

大鉄免震レトロフィット工法の開発 ～仮受け方法の性能検証と建築物の水平加力実験～

Development of DAITETSU Seismic Isolation Retrofit Method
- Performance Verification of Temporary Supporting Method and Horizontal Loading Test of Building -

吉田 康弘*1、今中 良彦*2、栗林 幹夫*3、江本 達哉*4

1. はじめに

近年、巨大地震の発生が危惧されており、様々な対策が必要とされている¹⁾。東日本大震災では、都市部などで交通網が麻痺するなど生活や事業活動に深刻な影響があり、災害時の機能維持の必要性が顕在化した²⁾。鉄道交通網を支える附帯施設等で耐震性が低い場合、機器類の移設には膨大な費用を伴うため移転は困難であり、災害時の継続使用を考慮した耐震化が急務である。

入力低減型の耐震改修工法³⁾である免震レトロフィット工法は、他工法と比較し耐震安全性が高く、改修工事中や改修後の使用性にも優れているため、歴史的建築物のほか災害拠点となる庁舎などで適用されており、重要機器等を収容した建築物にも適した工法である。この工法では既存の柱等を切断・撤去して免震装置を挿入するため、一時的に建物を支える仮受けが必要となり、その方法が耐震改修工事中の安全性確保に重要な位置付けとなる。更に上部を使用しながら工事を行うためには施工中の地震対策も重要となる。これらは大掛かりな仮設となるため鉄道の附帯施設など中小規模の建築物では免震階全面が工事エリアとなり、継続使用性が問題となる。機能維持のために分割施工とするには、仮受け方法が省スペースであり、かつ上部構造に有害な変形を与えない方法である必要がある。またこれを重要施設で信頼して使用するには、実験や実地による検証が不可欠である。

このような背景から、筆者らは狭隘な建築物でも分割施工での免震化を実現するために、省スペースかつ変位制御が可能な仮受け方法の特徴とする大鉄免震レトロフ

ット工法を開発した。本報ではその概要および実大実験による性能検証、実建築物を用いた試験施工での検証結果について報告する。

更に維持管理の観点から、試験施工対象建築物を用いて水平加力実験を行ったので、その結果についても報告する。

2. 仮受け方法の概要

2.1 仮受け部材

本報で提案する仮受け方法は、中間階免震を対象とし、上部建物重量である鉛直荷重と工事中に生じる地震力等

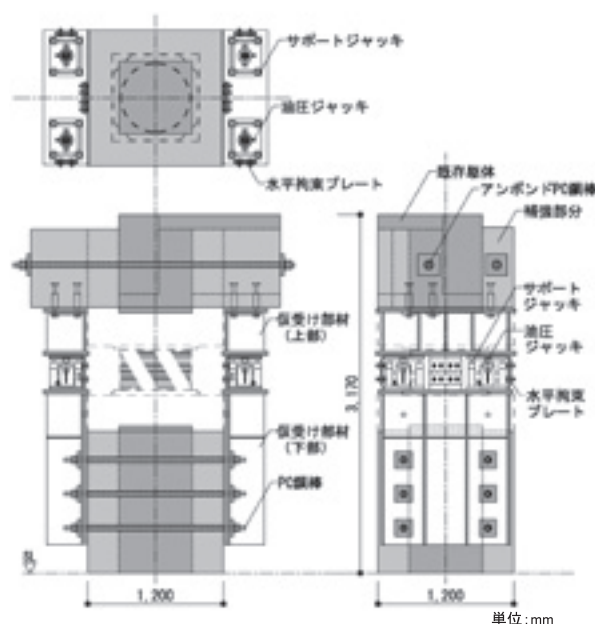


図-1 仮受け部材概要図

*1 YOSHIDA Yasuhiro：大鉄工業株式会社 建築本部設計部

*2 IMANAKA Yoshihiko：大鉄工業株式会社 建築本部建築部

*3 KURIBAYASHI Mikio：大鉄工業株式会社 建築本部設計部

*4 EMOTO Tatsuya：大鉄工業株式会社 建築本部

の水平荷重との両方を仮受け部材にて支持する方法である。施工中の地震対策を兼用しているため、一般に用いられる大ブレース等を不要とできることが本工法の大きな特徴である。提案する仮受け部材の概要を図-1に示す。免震層上下の躯体に鋼製の仮受け部材を各々取り付け、上下の仮受け部材と油圧ジャッキ、サポートジャッキ（ねじ式ジャッキ）、水平拘束プレートで連結する。躯体補強は工事完了後の免震装置からの反力及び水平変位量に応じた断面寸法の拡大として必要となるので、その補強躯体を仮受けにも利用する。上部仮受け部材は補強梁に打ち込んだアンカーにて固定し、下部は補強柱施工時に設置したシース管にPC鋼棒を通して固定する。下部は柱に直接荷重を伝達することで、躯体補強を削減しコストの縮減ができる。また上部は柱に固定しないことで、仕上りの免震ラインのレベルを可能な限り高く設定でき、免震層の使用性を向上できる。さらに仮受け部材の中間部に配置した油圧ジャッキとサポートジャッキで、荷重受け替え時の鉛直変位の調整を可能にしている。また水平拘束プレートで上下の仮受け部材をボルト接合し、施工中の地震対策としている。本仮受け部材を用いた免震改修工事では柱1本ずつでも施工可能であり、躯体補強の程度と使用性に応じた分割施工が可能となる。

本仮受け部材では、PC鋼棒での圧着接合を用いている。本工法では、後述するようにコンクリート-鉄および鉄-鉄と2種類の圧着面があり、特にこれらの摩擦係数に関する実験データが十分でないため、本工法の鉛直

荷重支持性能を検証するためには実験が必要となる。また本工法は、鉛直方向と水平方向の荷重を負担するために、鉛直荷重のみを支持するジャッキ部分にも水平力が入力され、損傷すると鉛直荷重を支持できなくなることが問題となる。これらの検証については第3章にて述べる。

2. 2 仮受け施工方法

施工方法の概要を図-2に示す。

- ①仕上げや壁等を撤去しスケルトンの状態にする。
- ②既存部材の柱や梁に鉄筋コンクリートの増打ちによる補強を行う。補強躯体には仮受け部材を取付けるためのアンカーやPC鋼棒を通すためのシース管など各種金物を打込んでおく。上部梁にはアンボンドPC鋼棒を打込み、既存躯体と補強躯体の一体化を図る。
- ③仮受け部材を設置し各躯体面との隙間には無収縮モルタルを圧入する。補強コンクリートおよび無収縮モルタルの強度発現後にPC鋼棒に緊張力を導入する。中間部に設置した油圧ジャッキに軸力を導入し、サポートジャッキのねじの固定と水平拘束プレートのボルト固定を行う。
- ④既存柱の負担軸力を仮受け部材を介して下部補強柱に伝達させた状態で、既存柱を切断・撤去する。
- ⑤撤去した部分に免震部材を設置する。ベースプレートの設置、下部免震基礎躯体の構築、アイソレーター設置の後、免震プレロードジャッキにて仮受け部材の負担軸力を免震部材に移行させる。その後、上部免震基

