

3.2.6 基礎下ロードセルの検定を含む耐震壁の静加力実験

目 次

(1) 業務の内容

- (a) 業務題目
- (b) 担当者
- (c) 業務の目的
- (d) 5ヵ年の年次実施計画
- (e) 平成17年度業務目的

(2) 平成17年度の成果

- (a) 業務の要約
- (b) 業務の成果
 - 1) 周辺部材との地震時相互作用を考慮した RC 造連層耐震壁の破壊機構解明
 - 2) 3 分力計の検定
- (c) 結論ならびに今後の課題
- (d) 引用文献
- (e) 成果の論文発表・口頭発表等
- (f) 特許出願，ソフトウェア開発，仕様・標準等の策定

(3) 平成18年度業務計画案

(1) 業務の内容

(a) 業務題目 基礎下ロードセルの検定を含む耐震壁の静加力実験

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名	メールアドレス
京都大学 防災研究所	教 授	田中仁史	tanaka@sds.dpri.kyoto-u.ac.jp
京都大学大学院 工学研究科	助 教 授	河野 進	kono@archi.kyoto-u.ac.jp
京都大学大学院 工学研究科	大学院 博士課程	坂下雅信	rc.sakashita@archi.kyoto-u.ac.jp
京都大学大学院 工学研究科	大学院 修士課程	村上恭平	kyohei1202@yahoo.co.jp
京都大学大学院 工学研究科	大学院 修士課程	前田修宏	
京都大学大学院 工学研究科	大学院 修士課程	ト部 藍	

(c) 業務の目的

付帯骨組付き耐震壁に浮上りが生じる場合における損傷の進展状況を定量化する。また、解析モデルを用いて、実験で得られた挙動を追跡できることを確認する。さらに、E-Defenseにおける実物大振動台実験で用いる3分力計の検定を行う。

(d) 5ヵ年の年次実施計画

1) 平成14年度（実施業務）：

鉄筋コンクリート造中高層アパートの張間方向耐震壁の下層二層分、基礎スラブ、基礎梁、基礎杭からなる現実に近いモデルを用いた静的水平加力実験を行った。これにより、杭頭から基礎梁への応力伝達機構、基礎梁から基礎スラブへの応力分散機構、壁脚のせん断力伝達メカニズムの推移などを明確にすることを試みた。それらの成果をもとに建物の地震応答と同等な応答を振動台上で再現するための動的試験デバイスに要求される基本性能を検討した。

2) 平成15年度（実施業務）：

杭基礎で支持された鉄筋コンクリート造建物のうち耐震壁構面の浮き上がり挙動を再現できる動的試験デバイスの開発を行った。本装置の主な構成要素は、杭基礎バネを模擬する積層ゴム部と、CLB(Cross Linear Bearing)部である。

3) 平成16年度（実施業務）：

耐震壁の基礎下部に設置予定のロードセル（3分力計）の検定を行ない、E-Defenseでの実験時に試験体基礎部分に作用する力の測定精度を向上させる。また、E-Defense

における RC 造試験体から連層耐震壁下層部分を取り出した部分試験体を製作し、静的繰返し載荷実験を行うことで、耐震壁の構造性能を前もって確認しておく。

4) 平成 17 年度（実施業務）：

付帯骨組付き耐震壁に浮上りが生じる場合における損傷の進展状況を実験及び解析から定量化する。また、E-Defense における実物大振動台実験で用いる 3 分力計の検定を行なう。

5) 平成 18 年度（計画）：

浮上りが生じる等の実構造物に近い境界条件の下で付帯フレーム付き耐震壁の載荷実験を行い、各構造要素の損傷評価を行う。また、平成 17 年に E-ディフェンス振動台実物大 6 階建て実験にて用いた 3 分力計の検定を行う。

(e) 平成 17 年度実施業務目的

付帯骨組付連層耐震壁基礎部に浮上りが生じる場合と生じない場合の力学的性質、及び損傷状況を把握するための載荷実験を行う。試験体は、骨組 1 スパンが付帯した耐震壁 1 スパンであり、40%寸法の 3 層モデルである。第 1 シリーズの載荷では、試験体基礎部分を実験用反力床に固定せず、転倒モーメントも含めた軸力により生じる摩擦力のみで水平力に抵抗する機構とし、全体変形角 0.8%の載荷を行う。第 2 シリーズの載荷では、同じ試験体を 3 つの柱基礎部分で反力床に緊結し載荷を行う。ひび割れ、基礎の浮上り、塑性ヒンジの形成と損傷が進むに従い、構造物の抵抗機構が変化する様子を観察し、外力や局部での変形状況を記録する。さらに、解析モデルを用いた荷重漸増解析を行い、解析結果と実験結果を比較する。

また、E-Defense の動的加力実験で使用した 3 分力計 8 体の検定を行う。水平せん断力・モーメント・鉛直軸力を変化させ、仕様書に規定された校正係数の精度を確認する。

(2) 平成 17 年度の成果

(a) 業務の要約

付帯骨組付連層耐震壁基礎部に浮上りが生じる場合と生じない場合の静的繰返し載荷実験を行い、力学的性質及び損傷状況を把握した。損傷が進むに従い、モデル構造物の抵抗機構が変化する様子を実験的に捕らえた。また、荷重漸増解析を行い、解析結果と実験結果を比較したところ、初期剛性・ひび割れ荷重・浮上り発生荷重・最大耐力などの解析値は実験値をやや下まわる結果を示した。さらに、また、E-Defense の動的加力実験で使

(b) 業務の成果

1) 周辺部材との地震時相互作用を考慮した RC 造連層耐震壁の破壊機構解明

付帯骨組付連層耐震壁において基礎浮上り現象が生じた場合の、架構全体の損傷状況を把握し、水平力に対する抵抗機構を解明する。また、基礎浮上り現象を再現する解析モデルを構築し、実験結果を追跡できることを確認する。

a) 実験概要

i) 試験体

試験体寸法は、図 1 に示す通りであり、実物大構造物の 40%寸法とした。また、転倒防止のためにスタブを柱下部の基礎梁両側に設けた。全体架構の配筋状況を図 2 に、使用した材料の力学的特性は表 1 に示す。打設は、試験体を立てた状態で 1 回打ちとした。

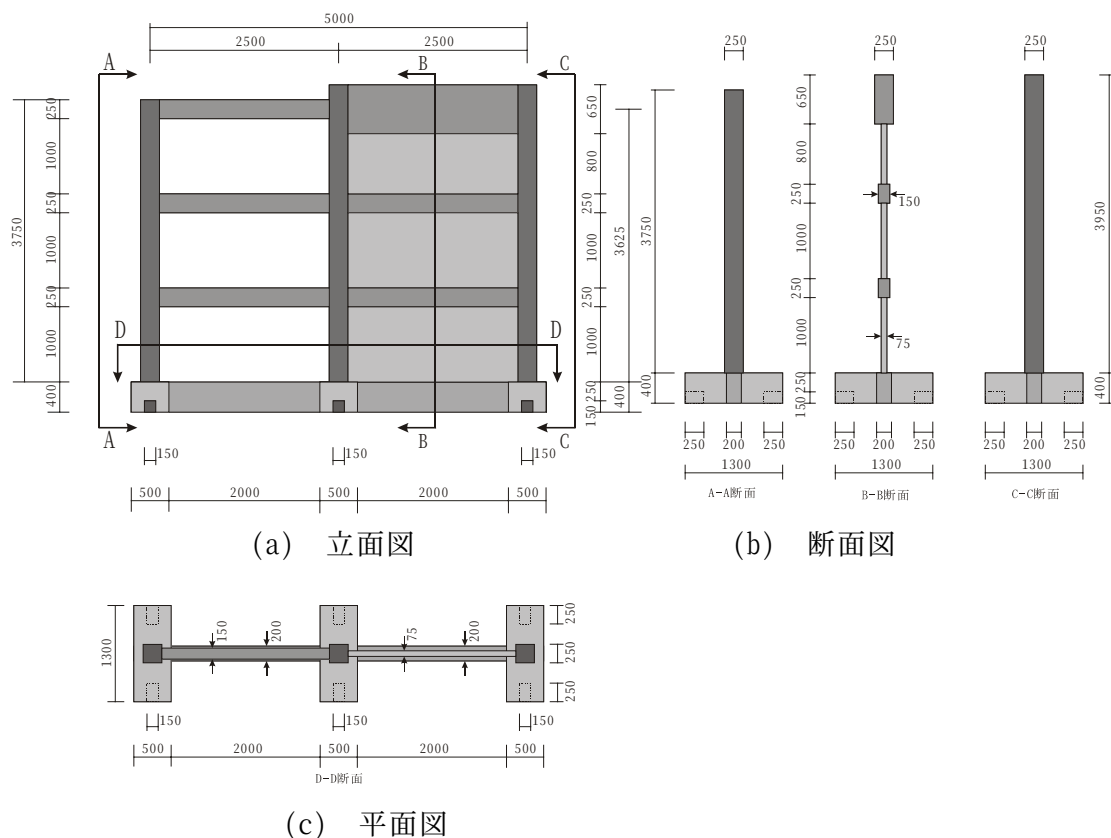


図 1 試験体の立面図及び断面図 (単位：mm)

ii) 荷重

荷重装置を図 3 に示す。各柱の上部にジャッキを 3 本、耐震壁上部の荷重梁中央に水平ジャッキを 2 本緊結した。試験体は、反力壁に PC 鋼棒で緊結されたコンクリートブロック上に載せているだけであり、PC 鋼棒等を用いて緊結していない。コンクリートブロックの詳細は、付録に掲載した。水平ジャッキによって与えられる水平力に対しては、試験体底面とコンクリートブロックとの摩擦で抵抗する。なお、十分な摩擦係数が確保できるように、試験体底面およびコンクリートブロックの上面は型枠用コンパネの裏面を用いてコンクリートを打設した。また、東側柱に 163kN、中央柱に 297kN、西側柱に 219kN の一定軸力を与えた。水平方向の加力は、耐震壁の荷重点位置変形角を制御する変位制御型静的正負交番繰り返し漸増荷重とした。まず、100kN で正負 1 回の荷重制御型荷重を行った。次に、荷重点位置変形角が 0.05%, 0.1%, 0.2%, 0.4%, 0.6%, 0.8% で各 2 回ずつ繰り返した。変形角が 0.8% の繰り返し時まで、正負方向ともに、付帯骨組の梁端と 1 階柱脚梁で曲げ降伏が生じ、水平耐力に到達したことを確認して荷重を終えた。

