

免震レトロフィット工事における鉛直変位管理システムの開発

Development of Vertical Displacement Control System at Seismic Isolation Retrofitting

鈴木 亨 TORU SUZUKI

小坂 英之 HIDEYUKI KOSAKA

江頭 寛 HIROSHI EGASHIRA

中南 滋樹 SHIGEKI NAKAMINAMI

免制震技術部 鈴木 信貴 NOBUTAKA SUZUKI

設計センター 蔵田 富雄 TOMIO KURATA

既存建物の柱を切断し免震装置を挿入して免震化を図る免震レトロフィット工事においては、免震装置の弾性変形による柱部材の鉛直変位を調整する手法が必須である。そこで、免震装置と柱躯体間に設置されたフラットジャッキに注入する無収縮グラウト材の圧力を調整することによって、鉛直変位を精度よく制御するシステムを開発した。本論文は、同システムの概要とその実施例について述べたものである。

キーワード：免震，耐震改修，変位，解析，積層ゴム，弾性変形

In the seismic isolation retrofitting by inserting isolators to the cut off parts of existing building column base, it is essential to have high precision techniques to adjust vertical displacement of columns member caused by the elastic deformation of isolator. To control the displacement, the system which controlled the pressure of no-shrink grouting materials injected into flat-jack installed between the isolator and the column base was developed. This paper described the outline and an execution result of this system.

Key Words: Seismic Isolation, Seismic Retrofit, Displacement, Analysis, Laminated Rubber, Elastic Deformation

1. はじめに

近年、既存建物の耐震改修工法として免震レトロフィットの適用が増加している。この工法は、既存建物の特定層を免震化することによって地震力を低減し、耐震性能を向上させる有効な補強方法である。しかしながら、施工に際しては、既存柱を切断するときに発生する鉛直変位や、積層ゴムが軸力を受けたときに発生する弾性変形が上部構造体に与える影響を最小限に抑えなければならない。そこで、筆者らは、免震装置と柱躯体間に設置されたフラットジャッキに注入する無収縮グラウト材の圧力を調整することによって、鉛直変位を精度よく制御するシステムを開発した。

本報では、同システムの概要と実施例を報告する。

2. フラットジャッキを用いた変位制御

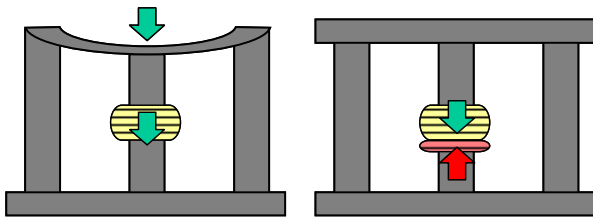
中間柱免震レトロフィット工事においては、既存柱

が負担している長期軸力を仮設柱（サポートジャッキ）で仮受けした状態で柱を切断し免震装置を取り付け、その後、仮設柱が負担している軸力を免震装置に戻すことによって工事が完了する。

免震装置に軸力を戻す際には、免震装置に弾性変形が生じ、その値は、積層ゴム系の免震装置では4～6mm程度となる。この値を考慮せずに免震装置にそのまま軸力を負荷させると、上部構造体に変形が生じ、ひび割れの発生等建物の機能に障害が生じる可能性がある。

この問題を解決する方法としては、免震装置に設置する段階で、予想される装置の弾性変形量をあらかじめジャッキアップする方法がある。しかしながらこの方法では、柱切断時の変位や装置の弾性変形量にばらつきがあることや、サポートジャッキの能力に限界があることなどから、施工精度を向上させることは困難である。

一方、筆者らが採用するフラットジャッキを用いた鉛直変位制御を行うことによって、次に示すように、これらの問題を解決して精度よい施工が可能となる。



フラットジャッキなし フラットジャッキあり
 図-1 上部構造体の鉛直変位



図-2 フラットジャッキの断面

フラットジャッキは薄型の風船型ジャッキである。同ジャッキを免震装置の躯体柱間に設置し、無収縮グラウト材を注入することによって、免震装置に弾性変形を生じさせると同時にサポートジャッキが負担している軸力を免震装置に戻すことが可能となる。フラットジャッキを使用した鉛直変位制御の概念を図-1に、フラットジャッキの断面を図-2に示す。

(1) 鉛直変位制御方法

フラットジャッキを用いて鉛直変位をコントロールするためには、その注入圧力を適切に管理する必要がある。これは、フラットジャッキに無収縮グラウト材を注入する際の圧力(荷重)は、免震装置の弾性変形量のほか、周辺架構(上部フレーム)の剛性等の影響を受けるためである。そこで、周辺架構を図-3に示すようにモデル化することによって、サポートジャッキを撤去した際の梁下の絶対鉛直変位(DG1)が0(施工前)となるような適切な注入圧力を求めることとした。

ここで、上部フレームの鉛直剛性(KF)、バイパスシステム(サポートジャッキ周辺治具)の剛性(KJ)は計測により直接求めることはできない。本システムでは、フラットジャッキへの無収縮グラウト材注入過程における計測値の変化よりこれらの値を計算により算出した。