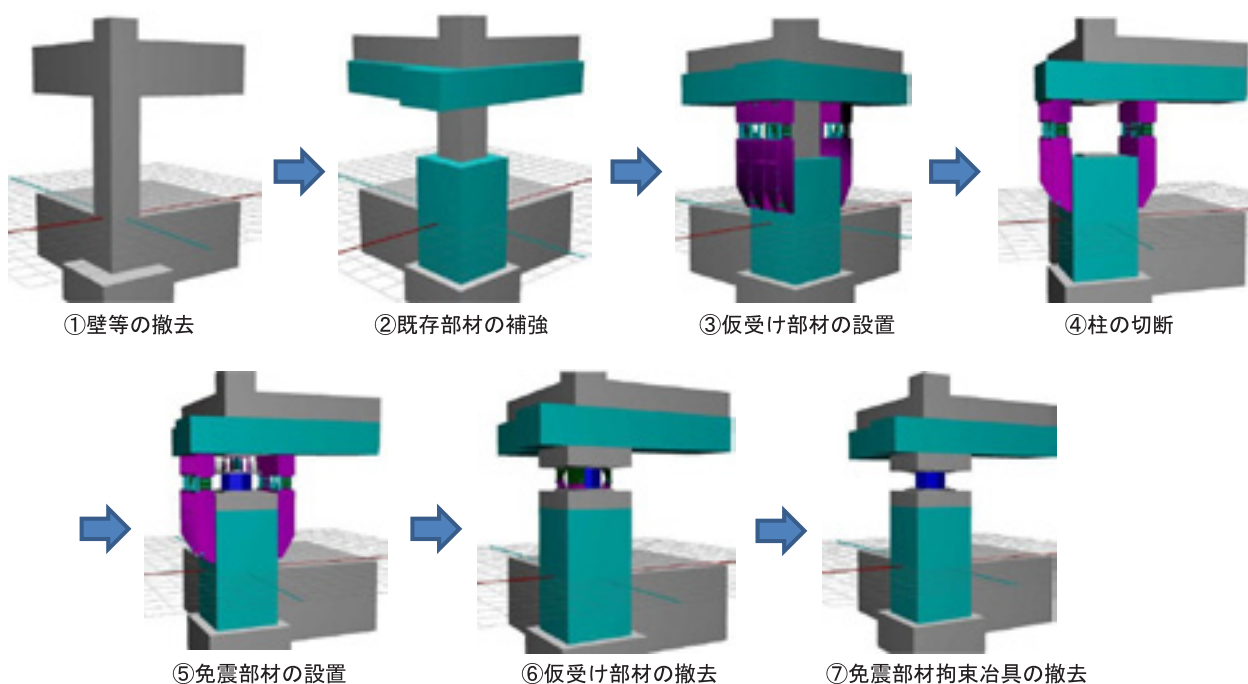


図-2 仮受け施工方法概要

礎の構築を行う。

⑥免震部材拘束治具を取付けた状態で仮受け部材を撤去する。

⑦建物の全ての免震部材設置が完了した後で拘束治具を一斉に撤去する。

上記の方法で施工することで、柱1本ずつでも施工可能となるが、荷重移行の際に上部構造に有害な変形を与えない制御が、実際に可能であるかが問題となる。この検証については第4章にて述べる。

3. 実大実験による性能検証

3.1 実験概要

仮受け部材の性能検証では、鉛直加力実験と水平加力実験の2つの実験を行った。鉛直加力実験ではPC鋼棒での圧着接合における鉛直荷重支持性能を検証するために、柱型に仮受け部材を圧着した実大の試験体を製作し、鉛直方向に荷重を加える実験を行った。水平加力実験では、水平荷重時の入力荷重と耐力を評価するために、サポートジャッキに鉛直荷重を載荷した状態で水平荷重を加える実験を行った。実験では鉄筋コンクリート造3階建の実在建築物を対象として荷重や各寸法等を設定した。

3.2 鉛直加力実験

3.2.1 試験体概要

試験体の概要を図-3に示す。試験体は、対象とした建築物に設定した弾性すべり支承のすべり面を上側に配置した柱を模擬したものであり、PC鋼棒によりRC柱の両側に鋼製の調整部材と仮受け部材を圧着したもの1体を製作した。調整部材は、RC柱と仮受け部材の間を広くするために用いるものであり、弾性すべり支承を設置する柱に必要な部材である。RC柱は、柱頭を切断

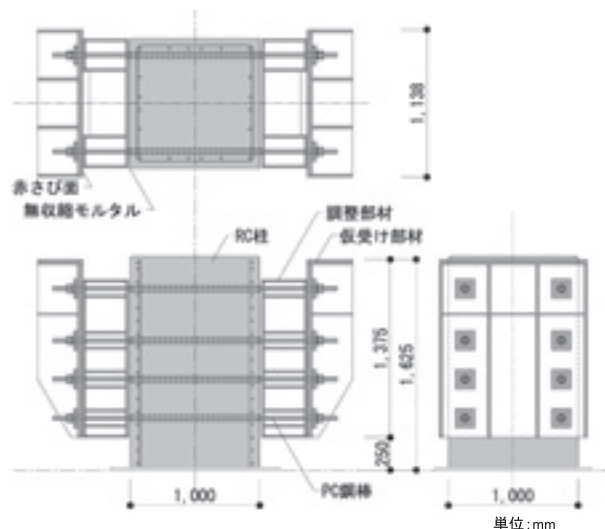


図-3 試験体の形状

した状態を模しており、既存柱の周囲に増打ちして断面を大きくした後の断面を想定している。仮受け部材と調整部材は、想定する長期軸力1740kNに対して各部材が長期許容応力度以下となるように断面設計したものである。RC柱と調整部材の間は無収縮モルタルをグラウトし、調整部材と仮受け部材の間は赤さび面とした。無収縮モルタルの強度発現後、仮受け部材とRC柱を貫通させた8本のPC鋼棒にプレストレスを導入し、圧着した。使用するPC鋼棒はφ32mmのC種1号であり、1本当りの許容緊張荷重は692kNである。全てのPC鋼棒は予め引張試験により引張力-ひずみ度関係を求めており、試験体の圧着では貼り付けたひずみゲージにより導入時および定着完了時の緊張荷重を確認した。

3.2.2 加力・計測方法

加力装置を図-4に示し、加力状況を写真-1に示す。試験体数は1体であるが、所定荷重3500kNに達してもすべりの発生あるいは耐力の低下が見られない場合、PC鋼棒の緊張力を変更して再度加力を行うこととした。結果として、同一試験体に対し計3回（Phase1～3）の加力を実施した（表-1）。加力は仮受け部材上部に鉄骨

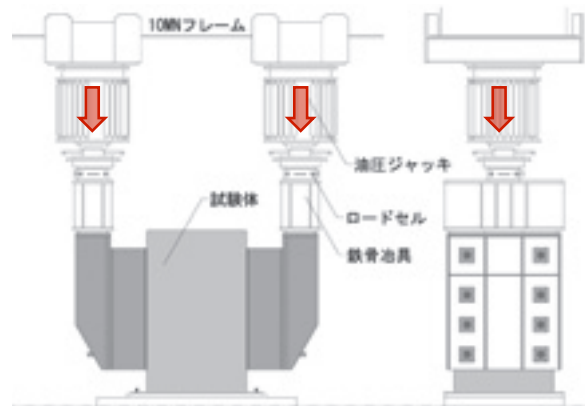


図-4 加力装置



写真-1 加力状況

表-1 PC 鋼棒の緊張力(加力開始時)