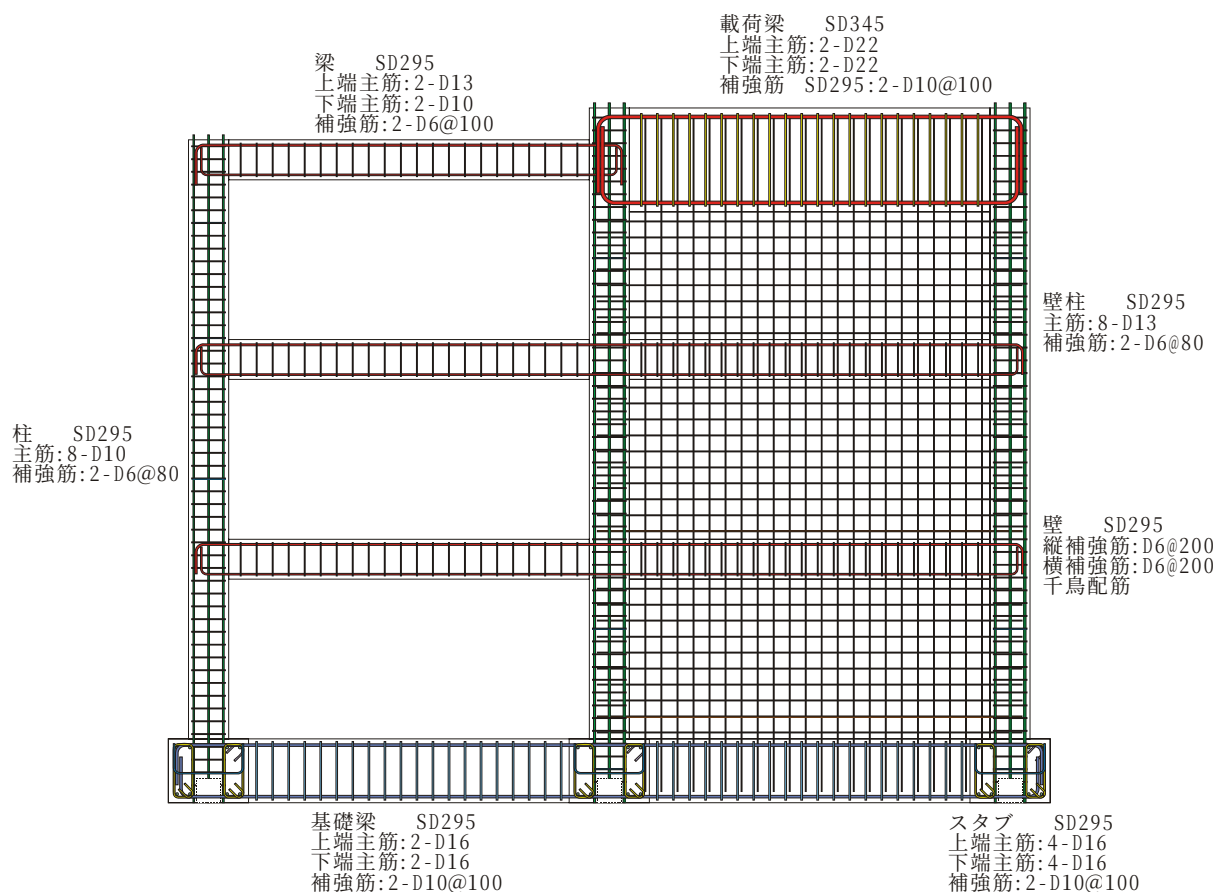


図 2 試験体配筋図

表 1 材料の力学的特性

(a) コンクリート

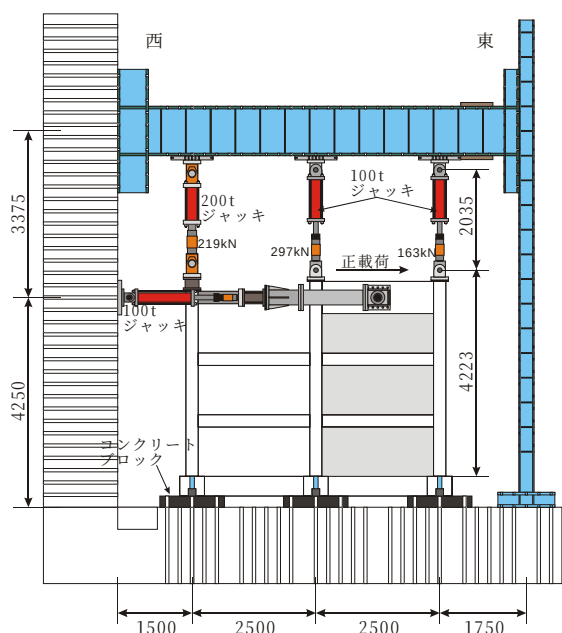
圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
26.2	2.1	22.6

(b) 鉄筋

鉄筋種類	降伏強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
D22	379	573	181
D16	345	502	190
D13	357	509	189
D10	357	506	188
D6(壁以外)	338	543	184
D6(壁縦筋)	382	531	177

また、浮上りを許容する載荷を変形角 0.8% まで行なった後に基礎部を PC 鋼棒で反力床に緊結し、耐震壁が終局状態を迎えるまでさらに、載荷点位置変形角が 0.1%、0.2%、0.4%、0.6%、0.8%、1.0%、で各 2 回ずつ繰り返した。変形角が +2% になった時点で耐震壁がせん断破壊を起こしたため、載荷を終了した。

また、鉛直ジャッキに関しては、水平変位に伴う P- Δ 効果を考慮し、載荷中の軸力が鉛直方向に常に一定となるように補正を加えた。



(a) 立面図



(b) 载荷中の写真

図3 载荷装置

b) 実験結果

i) 水平荷重－全体変形角関係および損傷状況

水平せん断力－载荷点位置変形角関係を図4に示す。ここで、せん断力係数は、与えた軸力合計値 679kN でせん断力を除した値を示す。

基礎の浮上りを許容した(a)では、正負両方向ともに基礎梁東側端部に曲げひび割れが発生し、次いで引張側耐震壁基礎部に浮上りが生じた。基礎部で浮上りが生じると、試験体の剛性は大きく低下した。その後、付帯骨組梁端で曲げ降伏が始まり、全ての梁端と1階柱脚が曲げ降伏すると、試験体の水平荷重は頭打ちとなった。ひび割れ発生荷重は正、負両方向ともに 50kN であった。しかし、表2に示すように、基礎部浮上り発生荷重、フレーム部材降伏荷重、最大荷重は、正方向（東方向）载荷の方が負方向（西方向）载荷よりも大きい値を示した。また、初期剛性は、正方向 158 kN/m・負方向 121 kN/m であった。基礎部浮上り時、正方向は引張側耐震壁基礎部の浮上りに対して付帯骨組の梁が抵抗するのに対し、負方向においては骨組みと反対側の基礎部が浮き上がるため、付帯骨組の梁が与える拘束効果が小さいため、基礎部浮上り荷重に差が生じたと考えられる。浮上り後、耐震壁はほぼ剛体回転を始め、付帯骨組柱の負担水平力が増加し、変形は付帯骨組部材に集中した。

浮上りを許容しない(b)では、浮上りを許容した载荷で梁両端および骨組部1階柱脚に塑性ヒンジが形成され損傷が進んでいたこと、耐震壁にはほとんど損傷が生じていなかったことの2点から、耐震壁が主に水平力に抵抗しているような紡錘形の履歴を描いた。ただし、浮上りを許容する場合と同様に正側载荷において付帯骨組の拘束を受けるため耐力が負側より高くなっている。最終的には、正側で $R=2.0\%$ に到達したとき、1階壁脚においてせん断すべりが生じて終局状態を迎えた。

载荷点位置変形角 0.8%時の試験体損傷状況を図5に示す。ここで、赤線は正方向载荷時

に、青線は負方向荷重時に生じたひび割れであり、黒線は荷重前に確認されたひび割れである。浮上りを許容した場合は、正負両方向ともに耐震壁に損傷はほとんど生じず、ここでも壁が剛体回転し変形が小さかったことが分かる。基礎梁を含む全ての梁と1階柱脚部では、塑性ヒンジが生じたため、曲げひび割れが多く見られる。なお、試験体と下部コンクリートブロックの間に滑りが生じることはなかった。これに対し、基礎梁を固定した場合には、耐震壁が水平力のほとんどを負担していたと思われ、柱の曲げひび割れが、壁板部でせん断ひび割れに発展する様子が全ての層で観察された。最終的には、(b)に示す円内の圧縮ストラット1階部分で負荷荷時のひび割れ位置で圧壊が生じ、この線に沿ってせん断すべりが生じた。

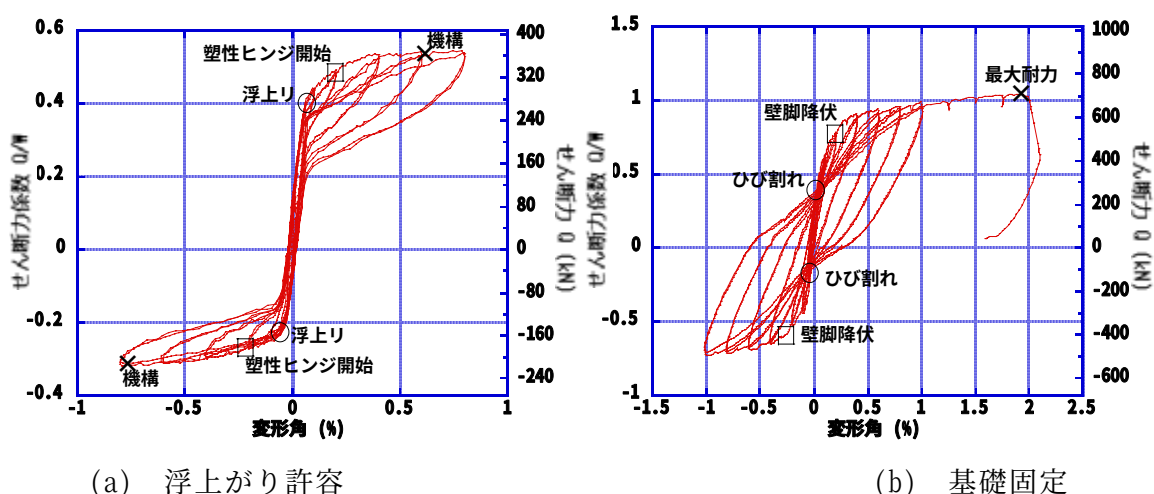


図4 水平荷重－荷重点位置変形角関係 (W=679kN)

表2 浮上りが生じる場合の特性値

	荷重 (kN)		変形角 (%)	
	正方向	負方向	正方向	負方向
ひび割れ	50	50	0.0017	0.0052
浮上り	273	140	0.0610	0.0411
最大耐力	369	216	0.613	0.770

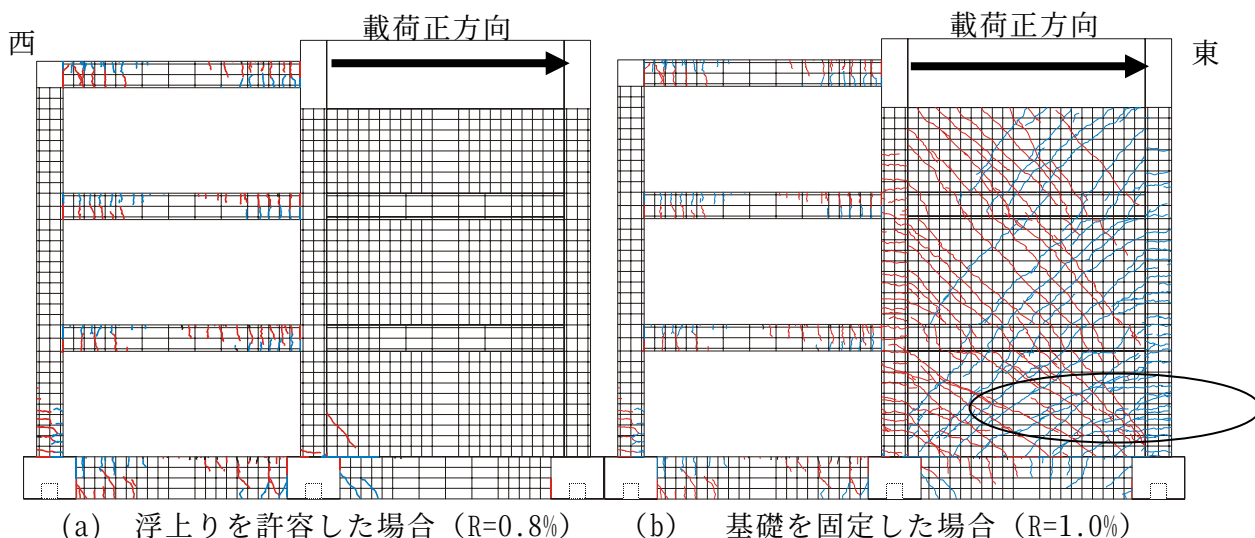


図5 荷重点変形角0.8%時の試験体損傷状況

ii) 等価粘性減衰定数

第2サイクルを用いて計算した等価粘性減衰定数の推移を図6に示す。境界条件の非対称性を考慮し、正方向と負方向のみの値も算出した。ただし、正方向履歴ループと負方向履歴ループは荷重の正負によって分類した。

