田代見宏、泉川正裕：埋め込み基礎の側面地盤剛性について、日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道）、pp.591~592, 1986.8
- 16) Kausel, E. and Peek, R.: Dynamic Loads in the Interior of a Layered Stratum-An Explicit Solution, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.72, pp.1459~1481, 1982

(1997年7月10日原稿受理、1997年10月23日採用決定)