		Phase1		Phase2		Phase3	
		[kN]					
PE1	PW1	665	678	429	427	219	218
PE2	PW2	685	681	427	431	225	214
PE3	PW3	685	675	423	422	224	213
PE4	PW4	681	663	418	422	213	217
合計		5,413		3,399		1,743	

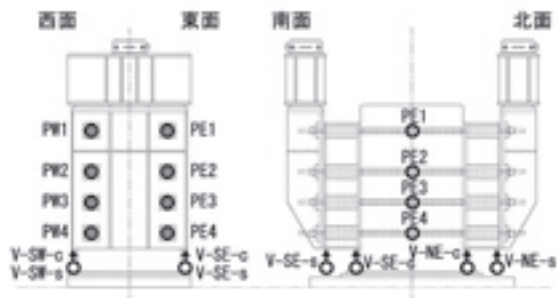


図-5 変位・ひずみ計測位置

治具を設置し、5000kNロードセルを介して2台の5000kN油圧ジャッキで鉛直荷重（圧縮力）を加える方法で行った。加力サイクルは、一方向漸増振幅繰返し載荷で行った。変位とひずみの各計測位置を図-5に示す。変位はRC柱との相対変位をそれぞれ計測し、仮受け部材の変位（V-SE-s等）は調整部材（V-SE-c等）との差を算出した。

3.2.3 試験結果

(1) 試験経過および荷重変位関係

Phase1およびPhase2では最大3500kNまで載荷しても柱と仮受け部材間のすべりや耐力の低下は見られなかった。Phase3では最大荷重2586.2kNで瞬間的に7.09mmのすべりが生じたため、加力を終了した。このときのすべりは片側（南面）の調整部材と仮受け部材との圧着面で生じた。荷重変位関係を図-6に示す。荷重は合計値を示し、変位は当該面の計測2点（V-SE-s、V-SW-s）の平均値を示す。この他にクラックや塑性化部位などは観察されなかった。

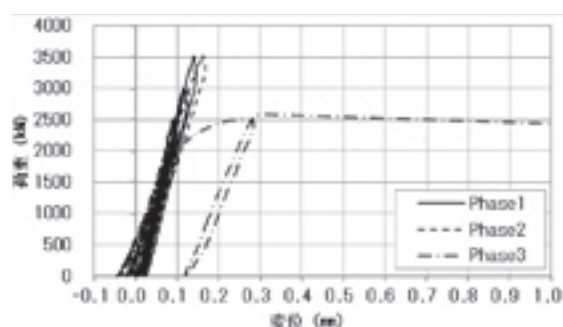


図-6 荷重変位関係(南面)

(2) PC鋼棒の緊張力の推移

最大荷重時のPC鋼棒の緊張力を表-2に示し、Phase1からPhase3までの緊張力の比率の推移を図-7に示す。緊張力の比率は各Phaseの最大荷重に至るまでの緊張力を、加力開始時の緊張力で除して求めた。上段のPC鋼棒（PE1、PW1）は、鉛直荷重の増大に伴い緊張力が增大しているのに対して、下段のPC鋼棒（PE4、PW4）では緊張力が減少している。PC鋼棒8本合計の緊張力は、鉛直荷重の最大時においてほとんど変化していない。

表-2 PC 鋼棒の緊張力(最大荷重時)

		Phase1		Phase2		Phase3	
		[kN]					
PE1	PW1	675	685	445	436	234	226
PE2	PW2	685	682	428	434	226	215
PE3	PW3	682	673	419	421	220	209
PE4	PW4	674	657	411	416	206	208
合計		5,413		3,410		1,744	

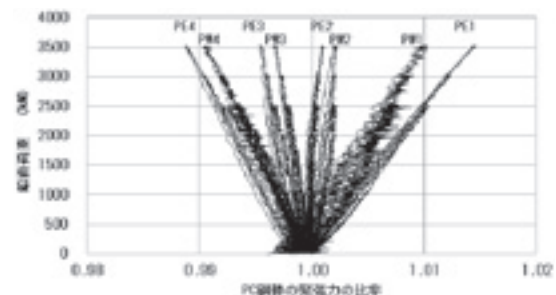


図-7 PC 鋼棒の緊張力の比率の推移(Phase1~3)

3.2.4 摩擦係数の算定

Phase3での最大鉛直荷重時における摩擦係数を式(1)にて計算すると、摩擦係数 μ は0.74であった。

$$\mu = \frac{P}{a \cdot n \cdot P_s} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、

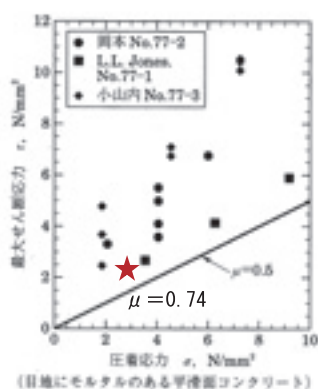
P : 最大鉛直荷重 (N)

a : 摩擦面数 (面) [$a=2$]

n : PC鋼棒の本数 (本) [$n=8$]

P_s : PC鋼棒の緊張力 (N)

PC規準⁴⁾では目地にモルタルのある平滑面コンクリートの摩擦係数を0.5としている。今回の設計でも摩擦係数を0.5として設計した。既往の1面せん断実験の結果を図-8に示す。本実験は目地にモルタルのあるコンクリート-鉄および鉄-鉄の圧着面を有する実験であり、結果的に鉄-鉄の面（赤さび面）ですべりが生じたが、その実験結果を同図にプロットした。PC規準で示された実験値のほぼ下限に対応したが、 $\mu=0.5$ は満足されていた。

図-8 圧着接合一面せん断実験結果⁴⁾

3.3 水平加力実験

3.3.1 試験体概要

試験体の一覧を表-3に示し、形状・寸法を図-9に示す。試験体No.1が実際に使用する状態であり、サポートジャッキ上部にPTFE板を2枚重ねて設置し、サポートジャッキに損傷を与える水平力が入力されないようにしたものである。試験体No.2～No.5は、サポートジャッキの耐力を把握するためにPTFE板を除いたものであり、No.2～No.4はX（弱軸）方向、No.5がY（強軸）方向に加力したものである。簡易固定は、試験体No.2で試験体と加力スタブとの間ですべりが発生したため、水平力によりサポートジャッキが最終破壊する状態を把握するために、加力スタブの打込み鉄板にねじ込んだボルトとサポートジャッキ上下のプレート間にくさびを入れて行ったものである。

表-3 試験体一覧

試験体	PTFE板	方向	簡易固定	鉛直荷重
No. 1	有	X	無	490 kN
No. 2	無	X	無	
No. 3			有	
No. 4				
No. 5		Y		