浮上りを許容する場合は、ほぼ10%以下の低い値を示した。これは、履歴ループにおけるエネルギー消費がフレーム架構のみにおいて行われており、耐震壁はほとんど損傷がないまま剛体回転をしているため、耐震壁によるエネルギー消費がほとんど行われなかったためと考えられる。

これに対し、基礎を固定すると耐震壁が損傷を受けることで荷重変形関係が紡錘形になり、等価粘性減衰定数はほぼ10%をこえる値になり、変形が進むとさらに値が大きくなった。

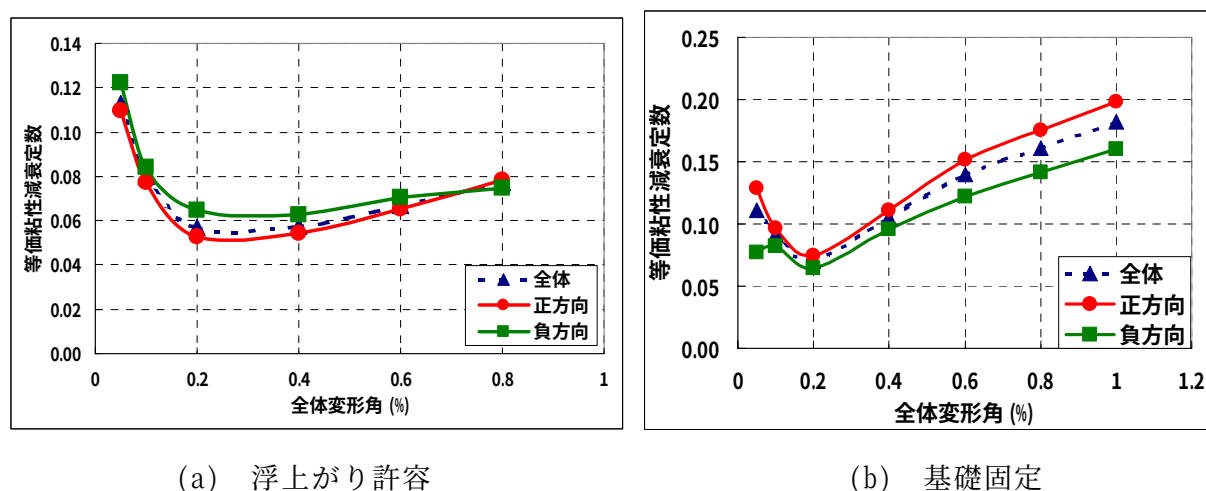
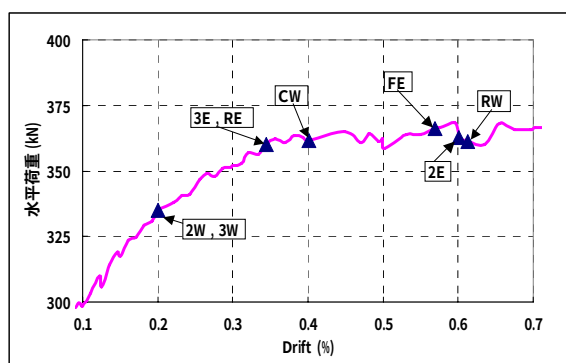


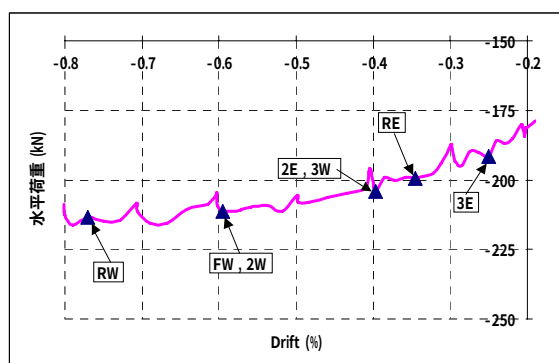
図6 等価粘性減衰定数の推移

iii) フレーム架構におけるヒンジ形成

浮上りを許容した場合の荷重時に観察された鉄筋のひずみから、試験体に塑性ヒンジが生じた順序を確認した。その順序を図7に示す。図7中の記号は図8に示す部材端位置を示す。正方向荷重では水平荷重335kN、全体変形角0.2%で2階及び3階の梁部材西側材端に塑性ヒンジが形成されたのに対し、負方向では水平荷重192kN、全体変形角0.25%で3階梁部材東側材端に塑性ヒンジが形成された。正方向では引張側耐震壁基礎部の浮上りに対して付帯骨組が抵抗するのに対し、負方向においては付帯骨組の拘束が小さいため、基礎部の浮上り発生荷重は負方向のほうが小さかった。基礎部が浮上り始めると剛性が大きく低下するために、浮上り発生の早かった負方向では先に付帯骨組の変形が進行し、付帯骨組梁端に塑性ヒンジが形成され、剛性はさらに小さくなったと考えられる。

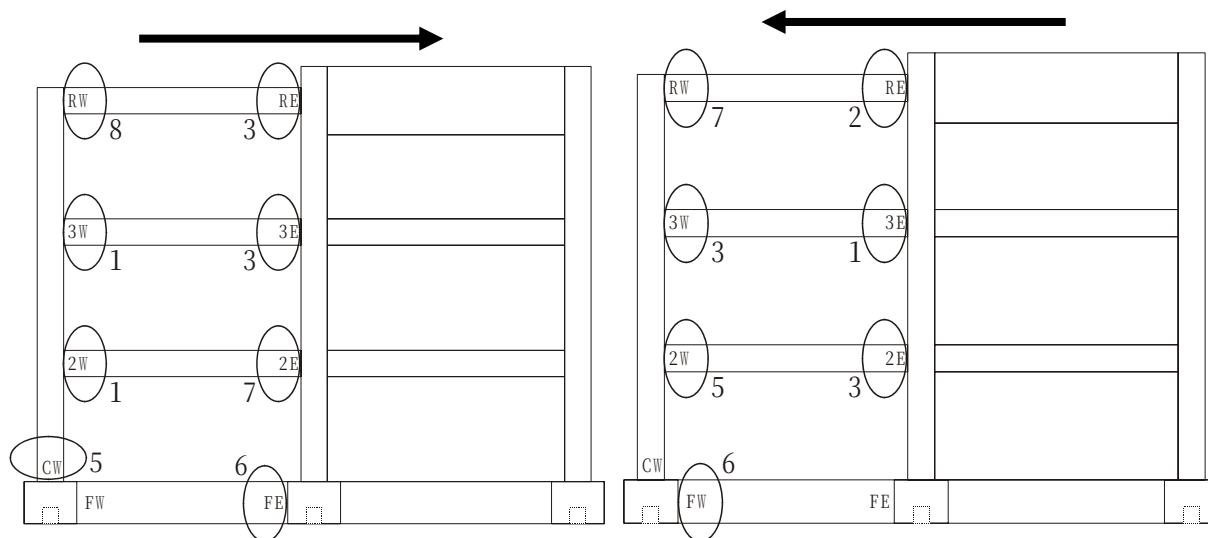


(a) 正方向載荷



(b) 負方向載荷

図7 浮上りを許容した載荷における荷重変形関係上のヒンジ形成順序



(a) 正方向載荷

(b) 負方向載荷

図8 浮上りを許容した載荷におけるヒンジ形成順序

c) 静的荷重漸増解析

解析ソフト SAP2000 を用いて行った静的荷重漸増解析の結果を実験結果と比較する。境界条件の非対称を考慮するため、正負両方向への静的荷重漸増解析を行った。

i) 荷重漸増解析の概要

解析は、中高層壁式ラーメン鉄筋コンクリート造設計施工指針・同解説を参考に、図9に示す通り耐震壁をブレースに線材置換し、壁柱を両端ピンとして耐震壁と同じ曲げ剛性となるように断面を定めた。また、梁は剛と仮定し、壁柱と基礎梁の節点でピン支持とした。以下に本解析における基本仮定を示す。

- 梁及び柱部材は線材に置換する。履歴復元力特性は、菅野式を用いる。
- 耐震壁を各階でX形ブレースに置換する。
- 壁柱は、両端ピンとして軸方向変形のみを考慮し、耐震壁の曲げ剛性に壁柱群の全体曲げ剛性が一致するよう壁柱の軸方向断面を定める。
- 耐震壁の枠梁は剛とする。
- 壁柱と基礎梁の接点でピン支持とする。

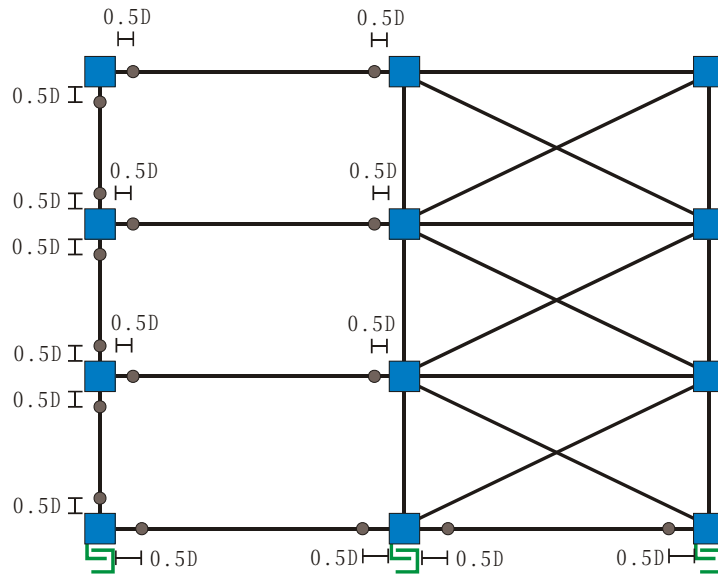


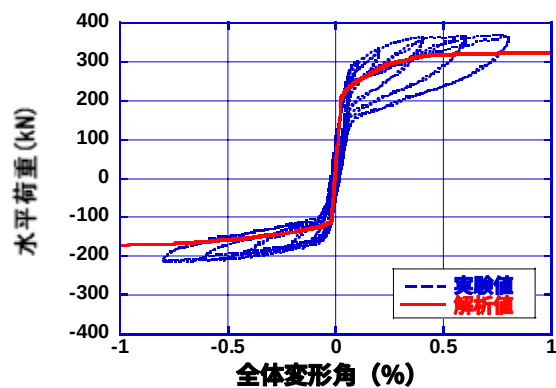
図9 試験体のモデル化

ii) 水平荷重－全体変形角関係

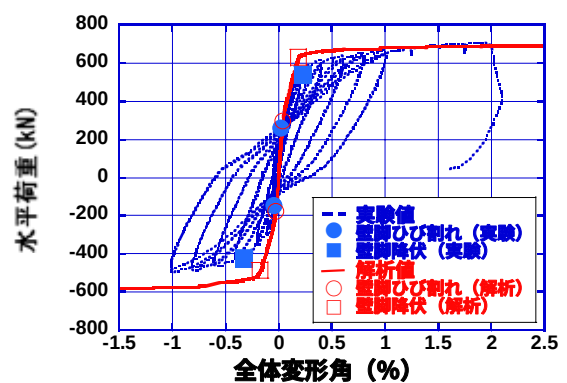
図10に実験と解析から得られた水平荷重－載荷点変形角関係を示す。

図10(a)では、解析による包絡線は正負両方向において実験値よりかなり小さい値を示した。特性値の比較を表3に示す。初期剛性、ひび割れ荷重に関しては、正方向、負方向ともに解析値が実験値を大きく上回る結果となった。耐震壁は、実験および解析ともに剛体回転を生じているので、梁や柱の復元力特性の仮定が実験とは異なっていたことが原因と考えられる。