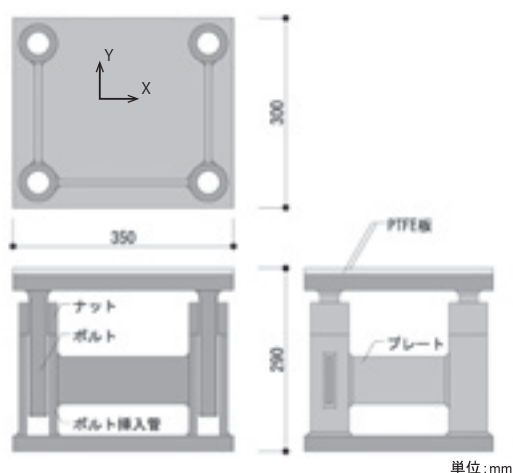


図-9 試験体の形状・寸法

3.3.2 加力・計測方法

加力装置を図-10に示し、加力状況を写真-2に示す。加力は、建研式加力装置を用いて行った。所定の圧縮軸力を载荷した後、軸力を一定に保持した状態で水平力を加力した。圧縮軸力は50t用のサポートジャッキであるため490kNとした。対象建築物の変動軸力を含む地震時鉛直荷重から求めた1台当りの軸力と同等の荷重である。水平力は、一方向の単調载荷とした。圧縮軸力は6000kNロードセルで、水平力は300kNロードセルにて計測した。鉛直変位は周囲4隅で計測し、水平変位は対向する2点で計測した。結果ではそれらの平均値で示す。

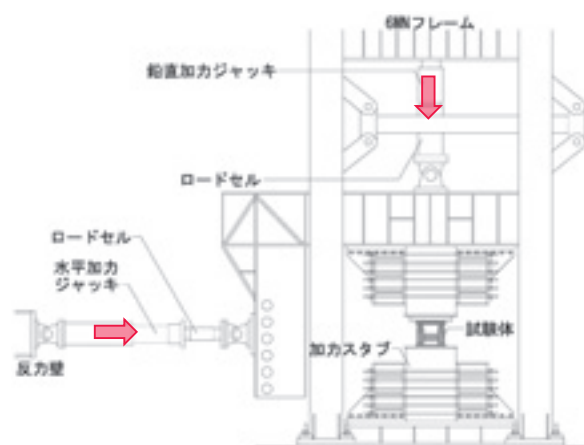


図-10 加力装置



写真-2 加力状況

3.3.3 試験結果

(1) 試験経過および荷重変位関係

試験体No. 1～No.5の荷重変位関係を図-11に示す。試験体No.1は、加力開始後、水平荷重 $P=47.0\text{kN}$ 、水平変位 $\delta=0.47\text{mm}$ で2枚のPTFE板の間ですべりが生じた。このときが最大荷重となり、摩擦係数は $\mu=0.097$ であった。その後、すべる時の水平荷重は低下しながら断続的にすべりが生じ、 $\delta=15\text{mm}$ で加力を終了した。

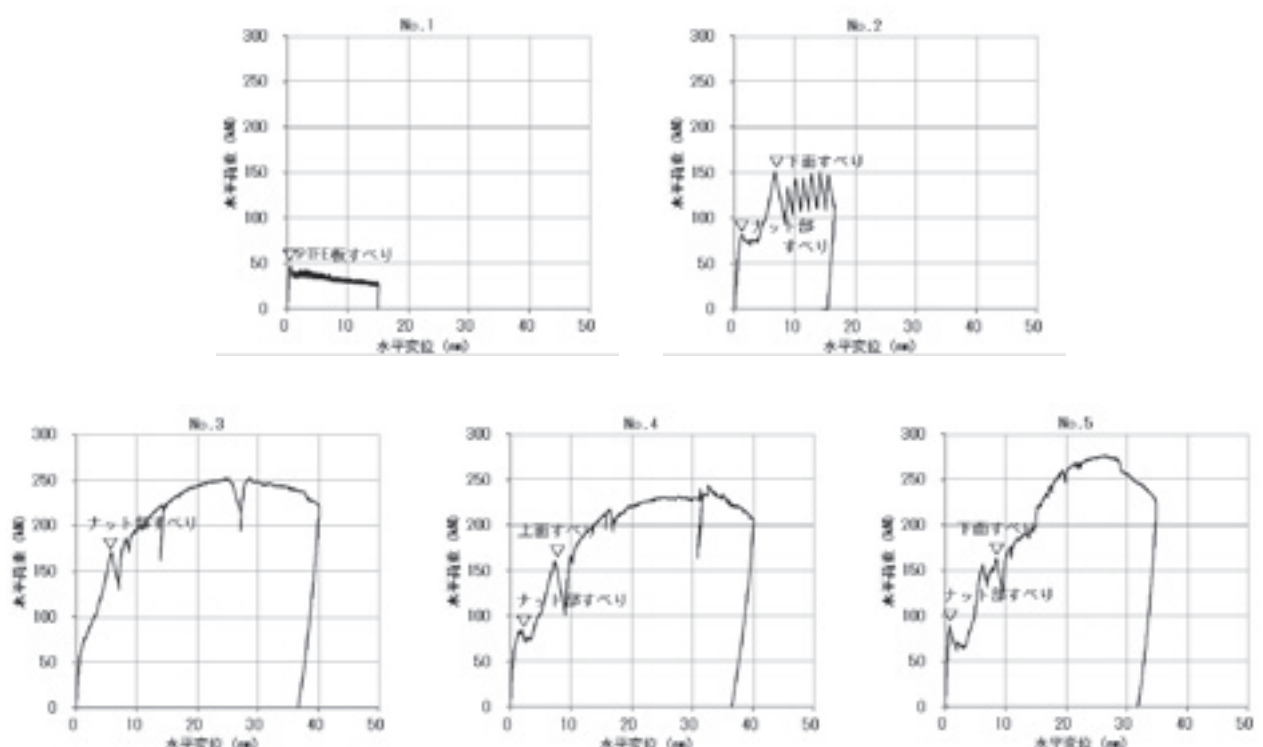


図-11 荷重変位関係

試験体No.2～No.5では、加力開始後、水平荷重 $P=81.3\text{kN} \sim 171.1\text{kN}$ 、水平変位 $\delta=0.80\text{mm} \sim 5.80\text{mm}$ で試験体のボルト挿入管とナット間ですべりが生じ、荷重低下した。その後荷重が再び増加し、試験体No.2では水平荷重 $P=150.4\text{kN}$ 、水平変位 $\delta=6.74\text{mm}$ でサポートジャッキの下側プレートと加力スタブ上面の鉄板との接触面がすべって荷重低下し、試験体No.3～No.5では剛性が徐々に低下しながら最大荷重に達し、その後荷重低下した。最大荷重はNo.5が $P=276.6\text{kN}$ と最も大きく、No.3とNo.4が $P=252.6\text{kN}$ 、 243.1kN とほぼ同じであった。試験体No.3～No.5では最終的にボルトや挿入管などが大きく塑性変形した。