図10(b)では、解析による包絡線は負側で実験値より大きな値を示したが、正側ではほぼ実験の包絡線に一致している。特性値の比較は表4に示すとおりである。ただし、解析は無損傷のモデルを漸増解析したのに対し、実験では一旦損傷を受けた試験体の再載荷であるため、初期の剛性は解析の方が高くなっている。



(a) 浮上がり許容



(b) 基礎固定

図10 水平荷重－載荷点変形角関係における実験と解析の比較

表3 浮上がりを許容した場合の特性値

(a) 荷重に関する特性値

	正方向		負方向	
	実験値	解析値	実験値	解析値
初期剛性 (kN/m)	1.58E+05	2.02E+05	1.21E+05	2.00E+05
ひび割れ (kN)	50	222	-50	-121
浮き上がり (kN)	273	206	-140	-112
塑性ヒンジ (kN)	335	282	-192	-153
最大耐力 (kN)	369	322	-216	-168

(b) 変形に関する特性値

	正方向		負方向	
	実験値	解析値	実験値	解析値
ひび割れ (%)	0.0017	0.0399	-0.0052	-0.0605
浮き上がり (%)	0.0610	0.0243	-0.0411	-0.0264
塑性ヒンジ (%)	0.20	0.20	-0.25	-0.40
最大耐力 (%)	0.61	0.80	0.77	-0.80

表4 基礎を固定した場合の特性値

(a) 荷重に関する特性値

	正方向		負方向	
	実験値	解析値	実験値	解析値
ひび割れ (kN)	259	298	-148	-178
壁脚降伏 (kN)	542	632	-421	-488
最大耐力 (kN)	708	690	—	-584

(b) 変形に関する特性値

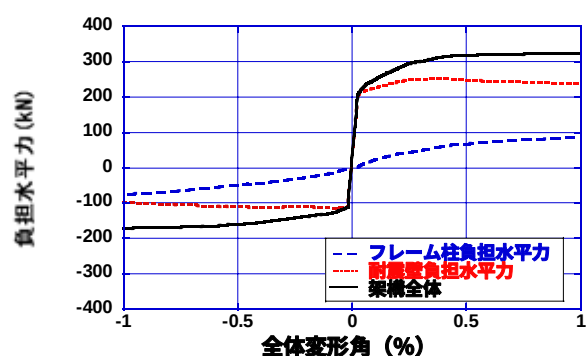
	正方向		負方向	
	実験値	解析値	実験値	解析値
ひび割れ (%)	0.023	0.035	-0.044	-0.029
壁脚降伏 (%)	0.223	0.185	-0.333	-0.174
最大耐力 (%)	1.943	2.000	—	-2.009

iii) 基礎が浮上る場合の負担水平力

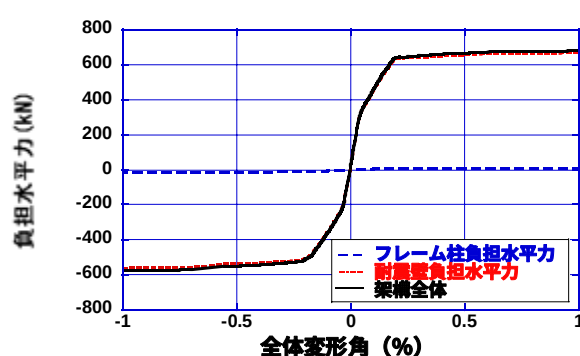
フレーム架構1階柱と耐震壁の1階部分が負担する水平力の推移を図11に示す。

浮上りを許容した場合は、正負両方向ともにゼロ付近のごく初期では水平荷重の大部分を耐震壁が負担している。しかし、浮上りが生じた点（正方向では全体変形角0.025%、負方向では0.02%付近）で耐震壁の剛性は大きく減少し、付帯骨組で塑性ヒンジが生じた点（正方向は全体変形角0.3%、負方向は全体変形角0.2%付近）で耐震壁の負担水平力は減少していき、フレーム柱の負担水平荷重が増加している。

基礎を固定した場合には、付帯骨組の柱の水平力負担割合はごく小さく、耐震壁でほぼ全ての水平力に抵抗している。



(a) 浮上がり許容



(b) 基礎固定

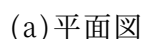
図11 負担水平力－全体変形角関係

d) 付帯骨組付き耐震壁に関する実験及び解析のまとめ

- 正負両方向ともに基礎梁東側端部に曲げひび割れが発生し、次いで引張側耐震壁基礎部に浮上りが生じ、試験体の剛性が大きく低下した。その後、フレーム部材材端で曲げ降伏が始まり、全ての梁部材材端と柱脚が曲げ降伏すると、試験体の水平荷重は頭打ちとなった。基礎部が浮上るまでは水平せん断力の大部分を耐震壁が負担しているため付帯フレームの有無に関わらず、初期剛性及びひび割れ発生荷重に関しては正、負両方向ともに同程度の値を示した。基礎部浮上り後には、付帯骨組の影響が現れ、正方向と負方向における水平力抵抗力に違いが見られた。また、耐震壁は剛体回転を始め、変形は付帯骨組に集中した。そこで、耐震壁に損傷はほとんど生じなかった。
- 履歴ループから等価粘性減衰定数の算定を行った。浮上りを許容すれば 10%以下、基礎を固定すれば 10%以上の値を得た。基礎の浮上る場合には、耐震壁がエネルギー消費を行わなくなるためである。
- 浮上りを許容すれば、荷重漸増解析結果は実験値を下まわったが、基礎固定では解析値が実験値を上回った。また、ひび割れ発生順序、塑性ヒンジ形成順序について比較したところ、ひび割れ発生に関しては精度を欠いたものの、塑性ヒンジの形成に関しては精度良く予測できたことから、基礎部の浮上りや部材の塑性化に伴う応力の再分配等のメカニズムを適確にとらえることができたと考えられる。
- 解析により、基礎が浮上る場合の付帯骨組 1 階柱と耐震壁 1 階部分の負担水平力の推移を追うことで水平力抵抗機構の変化を明らかにした。基礎部に浮上りが生じるまでは、水平力の大部分は耐震壁が負担する。また、基礎部に浮上りが発生し耐震壁が剛体回転を始めると、耐震壁の水平力負担率は徐々に減少し、付帯骨組における水平力負担率が増加した。付帯骨組の負担水平力が増加し、付帯骨組梁端に塑性ヒンジが形成されると、さらに付帯骨組は水平力を負担し、耐震壁の負担水平力は減少した。

E-Defense における RC 構造物の動的試験では、既存の 3 分力計を耐震壁下部の基礎下に設置し、作用する応力を測定した。そこで、既存の 8 個のロードセルに対して校正係数の検定を行った。

三分力荷重計の寸法を図に示す。表に、今回検定を行った 8 体の試験体 (No.1~No.8) の校正係数を示す。



(b) 断面図

(c)全体図

図 12 ロードセルの寸法

表5 検査成績書に示されたロードセルの校正係数

方向		No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7
X	(+)	0.395	0.377	0.400	0.430	0.377	0.487	0.461
	(-)	0.420	0.350	0.363	0.418	0.472	0.379	0.395
Y	(+)	0.464	0.344	0.399	0.452	0.467	0.463	0.457
	(-)	0.445	0.322	0.365	0.446	0.376	0.357	0.396
Z	(+)	2.30	2.06	2.07	2.43	2.23	2.12	2.33
	(-)	2.30	2.06	2.07	2.43	2.23	2.12	2.33

図に載荷装置を、図にロードセル設置状況を示す。載荷は、2 方向水平力（X 及び Y）と軸力（Z）を作用させた。3 分力計に軸力、せん断力、モーメントが任意の組合わせで作用できるようになっている。軸力に関しては P- Δ 効果を考慮し、水平力は軸力の P- Δ 効果による水平成分と、2 本の水平ジャッキの水平成分の和として考慮した。図に載荷状況を示す。

載荷条件は、次の3ケースを基本とした。

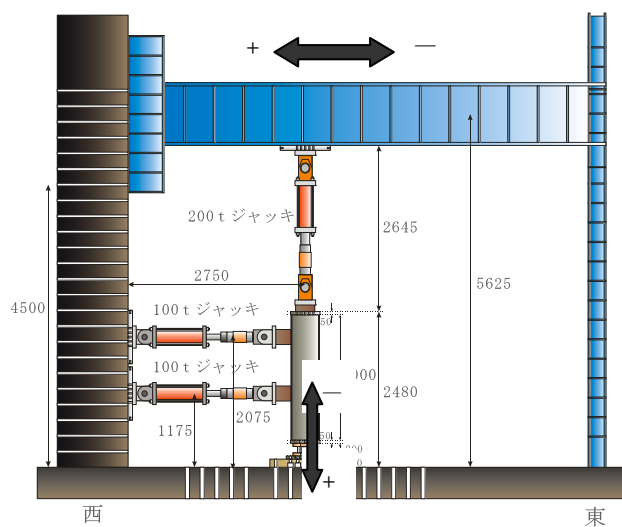
- 1) 鉛直軸力と Y 方向せん断力及びモーメントを固定し、X 方向せん断力を変化させる。
X 方向せん断力は、 $-200 \text{ kN} \sim 200 \text{ kN}$ の範囲で変化させ、測定は 100 kN ごとに行う。
- 2) 鉛直軸力と X 方向せん断力及びモーメントを固定し、Y 方向せん断力を変化させる。
Y 方向せん断力は、 $-100 \text{ kN} \sim 100 \text{ kN}$ の範囲で変化させ、測定は 50 kN ごとに行う。
- 3) 2 方向せん断力及びモーメントを固定し、軸力を変化させる。軸力は $0 \text{ kN} \sim 400 \text{ kN}$ の範囲で変化させ、測定は 200 kN ごとに行う。

ただし、時間的な制約から実際に実施した载荷パターンは、表に示すもののみである。
3 分力計に作用するモーメントは、3 分力計上面の中央における計算値を用いた。鉛直力は式 (1)、水平力は式 (2)、モーメントは式 (3) により計算した。

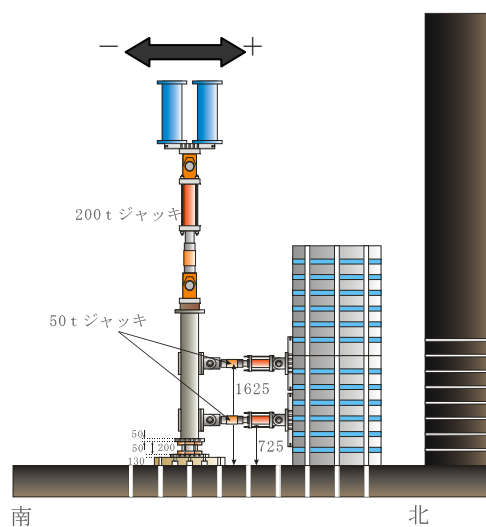
$$N = P_1 \cos \alpha \quad (1)$$

$$Q = P_1 \sin \alpha + P_2 + P_3 \quad (2)$$

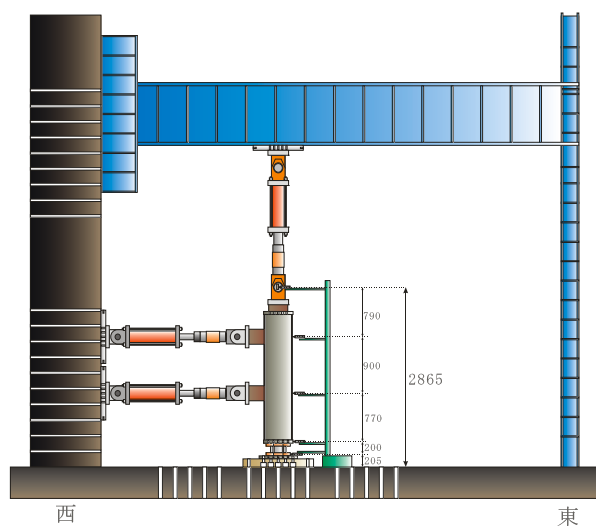
$$M = P_1 \cos \alpha D_n + P_1 \sin \alpha h_1 + P_2 h_2 + P_3 h_3 \quad (3)$$



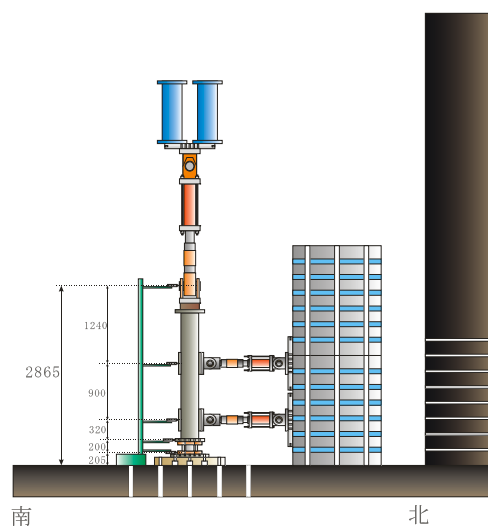
(a) 東西方向立面図



(b) 南北方向立面図

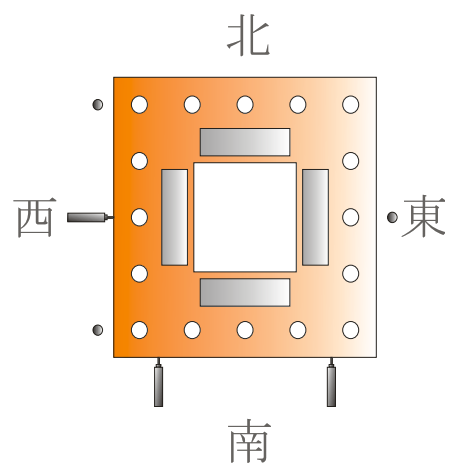


(c) 変位計設置状況－東西方向立面図



(d) 変位計設置状況－南北方向立面図

図 13 载荷装置



(e) ロードセルの変位計設置状況
—平面図

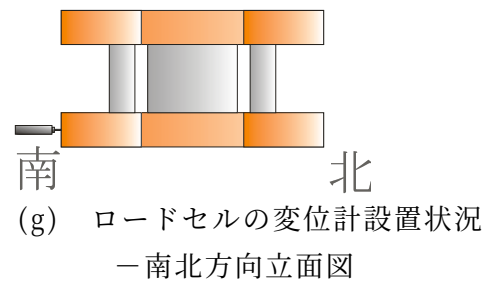
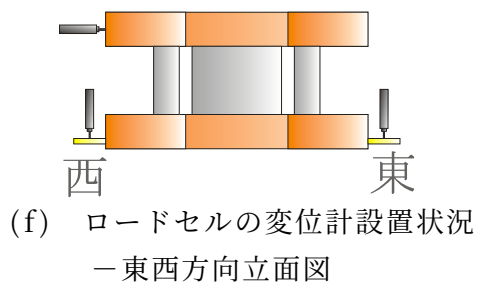


図 14 ロードセル設置状況



図 15 载荷状況

表6 3分力計の検定作業に用いた荷重の組み合わせ

(a) **Mx=0 My=0 (kNm)**

Fy変動

Fx\Fz	-200	0	200
-200	○	○	○
0	○	○	○
200	○	○	○

Fx変動

Fy\Fz	-200	0	200
-100	○	○	○
0	○	○	○
100	○	○	○

(b) **Mx=0 My=50 (kNm)**

Fy変動

Fx\Fz	-200	0	200
-200	×	×	×
0	×	○	◆
200	×	◆	×

Fx変動

Fy\Fz	-200	0	200
-100	×	×	×
0	×	○	◆
100	×	◆	×

(c) **Mx=50 My=0 (kNm)**

Fy変動

Fx\Fz	-200	0	200
-200	×	×	×
0	×	○	×
200	×	×	×

Fx変動

Fy\Fz	-200	0	200
-100	×	×	×
0	×	○	×
100	×	×	×

(d) **Mx=0 My=0 (kNm)**

Fz変動

Fx\Fy	-100	0	100
-200	×	×	×
0	×	△	×
200	×	×	×

Mx=50 My=0 (kNm)

Fz変動

Fx\Fy	-100	0	100
-200	×	×	×
0	×	○	×
200	×	×	×

(e) **Mx=0 My=50 (kNm)**

Fz変動

Fx\Fy	-100	0	100
-200	×	×	×
0	×	▲	×
200	×	×	×

(単位：kN)

(○は実施、×は実施していない。また、△は No.3、No.4、No.5、No.6 に対して実施、▲は No.1、No.2、No.5、No.7、No.8 に対して実施、◆は試験体 No.5 に対してのみ実施した。)

ただし、 P_1 = 鉛直ジャッキの荷重、 P_2 = 上側水平ジャッキの荷重、 P_3 = 下側水平ジャッキの荷重、 α = 鉛直ジャッキの傾斜角、 D_n = 鉛直ジャッキクレビス位置での水平変位、 h_1 = ロードセル上面から鉛直ジャッキクレビスピン中央までの距離、 h_2 = ロードセル上面から上側ジャッキ中央までの距離、 h_3 = ロードセル上面から上側ジャッキ中央までの距離である。

d) 実験結果

i) モーメントが作用しない場合

モーメントを 0 にして、水平せん断力 Q_x を変動させ、 Q_y もしくは Q_z のみを作用させた場合の実験結果を、図 16 から図 18 に示す。また、モーメントを 0 にして、水平せん断力 Q_x を変動させ、 Q_y と Q_z の両方を作用させた場合の実験結果を、図 19～図 21 に示す。図 16、図 19 は、作用せん断力と同方向の測定結果、図 17、図 20 は作用せん断力と直行する水平方向の測定結果、図 18、図 21 は鉛直方向の測定結果である。いずれも、縦軸が式(1)から(3)までによる作用応力を示し、横軸がロードセルによる出力値を示す。ただし、ロードセルによる出力値は表に与えられた校正係数を使用した。凡例に示す◆や×などのマークは測定点を示し、同様の载荷条件であればこれを同一の線で結んでいる。

試験体 No.2 を除いて、線形性が認められる。しかし、軸力やもう一方の水平せん断力の影響をうけて作用力が 0 にも関わらず出力値が 0 とならない、原点シフトが観察される。このため、誤差が±5%に収まっていない。図 17、図 20 では特に、軸力が大きくなると干渉のため、3 分力計出力値の誤差が大きくなる傾向がある。図 18、図 21 では、他の場合に比較して安定して高精度の出力が得られている。

また、固定作用力が 1 方向の場合と 2 方向の場合を比較してみると、2 方向の場合の方が干渉を受けて、誤差が 1 方向の場合よりも大きくなっている。

ここで、最も干渉が少ないと考えられるモーメントが 0、軸力が 0、他方向水平力が 0 の場合の干渉度を表 7 に示す。表 7 では、干渉度はいずれの場合も約 5%を上回らないとの結果が示されている。しかし、試験体 No.2 の X 正方向で 70.0%、X 負方向では 215%と干渉度が大きく、他の場合も無視できない大きさの干渉が生じている。

ii) モーメントが作用した場合の結果

3 分力計に 50kNm と比較的小さなモーメントが作用した場合の検定を行った。このとき、変動させる方向の荷重以外は 0 に固定し、1 方向作用力とモーメントのみが作用するようにした。モーメントが作用しない場合と同様の表示方法で、実験結果を図 22 から図 24 に示す。図 22(a)から分かるように、試験体 No.2(X 方向)の負方向は、モーメントが作用しない場合以上に大きな非線形性が認められる。また、図 22 のその他の図では、モーメントが作用しない場合と同様に、原点シフトが生じており、直線部分の傾きも 45 度と離れている。図 23 は、モーメントが作用しない場合と同様に、干渉度が大きい。また、図 24 ではモーメントが作用すると軸力の精度も落ちている様子が見て取れる。

iii) 繰り返し载荷及び試験体を再設置した場合の結果

繰り返し载荷及び試験体を再設置した場合の検定結果を図 25 に示す。この場合の検定は試験体 No.5 においてのみ行った。図 25 (a)から分かるように、試験体 No.5(X 方向)の正方向は、ほぼ同一の直線上に出力されたが、負方向に関しては直線の傾きもずれており、誤差が大きくなっていた。また、せん断力作用方向と直交する成分と鉛直成分に関しては、試験体を再設置した場合の結果の誤差が大きかった。

iv) 2 方向作用力とモーメントが作用した場合の結果

試験体 No.5 に関してのみ、1 方向作用力とモーメントを固定し、水平せん断力を変動さ

せた場合の実験結果を図 26 に示す。図 26 から分かるように、モーメントと 1 方向作用力のみが作用する場合よりも X、Y、Z の各成分全てにおいて、誤差が大きくなっている。

v) 仕様書に記述された校正係数を用いた場合のまとめ

モーメントが抑えられていれば、軸力の出力精度は高く、せん断力による干渉度も仕様書の値 5% にほぼ収まっている。しかし、水平 2 方向の相互干渉度は大きく、軸力が 0 の場合でも、無視するには大きすぎる値を示した。モーメントが作用すると、状況はさらに悪くなる。また、個体差が大きく、誤差がかなり大きかった。