3.3.4 入力される荷重と耐力の比較

試験体No.2～No.5での最大荷重の2分の1と、ナット部にすべりが生じた荷重の小さい方に0.9を乗じた数値をサポートジャッキの耐力とする⁵⁾。この最小値は 67.6kN であり、試験体No.1での最大荷重 47.0kN よりも大きく、PTFE板の効果によりサポートジャッキに損傷を与える水平力は入力されないことが分かる。

3.4 実験のまとめ

2つの実験の結果から得られた知見を以下に示す。

- (1) 対象建築物における長期荷重の2倍を載荷しても摩擦面にすべりは発生せず、仮受け部材の鉛直荷重支持に関する安全性が確認できた。

- (2) 本仮受け方法ではPC鋼棒による仮受け部材の圧着による鉛直荷重支持において、設計条件の摩擦係数0.5を満足していた。
- (3) 本仮受け方法に使用するサポートジャッキの耐力は入力される荷重よりも大きく、仮受け部材の水平荷重支持に関する安全性が確認できた。

4. 実建築物での試験施工

4.1 対象建築物の概要

対象とした建築物で本仮受け方法を用いた免震改修工事を行い、上部構造に有害な変形を与えないように一定の管理値を設けて荷重移行させる試験施工を行った。対象建築物を表-4および図-12に示す。対象建築物は、昭和56年の建築基準法改正以前の、いわゆる旧耐震基準にて建設された建築物であり、改修前の耐震診断では構造耐震指標 I_s 値が0.6を下回っていた。免震改修の設計では地上1階柱頭を免震層とする中間階免震とし、設計クリアランスは 450mm とした。1階部分のみ鉄筋コンクリートの増打ちによる補強を行い、2階以上には補強を不要とした。免震部材の配置を図-13に示す。高減衰ゴム系積層ゴム支承を建物の4隅に配置し、他は弾性すべり支承として、またオイルダンパーを各方向に2基ずつ配置している。各免震部材が支持する長期鉛直荷重は表-5に示す通りであり、合計 $15,551\text{kN}$ である。設計内

表-4 対象建築物概要

建築物用途・建設地	寄宿舎・大阪府大東市
建築年・免震改修年	1973年(昭和48年)・2017年
構造形式	鉄筋コンクリート造 中間階免震構造
階数・建築面積	地上3階塔屋1階・366.876㎡



図-12 対象建築物軸組図

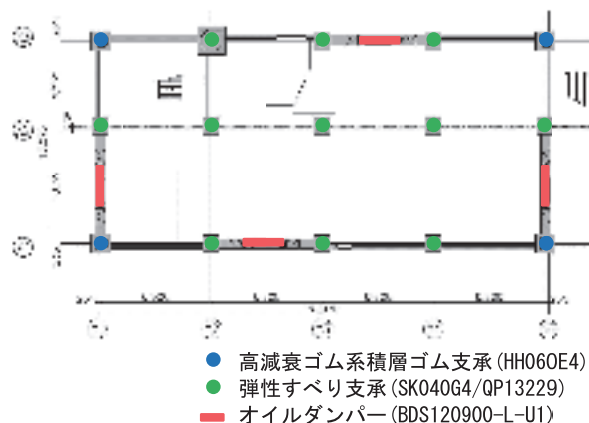


図-13 免震部材配置図

表-5 免震部材長期軸力

	Y1通	Y2通	Y3通	Y4通	Y5通
X3通	589	1,384	837	820	568
X2通	983	1,717	1,576	1,379	983
X1通	659	1,146	1,070	1,137	703

[kN]

容については一般財団法人日本建築総合試験所の建築技術安全審査を受審し、国土交通大臣による耐震改修促進法に基づく大臣認定、大阪府による耐震改修計画の認定を取得した。

4.2 変位制御

4.2.1 施工方法

変位を制御するための荷重の受け替え工程を図-14に示す。仮受けプレロードは、既存柱が負担している鉛直荷重を仮受け部材に移行するための工程であり、これを行うことで既存柱切断時に建築物が大きく下がることを防止する。免震プレロード及びジャッキダウンは免震装置を設置した後に仮受け部材の荷重を免震材料に移行する工程である。これを上部建物の変位を常に監視しながら行った。試験施工ではY1～Y2通りを前半工区、Y3～

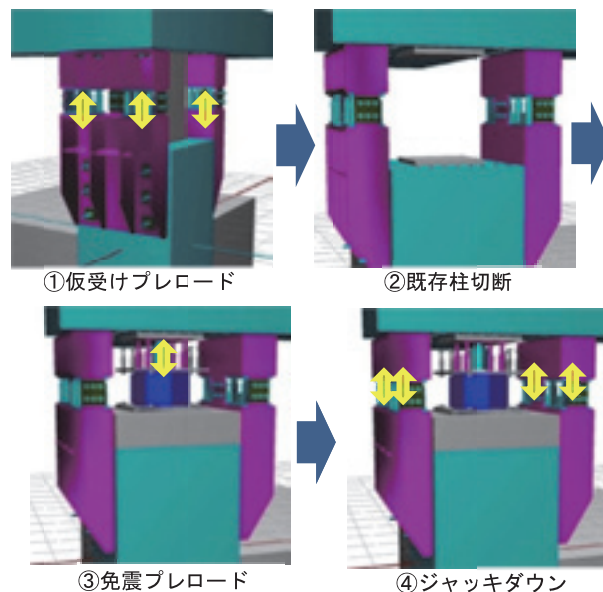


図-14 荷重の受け替え工程

Y5通りを後半工区として分割し、それぞれの作業は柱1本ずつで行った。

4.2.2 管理値の設定

試験施工において設定した変位の管理値を表-6に示す。試験施工では基礎指針⁶⁾に記載されている下限変形角を参考に、上部構造の2階梁に強制変形を与えた場合の付加応力で部材応力度が短期許容応力度を超えないように、限界管理値を1/2000 (rad) として設定した。2次管理値、1次管理値も同様に部材応力度が同表に示す応力度を超えないようにそれぞれ1/3000 (rad)、1/4000 (rad) と設定した。

表-6 変位の管理値

	1次管理値	2次管理値	限界管理値
変形角 (rad)	1/4000	1/3000	1/2000
絶対変位 (mm)	±1.5	±2.0	±3.0
2階梁の 応力度	鉛直荷重時	長期許容 応力度以下	中期許容 応力度以下
	地震時	短期許容 応力度以下	—

4.2.3 加力・計測方法

仮受けプレロード及び免震プレロードでの加力状況を写真-3及び写真-4に示し、これらの作業での計測位置を図-15に示す。仮受けプレロードでは、サポートジャッキ内に設置した1000kN油圧ジャッキにて加力し、免震プレロードでは、免震部材上部のプレロードケース内に設置した1000kN超高压油圧ジャッキにて加力した。加力方法は一方向単調載荷とし、荷重は油圧ジャッキの配管に接続した圧力変換器にて計測した。鉛直変位は柱1本につき2点で計測し、結果はその平均値で示す。

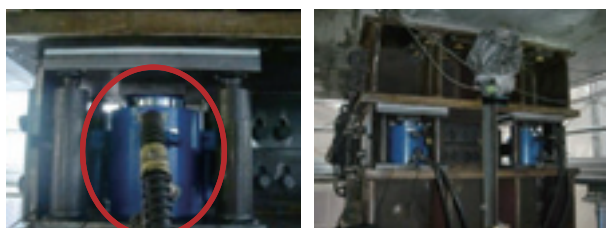


写真-3 仮受けプレロード加力状況



写真-4 免震プレロード加力状況

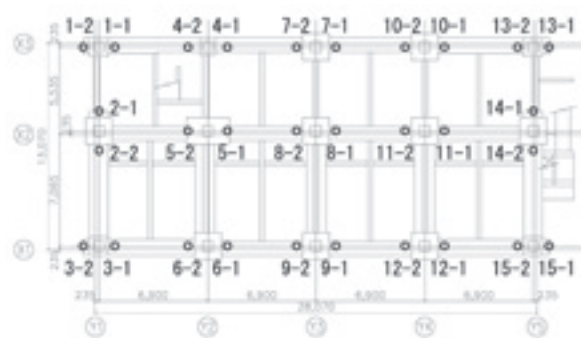


図-15 鉛直変位計測位置図

4.3 計測結果

4.3.1 荷重変位関係

仮受けプレロード時のNo.3柱の荷重変位関係を図-16に示す。図は横軸に荷重導入率を示し、縦軸に鉛直変位を示している。油圧ジャッキを加圧し設計荷重100%のプレロードを導入し、サポートジャッキのナットを締め付けると変位が若干増大する。その後油圧ジャッキを減圧させ、減圧を完了した時の鉛直変位が100%荷重導入時と同程度の鉛直変位となることを目標とした。次工程の柱切断時には変位の変動はほぼなかったことが確認できた。

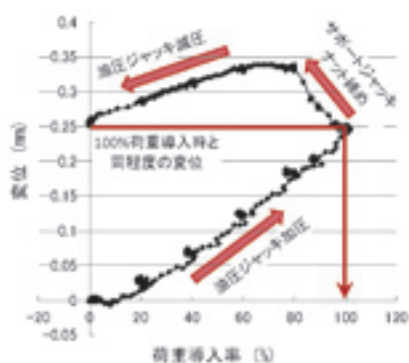


図-16 仮受けプレロード時荷重変位関係

4.3.2 鉛直変位経過計測結果

各柱での変位の計測結果を図-17に示し、変形角の計測結果を図-18に示す。左半分は前半工区、右半分は後半工区の経過を示す。実際の計測データは気温の変動に伴って0.1mm程度ではあるが毎日変動を繰り返した。これは計測機器を設置しているアングル架台の伸縮に伴うものであり、アングルに熱電対を設置して図-19に示す温度補正を行い、鉛直変位を管理した。施工期間を通して全ての柱で1次管理値未満での管理を行うことができた。上部躯体には工事着手前から若干クラックがあったが、免震化完了後に拡大しておらず、新しいクラック等も見受けられなかった。

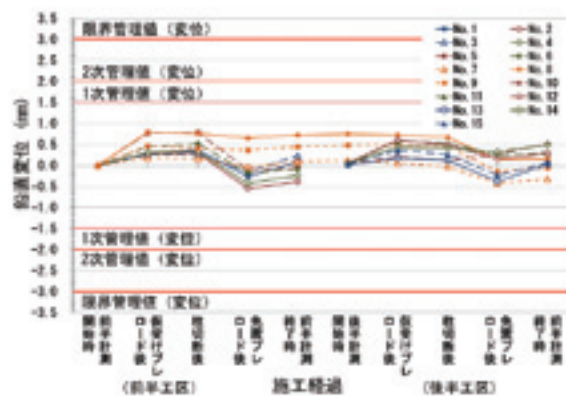


図-17 鉛直変位計測結果

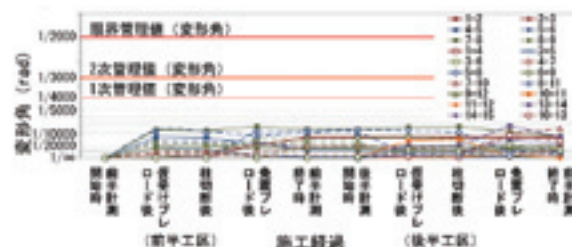


図-18 変形角計測結果

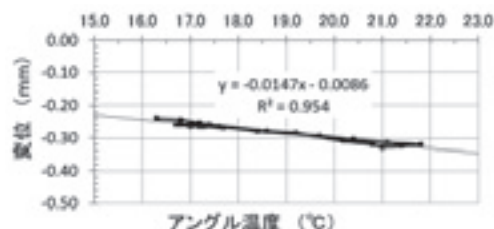


図-19 アングル熱電対による温度補正

4.4 試験施工のまとめ

試験施工で得られた知見を以下に示す。

- (1) 今回用いた計測方法では、気温の変動に伴い計測値も変動するが、アングル架台の温度を計測することで補正が可能であった。
- (2) 対象建築物では、1/4000と設定した1次管理値に対し、約1/7000以下の高い精度での管理が可能であった。

5. 実建築物での水平加力実験

5.1 はじめに

免震建築物では、地震後に建物が元の位置に戻らず建物の機能上支障がある残留変位が生じた場合は、復位作業を実施する必要がある⁷⁾。筆者らは、大鉄免震レトロフィット工法における維持管理の観点から、大地震後に想定される同作業を実際の建物を用いて行う実験により、作業計画、作業時間および精度等に関する検証を行った。本報では実験で得られた荷重変位関係について報告する。更に観察された静摩擦係数の増大が建築物に与える影響についても検討を行う。なお、本章は文献⁸⁾を加筆修正したものである。

実験を行ったのは第4章の試験施工で対象とした建築物である。当該建築物の施工においては平成28年2月3日～4月14日に免震プレロードおよびジャッキダウンを行い、支承に鉛直荷重を載荷した（図-20）。実験は躯体完了段階（平成28年6月29日～）と仕上げ完了段階（平成29年1月25日～）とで行った。

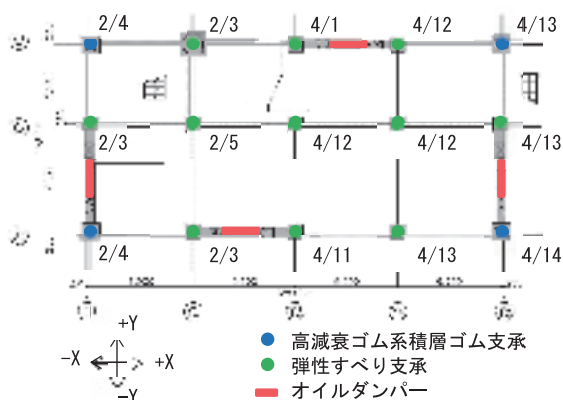


図-20 支承載荷日

5.2 実験概要

5.2.1 躯体完了段階

躯体完了段階での実験は1階部分が構造躯体のみの状態で行った。加力は油圧ジャッキ2台を用いオイルダンパーの反力躯体に静的に水平力を与える方法とし、Y方向1回X方向3回の実験を行った（表-7）。油圧ジャッキは加力による偏芯調整を考慮してそれぞれを独立した油圧にて加圧した。加力ステップを図-21に示す。1回目及び2回目の実験は、強制変位を与え除荷後24時間の経過観察ののち2段階で復位させた。最大変位量はレベル1地震動における最大応答値である180mmとし、加力ステップは10mmずつの平均変位で各ステップの間は1分間以上のインターバルを挟んだ。3回目及び4回目は連続的に加力を行った。荷重は圧力変換器にて計測し、