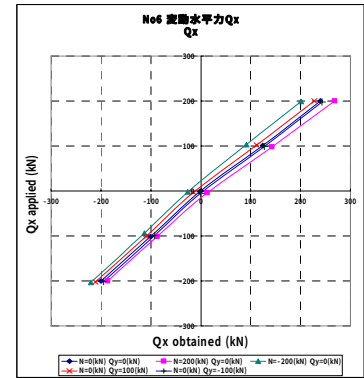
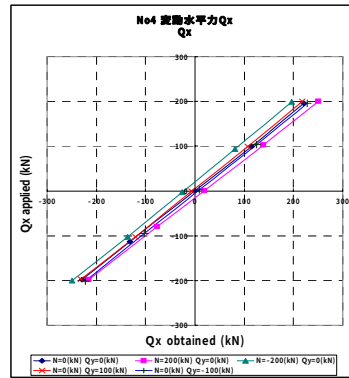
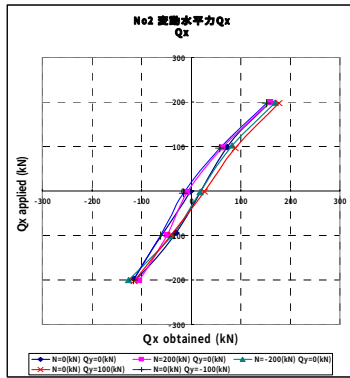
e) 3 分力計の校正係数の再検討

仕様書に記述された校正係数を用いるだけでは、正しい出力結果を得られないことが分かった。そこで、出力結果の精度向上を目的として、3 つの歪出力に 6 つの変形出力を加え、校正係数の再検討を行った。

i) 検討した校正係数の構成

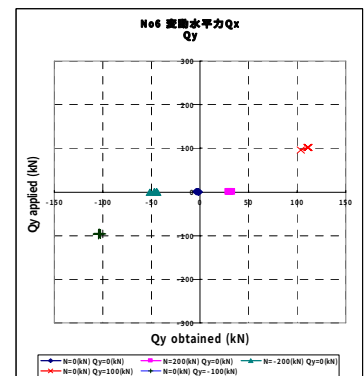
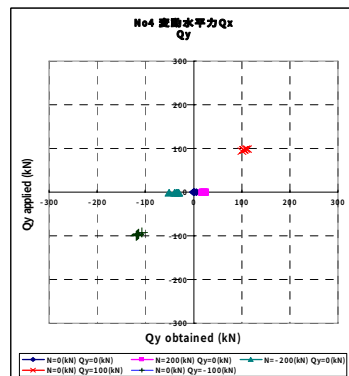
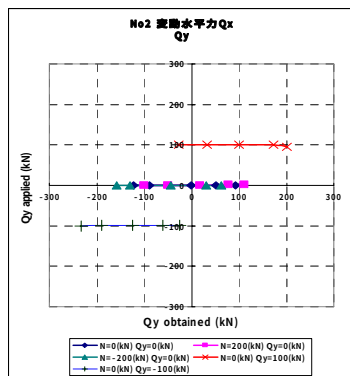
3 分力計から出力される 3 つのひずみと、外部に設置した変位計から得られる 6 つの変位の計 9 個の出力要素と、 Q_x 、 Q_y 、 Q_z の 3 方向の作用力を用いて式(4)に示す 3×9 の行列を求める。ここで、6 つの変位とは鉛直変位 3 つと、水平変位 3 つであり、各名称は図 27 に示す通りである。

$$\begin{Bmatrix} Q_x \\ Q_y \\ Q_z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} & a_{17} & a_{18} & a_{19} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} & a_{26} & a_{27} & a_{28} & a_{29} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} & a_{36} & a_{37} & a_{38} & a_{39} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} V_E \\ V_{WN} \\ V_{WS} \\ H_X \\ H_{YE} \\ H_{YW} \\ \varepsilon_X \\ \varepsilon_Y \\ \varepsilon_Z \end{pmatrix} \quad (4)$$



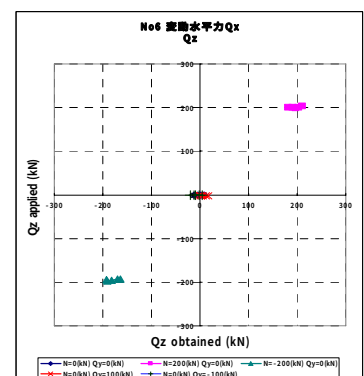
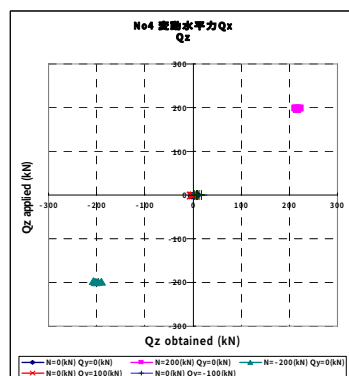
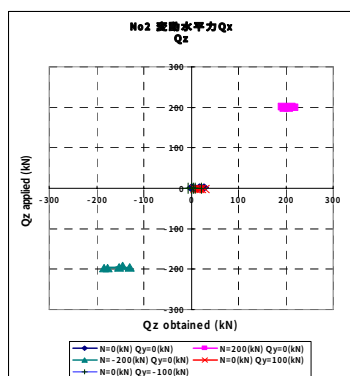
(a) 試験体 No.2-X 方向 (b) 試験体 No.4-X 方向 (c) 試験体 No.6-X 方向

図 16 変動力： Q_x 、0 に固定されていない力が 1 方向の場合のせん断力作用方向における精度（モーメント=0）



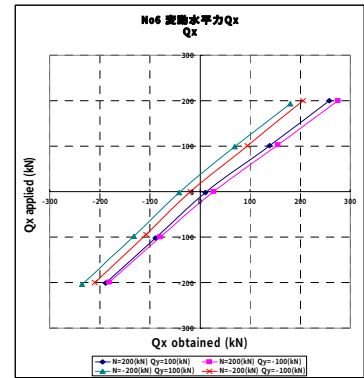
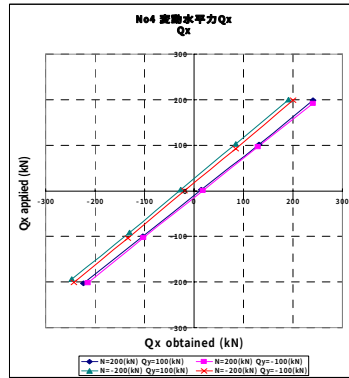
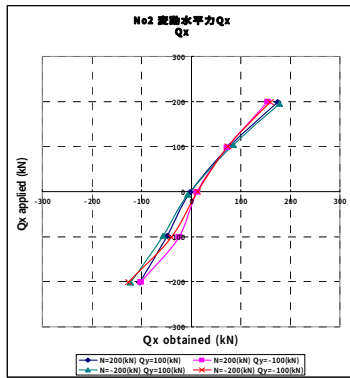
(a) 試験体 No.2-Y 方向 (b) 試験体 No.4-Y 方向 (c) 試験体 No.6-Y 方向

図 17 変動力： Q_x 、0 に固定されていない力が 1 方向の場合のせん断力作用方向と直交する水平軸における測定（モーメント=0）



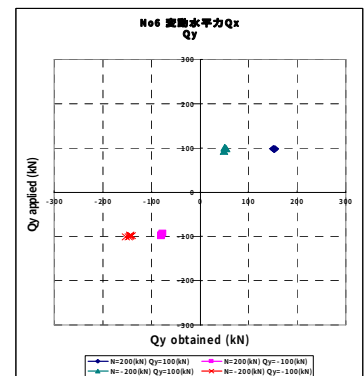
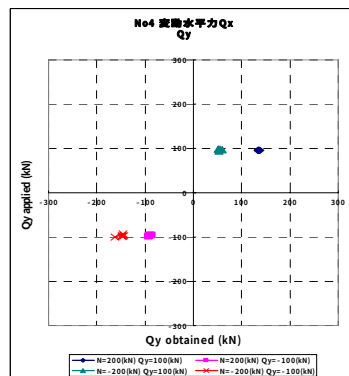
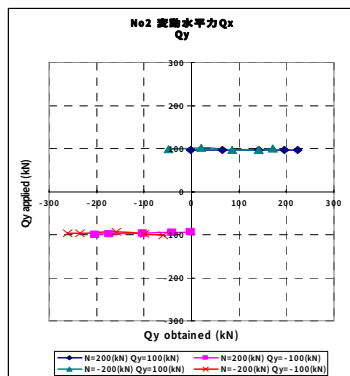
(a) 試験体 No.2-Z 方向 (b) 試験体 No.4-Z 方向 (c) 試験体 No.6-Z 方向

図 18 変動力： Q_x 、0 に固定されていない力が 1 方向の場合の鉛直方向における精度（モーメント=0）



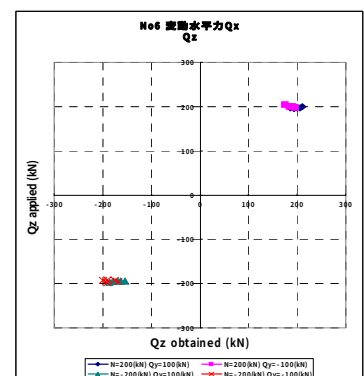
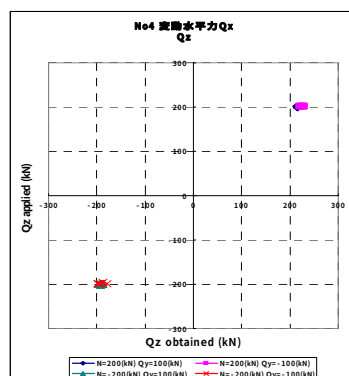
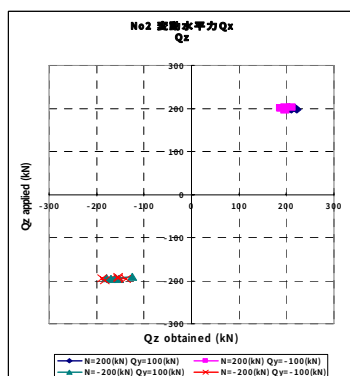
(a) 試験体 No.2-X 方向 (b) 試験体 No.4-X 方向 (c) 試験体 No.6-X 方向

図 19 変動力： Q_x 、0 に固定されていない力が 2 方向の場合のせん断力作用方向における精度（モーメント=0）



(a) 試験体 No.2-Y 方向 (b) 試験体 No.4-Y 方向 (c) 試験体 No.6-Y 方向

図 20 変動力： Q_x 、0 に固定されていない力が 2 方向の場合のせん断力作用方向と直交する水平軸における測定（モーメント=0）



(a) 試験体 No.2-Z 方向 (b) 試験体 No.4-Z 方向 (c) 試験体 No.6-Z 方向

図 21 変動力： Q_x 、0 に固定されていない力が 2 方向の場合の鉛直方向における精度（モーメント=0）

表7 軸力、1方向水平せん断力およびモーメントを0とした場合の干渉度

(a) 試験体 No.2

Qx (kN)	X方向 ϵ (μ)	Y方向干渉 ϵ (μ)	Z方向干渉 ϵ (μ)
0	0	0	0
100	192	147	0
200	425	270	4

干渉度 $\frac{Y}{Z} = \frac{70.0}{0.5} \%$

$\frac{Z}{Z} = \frac{0.5}{0.5} \%$

Ex.70.0=Ave (147/192、270/405)

Qx (kN)	X方向 ϵ (μ)	Y方向干渉 ϵ (μ)	Z方向干渉 ϵ (μ)
0	0	0	0
-100	-87	-274	9
-200	-330	-382	13

干渉度 $\frac{Y}{Z} = \frac{215.4}{7.1} \%$

$\frac{Z}{Z} = \frac{7.1}{7.1} \%$

Qy (kN)	Y方向 ϵ (μ)	X方向干渉 ϵ (μ)	Z方向干渉 ϵ (μ)
0	0	0	0
50	123	14	7
100	299	27	8

干渉度 $\frac{X}{Z} = \frac{10.2}{4.2} \%$

$\frac{Z}{Z} = \frac{4.2}{4.2} \%$

Qy (kN)	Y方向 ϵ (μ)	X方向干渉 ϵ (μ)	Z方向干渉 ϵ (μ)
0	0	0	0
-50	-241	-6	4
-100	-374	-13	-1

干渉度 $\frac{X}{Z} = \frac{3.0}{1.0} \%$

$\frac{Z}{Z} = \frac{1.0}{1.0} \%$

(b) 試験体 No.4

Qx (kN)	X方向 ϵ (μ)	Y方向干渉 ϵ (μ)	Z方向干渉 ϵ (μ)
0	0	0	0
100	268	3	0
200	515	12	-1

干渉度 $\frac{Y}{Z} = \frac{1.7}{0.1} \%$

$\frac{Z}{Z} = \frac{0.1}{0.1} \%$

Qx (kN)	X方向 ϵ (μ)	Y方向干渉 ϵ (μ)	Z方向干渉 ϵ (μ)
0	0	0	0
-100	-315	2	2
-200	-547	3	4

干渉度 $\frac{Y}{Z} = \frac{0.6}{0.7} \%$

$\frac{Z}{Z} = \frac{0.7}{0.7} \%$

Qy (kN)	Y方向 ϵ (μ)	X方向干渉 ϵ (μ)	Z方向干渉 ϵ (μ)
0	0	0	0
50	114	3	-2
100	240	0	-3

干渉度 $\frac{X}{Z} = \frac{1.3}{1.5} \%$

$\frac{Z}{Z} = \frac{1.5}{1.5} \%$

Qy (kN)	Y方向 ϵ (μ)	X方向干渉 ϵ (μ)	Z方向干渉 ϵ (μ)
0	0	0	0
-50	-143	11	4
-100	-273	19	4

干渉度 $\frac{X}{Z} = \frac{7.3}{2.1} \%$

$\frac{Z}{Z} = \frac{2.1}{2.1} \%$

(c) 試験体 No.6

Qx (kN)	X方向 ϵ (μ)	Y方向干渉 ϵ (μ)	Z方向干渉 ϵ (μ)
0	0	0	0
100	254	-9	3
200	493	-10	4

Z 1.0 %

干渉度 Y 1.1 %

Z 0.9 %

Qx (kN)	X方向 ϵ (μ)	Y方向干渉 ϵ (μ)	Z方向干渉 ϵ (μ)
0	0	0	0
-100	-265	-4	-2
-200	-527	-4	-6

干渉度 X 9.4 %

Z 0.6 %

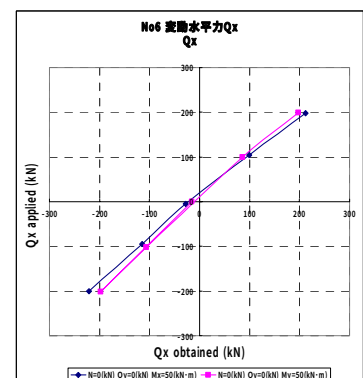
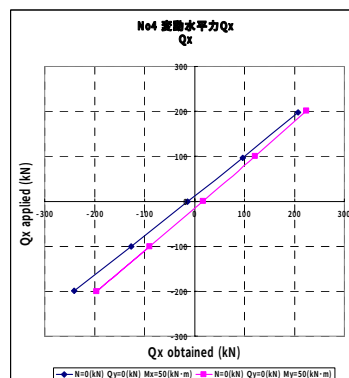
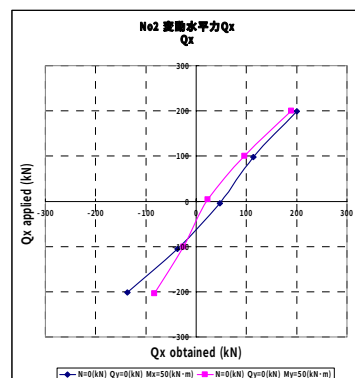
Qy (kN)	Y方向 ϵ (μ)	X方向干渉 ϵ (μ)	Z方向干渉 ϵ (μ)
0	0	0	0
50	121	-13	1
100	251	-20	1

干渉度 X 1.4 %

Z 0.8 %

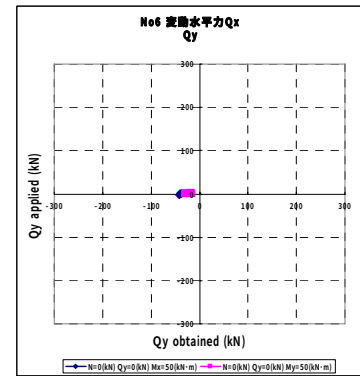
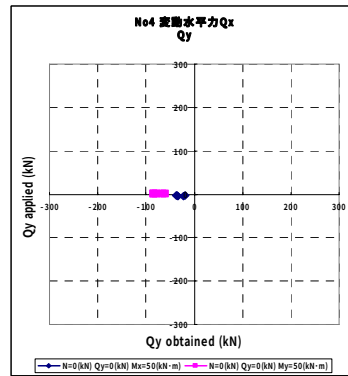
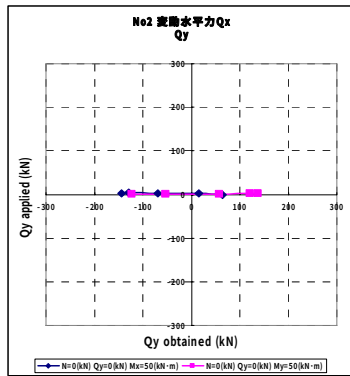
Qy (kN)	Y方向 ϵ (μ)	X方向干渉 ϵ (μ)	Z方向干渉 ϵ (μ)
0	0	0	0
-50	-153	0	-1
-100	-289	8	-3

干渉度 Y 2.8 %

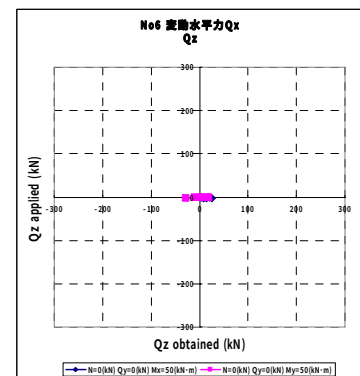
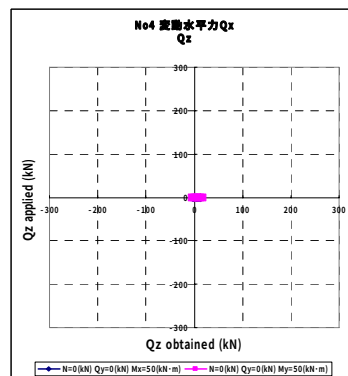
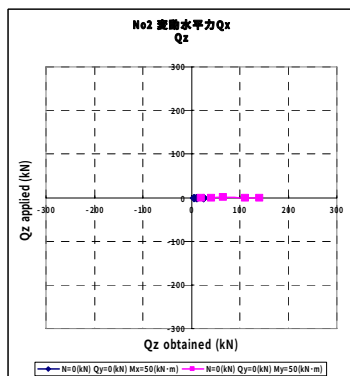


(a) 試験体 No.2-X 方向 (b) 試験体 No.4-X 方向 (c) 試験体 No.6-X 方向

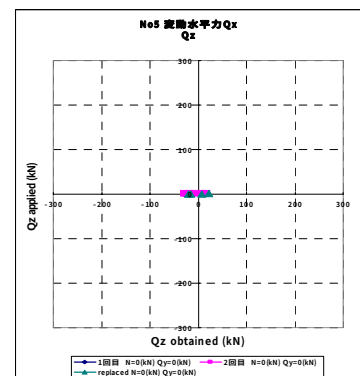
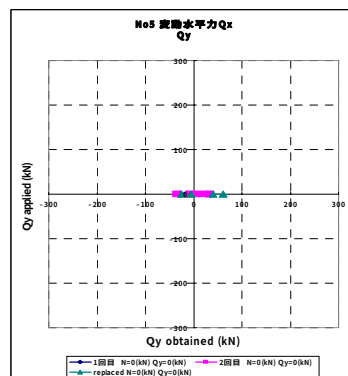
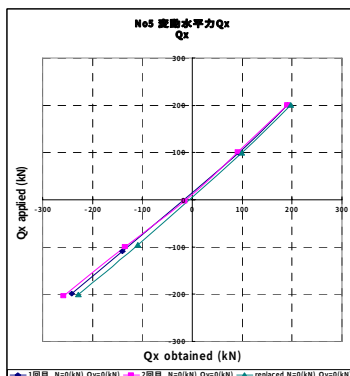
図 22 変動力: Qx セン断力作用方向における精度 (モーメント ≠ 0)



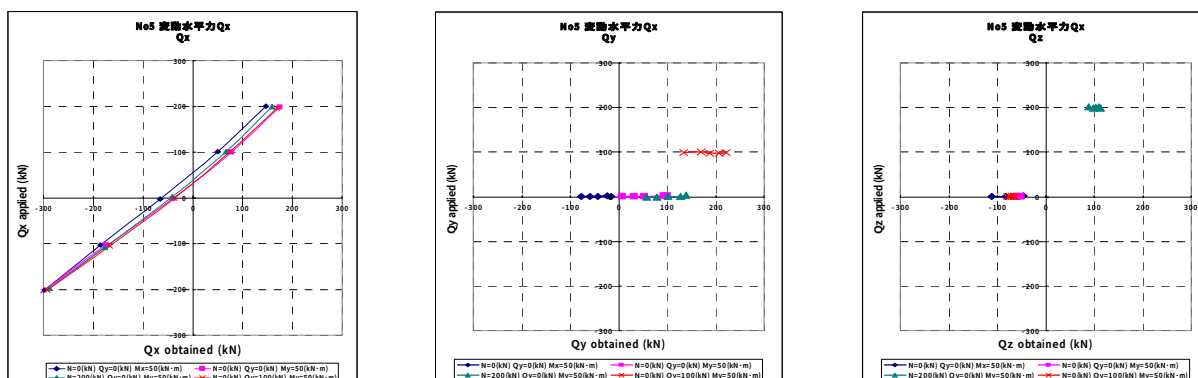
(a) 試験体 No.2-X 方向 (b) 試験体 No.4-X 方向 (c) 試験体 No.6-X 方向
図 23 変動力: Q_x せん断力作用方向と直交する水平軸における測定 (モーメント $\neq 0$)



(a) 試験体 No.2-X 方向 (b) 試験体 No.4-X 方向 (c) 試験体 No.6-X 方向
図 24 変動力: Q_x 鉛直方向における精度 (モーメント $\neq 0$)



(a) 試験体 No.5-X 方向 (b) 試験体 No.5-Y 方向 (c) 試験体 No.5-Z 方向
図 25 変動力: Q_x 繰り返し载荷及び試験体を再設置した場合の精度 (モーメント $= 0$)



(a) 試験体 No.5-X 方向 (b) 試験体 No.5-Y 方向 (c) 試験体 No.5-Z 方向
図 26 変動力: Q_x モーメントと 2 方向から 0 でない荷重が作用した場合の精度 (モーメント $\neq 0$)