表-7 実験概要(躯体完了段階)

	方向	開始日時	終了日時	最大変位量
1回目	Y	6/29 10:01	7/ 1 11:30	+180mm～-20mm
2回目	X	7/ 4 10:42	7/ 6 14:00	+180mm～-20mm
3回目	X	7/19 10:44	7/19 13:35	+180mm～±0mm
4回目	X	7/19 15:07	7/20 13:39	+180mm～-20mm

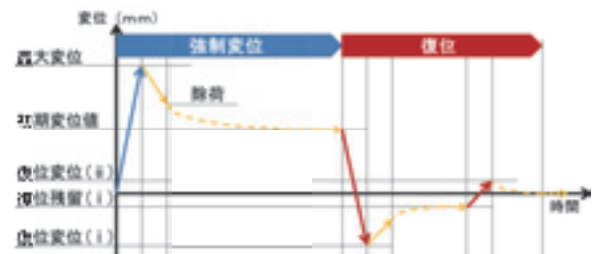


図-21 加力ステップ

結果はその合計値で示す。また変位は全ての柱に設置した変位計にて計測し、結果はその平均値で示す。

5.2.2 仕上げ完了段階

仕上げ工事も完了した段階で、再度実験を行った。この実験は仕上の可動性確認を主目的としており、免震部材は被覆等で覆われた状態で行った。加力方法は同様としたが最大変位量は±180mmとした（表-8）。1回目の実験終了から2回目の実験開始までの時間は躯体完了段階の実験と同等とした。変位の計測は地震後の作業を想定し各方向2箇所の柱で行い、結果はその平均値で示す。

表-8 実験概要(仕上げ完了段階)

	方向	開始日時	終了日時	最大変位量
1回目	Y	1/25 10:00	1/27 10:24	+180mm～-180mm
2回目	X	1/30 9:37	1/31 11:11	+180mm～-180mm
3回目	X	1/31 12:32	1/31 13:47	+180mm～-180mm
4回目	X	1/31 14:04	1/31 15:18	+180mm～-180mm

5.2.3 荷重変位関係

各免震部材の製品検査時の性能試験結果に温度依存性や速度依存性などを考慮した復元力特性およびそれらを単純累加して荷重変位関係を予測した。躯体完了段階を図-22に示し、仕上げ完了段階を図-23に示す。オイルダンパーの復元力は速度依存性によりほぼ無視できる。また配管類の影響も軽微であるため、ほぼ高減衰ゴム系積層ゴム支承と弾性すべり支承の復元力によって荷重変

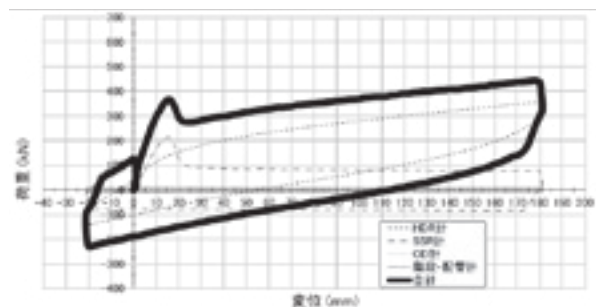


図-22 荷重変位予測(躯体完了段階)

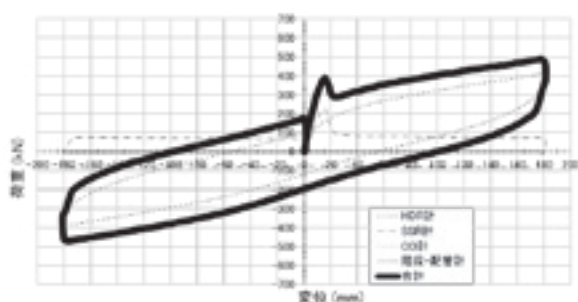


図-23 荷重変位予測(仕上げ完了段階)

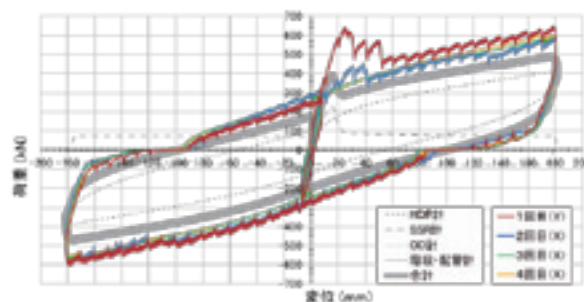


図-26 荷重変位関係(仕上げ完了段階実験値)

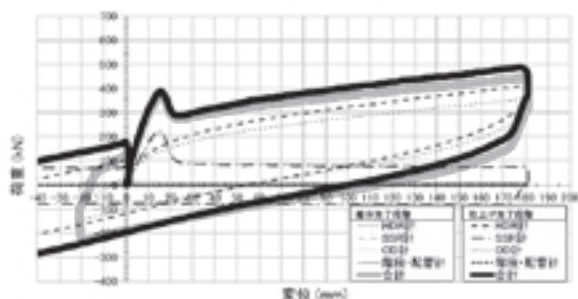


図-24 荷重変位予測(躯体・仕上げ完了段階)

位関係は決定すると予測した。図は当日の気温を考慮してメーカーの技術資料に従い修正したものである。図-24に躯体完了段階と仕上げ完了段階の予測を重ねて示す。温度依存性により冬季に行った仕上げ完了段階の剛性が高くなっていることが分かる。

5.3 実験結果

5.3.1 荷重変位関係

実験で得られた荷重変位関係を図-25および図-26に示す。躯体完了段階の実験で、一次剛性および二次剛性は予測とよく一致していることが分かる。その1回目の実験では弾性すべり支承の摩擦面が滑動するまでに予測よりも大きい荷重値を示した。変位が20mm～30mm程度で一部の弾性すべり支承が滑動を始め、70mm程度で全てが滑動した。強制変位時90mmと復位時20mm付近では変位計の盛替え作業を行った。また2回目の170mm付近では視察の都合で2時間程度実験を中断した。±20mmの範囲で複数回サイクルしているのは原点復位のための微調整を行ったものである。

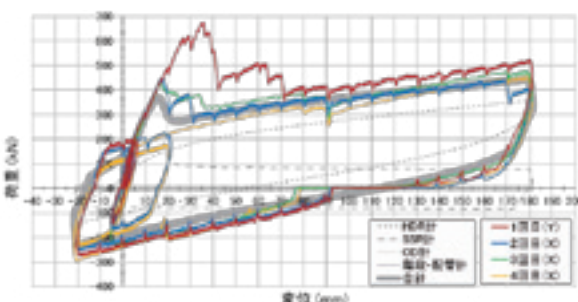


図-25 荷重変位関係(躯体完了段階実験値)