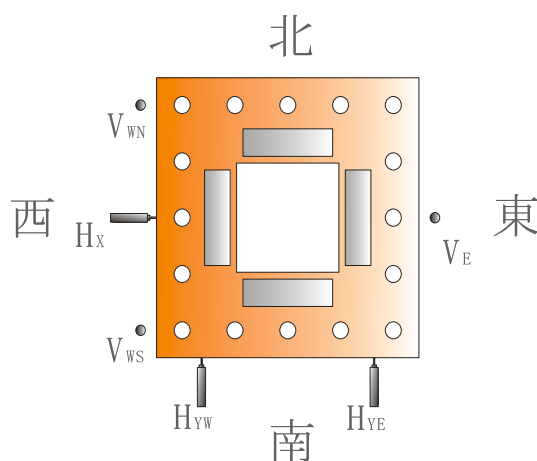
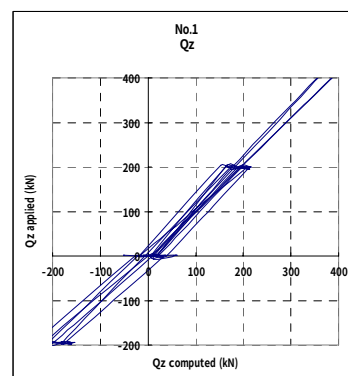
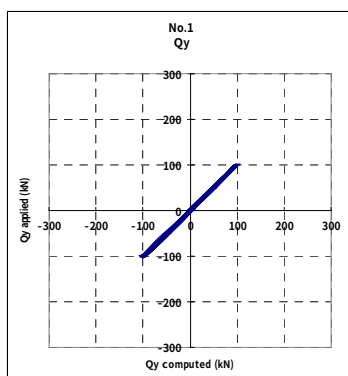
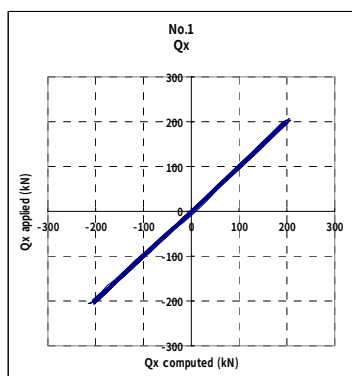


図 27 3 分力計に設置した変位計名称

ii) 3 行 9 列の校正行列を用いた場合の検定結果

回帰分析により求めた行列を用いて Q_x , Q_y , Q_z を計算した。その結果を図 28 から図 30 に示す。いずれも、縦軸が式(1)から(3)までによる作用応力を示し、横軸が回帰分析によって求めた計算値を示す。計算には今回の検定で測定した全ての測定点を用いており、図は全ての点を直線で結んだものである。図 28(c)の試験体 No.1 Z 方向と図 30(c)の試験体 No.5 Z 方向を除く全ての試験体において精度が向上しており、仕様書に示された 3 つの校正係数を用いた場合よりも誤差は小さくなっている。図 29 からは、試験体 No.4 は非常に高精度となったことが分かる。

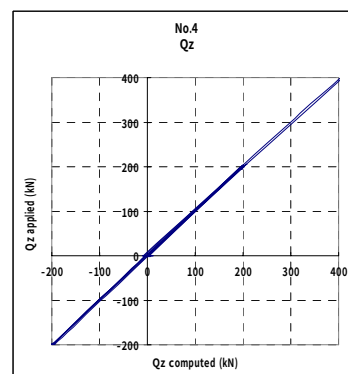
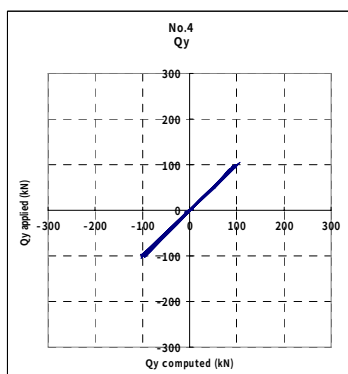
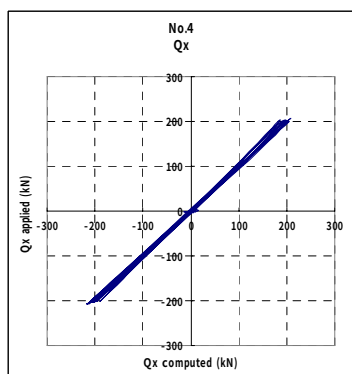


(a) 試験体 No.1-X 方向
相関係数 $R=0.999641$

(b) 試験体 No.1-Y 方向
相関係数 $R=0.998090$

(c) 試験体 No.1-Z 方向
相関係数 $R=0.988659$

図 28 回帰分析を用いた場合の試験体 No.1 の精度

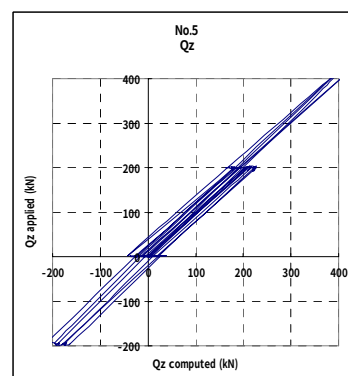
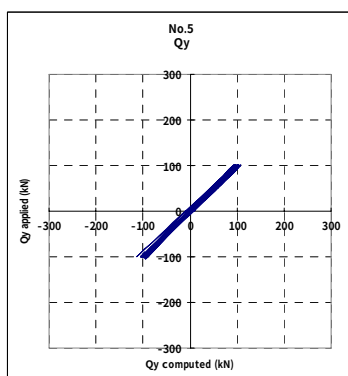
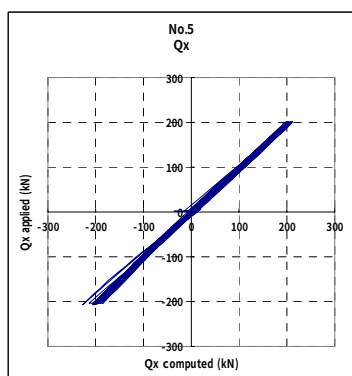


(a) 試験体 No.4-X 方向
相関係数 $R=0.999296$

(b) 試験体 No.4-Y 方向
相関係数 $R=0.999275$

(c) 試験体 No.4-Z 方向
相関係数 $R=0.999792$

図 29 回帰分析を用いた場合の試験体 No.4 の精度



(a) 試験体 No.5-X 方向
相関係数 $R=0.998104$

(b) 試験体 No.5-Y 方向
相関係数 $R=0.997235$

(c) 試験体 No.5-Z 方向
相関係数 $R=0.992366$

図 30 回帰分析を用いた場合の試験体 No.5 の精度

f) 3分力計検定のまとめ

3分力計に作用するモーメントが抑えられていれば、仕様書に与えられた3つのみの校正係数を用いた場合でも、軸力の精度は高く、せん断力による干渉度も仕様書の値5%にほぼ収まっていた。しかし、水平2方向の相互干渉度は大きく、軸力が0の場合でも、無視するには大きすぎる値を示した。また、モーメントが作用すると状況はさらに悪くなること、個体差が大きく誤差がかなり大きいことが分かった。しかし、回帰分析により求めた3行9列の係数行列を用いれば、試験体 No.1 のZ方向と試験体 No.5 のZ方向以外は、全ての分力計において3方向の荷重を非常に精度良く予想できることを示した。

(d) 結論ならびに今後の課題

付帯骨組付連層耐震壁において基礎浮上りが生じた場合と基礎を反力床に緊結した場合の静的正負交番繰返し載荷実験を、40%寸法試験体を用いて行った。基礎浮上りを許容した場合は全体崩壊機構が形成された時点で一旦載荷を終了し、基礎を固定した後は反力壁のせん断滑り破壊まで加力した。実験では、損傷の進展状況と水平力に対する抵抗機構が基礎の浮上りによって変化する様子を把握した。また、実験で得られた水平力-全体変形角履歴曲線包絡線を骨組み解析プログラムで追跡したところ、基礎の浮上りがある場合は解析で得られた水平力は実験値を下回ったが、基礎を固定した場合は精度よく実験値を追跡できることを確認した。今後は、実験で得られた局所的な損傷状況を定量化する解析手法を提案する必要がある。

実物大振動台実験で用いた8個の3分力計の校正を行った。3分力計に作用するモーメントが抑えられていれば、仕様書に与えられた3つのみの校正係数を用いた場合でも、軸力の精度は高く、せん断力による干渉度も仕様書の値5%にほぼ収まっていた。しかし、水平2方向の相互干渉度は大きく、軸力が0の場合でも、無視するには大きすぎる値を示した。また、モーメントが作用すると状況はさらに悪くなること、個体差が大きく誤差がかなり大きいことが分かった。しかし、回帰分析により求めた3行9列の係数行列を用いれば、試験体 No.1 のZ方向と試験体 No.5 のZ方向以外は、全ての分力計において3方向の荷重を非常に精度良く予想できることを示した。ただし、1個の3分力計について9個の測定点数を用いることができない場合もあり、より少ないデータから正確な出力を得られる手法を提案する必要がある。

(d) 引用文献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説、1999年
- 2) 日本建築センター：中高層壁式ラーメン鉄筋コンクリート造設計施工指針・同解説、1999年
- 3) 日本建築センター：壁式鉄筋コンクリート造設計施工指針、1996年
- 4) 日本建築学会：壁式構造関係設計基準集・同解説（壁式鉄筋コンクリート造編）、1997年
- 5) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説—許容応力度設計法—、1999年
- 6) 日本建築学会：建築耐震設計における保有耐力と変形、1990年

7) プレハブ建築協会：プレキャスト建築技術集成 第二編 W-PC の設計、pp.183-184、256-257、2003 年 1 月

8) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の耐震性能評価指針（案）・同解説、2004 年

(e) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
Sakashita M., Bechtoula H., Kono S., Tanaka H., Watanabe F.	A study on the seismic force resisting mechanism of a multi-story shear wall system considering the interaction between wall, slab, foundation beam, and pile elements	13th World Conference on Earthquake Engineering	平成 16 年 8 月
ト部藍, 坂下雅信, 河野進, 田中仁史	RC 造連層耐震壁, 基礎梁, 杭の地震時相互作用を考慮した水平力抵抗機構の解明.	コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 27	2005 年 7 月
Kono S, Sakashita M, Tanaka H.	Seismic Force Resisting Mechanism of a Multi-Story Structural Wall Supported by Piles.	8th US National Conference on Earthquake Engineering	2006 年 4 月
ト部藍, 村上恭平, 坂下雅信, 河野進, 田中仁史, 渡邊史夫.	現場打ち一体型耐震壁及び PCa 耐震壁を用いた RC 造連層耐震壁, 基礎梁, 杭の地震時相互作用を考慮した水平力抵抗機構の解明.	日本建築学会大会学術講演梗概集構造系	2005 年 9 月
金尾伊織, 松田拓己, 河野進, 渡邊史夫, 荒金勝.	エネルギー消費能力を有するストランドの履歴特性.	日本建築学会近畿支部学術講演梗概集構造系	2006 年 6 月

(f) 特許出願, ソフトウェア開発, 仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 平成 18 年度業務計画案

実構造物に近い境界条件の下で付帯フレーム付き耐震壁の載荷実験を行い、各構造要素の損傷評価を行うと共に、2005 年に Eーディフェンス振動台実験用に防災科研が購入した大型 3 分力計の検定を行う。