仕上げ完了段階での実験でも、一次剛性及び二次剛性は予測と概ね一致していることが分かる。この実験でも1回目は50mm付近まで予測よりも大きい荷重値を示した。図は各実験の間および4回目以降の微調整を含まないデータを示す。

5.4 建築物への影響の考察

両実験で弾性すべり支承の摩擦面が滑動するまでに大きな荷重値が計測されたのは、静摩擦係数の待機時間依存性⁹⁾によるものと考えられる。静摩擦力の増大が建築物に与える影響について以下の検討を行った。

実験の最大荷重から高減衰ゴム系積層ゴム支承などの予測荷重を引いた静摩擦力を用いて時刻歴応答解析を実施した。使用プログラム(DynamicPRO)の制約上摩擦力が減少する入力ができず、図-27に示す復元力特性にて解析を行った。設計時に使用した各地震波での設計時の最大応答値と増大時の最大応答値を表-9に示す。設計時の応答最大層せん断力係数は告示波Kobe(JMA Kobe 1995 NS)で0.181であり、設計用層せん断力係数はこれを包絡する0.185として設計した。増大時にはほとんどの地震波で応答が増大したが、設計用層せん断力係数を超えるのは告示波Kobeのみであった。当該波での応答せん断力の設計時と増大時の時刻歴での比較を図-28に示す。増大時の部材せん断力の波形により8秒付近で弾性すべり支承の滑動が始まっていることが分かる。このときの建築物の層せん断力は737kN、層せん断力係数で0.050であり、設計用層せん断力係数より小さいことが分かる。すなわち、静摩擦力の増大による応答への影響は8秒程度までであり、その時点での最大応答値は設計用

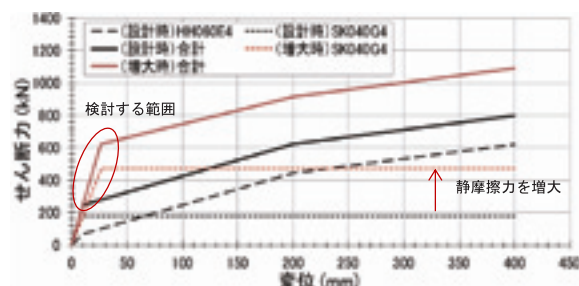


図-27 免震層の復元力特性

表-9 応答最大層せん断力係数

地震波	性能変動	設計時		増大時
		応答最大層せん断力係数	設計用層せん断力係数	応答最大層せん断力係数
EL-CENTRO_NS	Normal	0.093	0.185	0.107
	Hard	0.105		0.115
	Soft	0.082		0.098
HACHINOHE_NS	Normal	0.080		0.104
	Hard	0.105		0.111
	Soft	0.062		0.095
TAFT_EW	Normal	0.096		0.122
	Hard	0.112		0.133
	Soft	0.075		0.097
告示波 Kobe	Normal	0.154		0.173
	Hard	0.181		0.193
	Soft	0.123		0.153
告示波 Hachinohe	Normal	0.120		0.149
	Hard	0.146		0.165
	Soft	0.094		0.129
告示波 Random	Normal	0.139		0.160
	Hard	0.163		0.179
	Soft	0.112		0.141
南海トラフ_NS	Normal	0.097		0.092
	Hard	0.109		0.101
	Soft	0.086		0.078

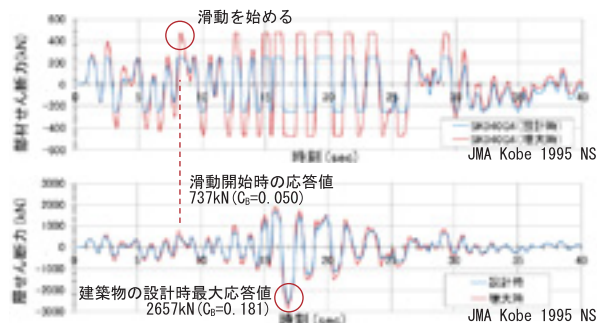


図-28 免震層の復元力特性

せん断力以下である。それ以降の応答は設計時の復元力特性に基づくと考えられるため、弾性すべり支承の滑動以降は設計時の応答に近い応答になるものと考えられる。

5.5 実験のまとめ

実験では実際に地震が発生し残留変位が発生した場合を想定し、原点に復位させる作業を実施した。今回の手法を用いて±2mm以内の原点復位が可能であることが確認できた。そのほか、以下のことが分かった。

- (1) 荷重と変位の関係は概ね予測通りであった。
- (2) 待機時間依存性により静摩擦力が増大した。
- (3) 増大した静摩擦力で解析を行った結果、本建築物への影響はなかった。

6. おわりに

免震レトロフィット工法において狭隘な建築物でも分割施工が可能な仮受け方法の特徴とする大鉄免震レトロフィット工法を開発し、実大実験と試験施工にて検証した事例を紹介した。更に維持管理上想定される作業の検証も行った。上層階だけでなく免震階も施工中の継続使用を可能にし、これまでの免震レトロフィット工法の特

長を更に進展させたことで、移設が困難な通信機器等を収容した重要建築物への適用が期待できる。本研究で得られた主な知見を以下に示す。

- (1) 本工法ではPC鋼棒による仮受け部材の圧着による鉛直荷重支持において、摩擦係数は0.5を満足していた。
- (2) 本工法に使用するサポートジャッキの水平耐力は、入力される荷重よりも大きかった。
- (3) 本工法を用いた試験施工により、実際の建築物の変位制御を行い、高い精度での管理が可能であった。
- (4) 実際の建築物で、地震が発生し免震層に残留変位が発生した場合を想定した水平加力実験にて、高い精度で復位できる技術を確立した。

謝辞

仮受け部材の実験では宮内靖昌教授（大阪工業大学工学部建築学科）に協力・指導を頂き、建築物の水平加力実験では（一財）日本建築総合試験所に設置された「大鉄工業株式会社みとせ寮中間階免震建築物の残留変位復位実験計画検証および結果の考察委員会」〔委員長：藤谷秀雄教授（神戸大学大学院工学研究科）〕に指導を頂きました。ここに謝意を表します。

【参考文献】

- 1) 平成 28 年版 防災白書，内閣府，2016
- 2) 東日本大震災における東京都の対応と教訓，東京都，2011.
- 3) 防災拠点の耐震化促進資料，総務省消防庁，2007.
- 4) プレストレストコンクリート設計施工基準・同解説，日本建築学会，2013
- 5) 仮設機材認定基準とその解説，仮設工業会，2015
- 6) 建築基礎構造設計指針，日本建築学会，2011
- 7) 免震建築物の維持管理基準，日本免震構造協会，2014
- 8) 吉田他：免震レトロフィットされた建築物の水平加力実験，日本建築学会大会学術講演梗概集（中国），pp.247-248，2017
- 9) 松川宏：摩擦の物理，岩波書店，2012

【執筆者】

*1 吉田 康弘
(YOSHIDA Yasuhiro)*2 今中 良彦
(IMANAKA Yoshihiko)*3 栗林 幹夫
(KURIBAYASHI Mikio)*4 江本 達哉
(EMOTO Tatsuya)