3. 施工例

(1) 建物概要

本建物は、静岡市内にある10階建ての庁舎ビルである。建物の概要を以下に、建物の外観を図-4に示す。

建物名称：静岡県庁西館

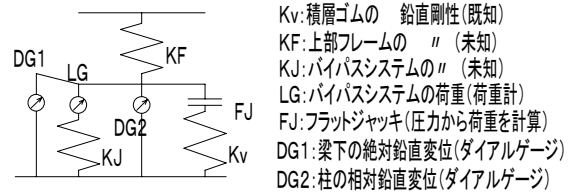


図-3 周辺架構のモデル化



図-4 補強建物の外観

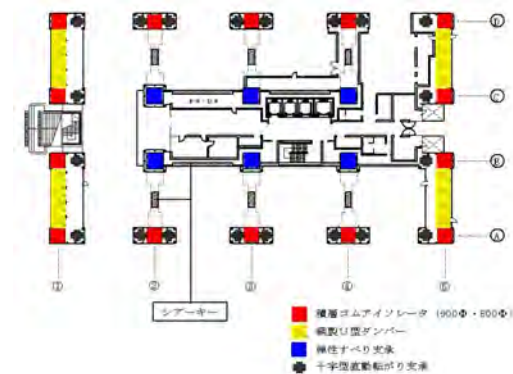


図-5 免震装置の配置

所在地：静岡県静岡市 高さ：GL+41.25m
 延床面積：17,253 m² 竣工年：昭和49年
 用途：1F；駐車場，2F以上；事務室
 階数：地下1階，地上10階，塔屋2階
 構造：SRC造(純ラーメン架構)
 基礎：べた基礎(支持層は洪積砂礫層)
 特徴：1階階高2.7m，2階床ボイドスラブ(t=300)
 1柱当たりの長期最大軸力16,000kN
 意匠性を考慮した多角形断面柱

本建物では、想定される東海地震に対して被災後も建物の機能を維持できること、補強工事期間中も2階以上事務室執務を継続することを大きな設計主題として、(株)日建設計において基本設計が行われた¹⁾。

(2) 免震装置の配置と施工手順

免震装置の配置を図-5に示す。外周部柱(長期軸力：8,000~10,000kN)に積層ゴムアイソレータ(14

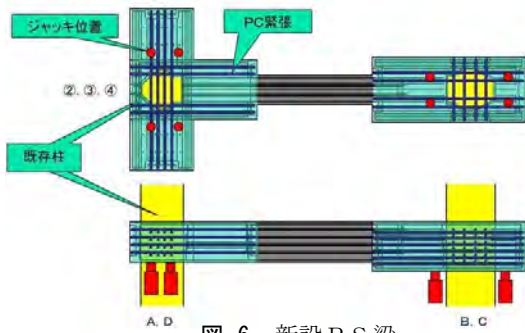


図-6 新設PS梁

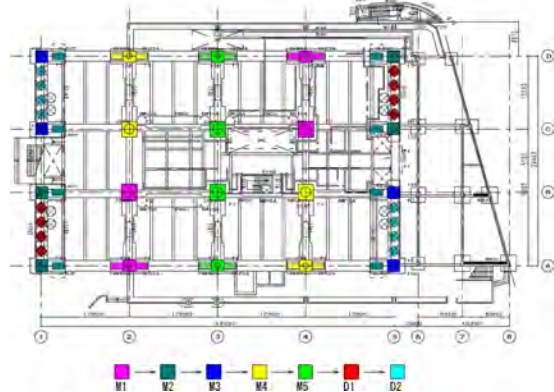


図-7 免震化施工サイクル

基：φ800,900）を配置し、コア部柱（長期軸力：16,000kN）には弾性すべり支承（6基）を配置する計画となっている。また、建物外周表面に鋼製U型ダンパーを16基配置することによって減衰を得ている。

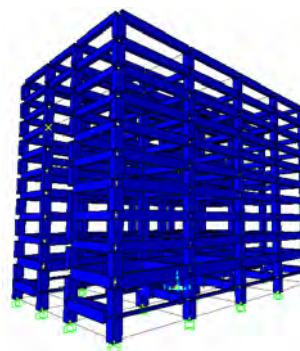
免震化工事では、免震化後の上部構造基礎にあたる新設PS梁をジャッキ受け用躯体として利用した。新設PS梁の概要を図-6に示す。

免震化施工サイクルを図-7に示す。柱切断は対称性を考慮し、4柱を1セットとし5サイクルで行うこととした。

施工終了時での鉛直変位の精度目標は、「柱の絶対変位量 3mm 以内、隣接するスパン間の相対変位量 2mm 以内」と特記仕様書により指示されたが、積層ゴムアイソレータと弾性すべり支承ではその弾性変位量が異なるため、免震装置を設置後そのまま軸力を装置に戻すと鉛直変位量が大きくなることが予測された。そこで、本工事では前述したフラットジャッキを用いることによって積層ゴムの変位量をコントロールすることとし、弾性すべり支承においてはその弾性変位量が小さいので、予想される弾性変位量をあらかじめジャッキアップすることによって対応した。

(3) 施工手順の解析による検討

本工事では弾性すべり支承部分はその弾性変形が少ないため、ジャッキアップにより対応することとしたが、各施工段階においてPS梁に発生する応力やジャッキア



- <解析条件>
- ・支持条件：1階柱脚固定（受け替え柱以外）
 - ・柱-梁接合部の剛域考慮
 - ・スラブ協力幅や鉄骨による梁断面2次モーメントの割増し
 - 両側スラブ付：2.0～2.2倍
 - 片側スラブ付：1.7～1.9倍
 - ・鉄骨による柱の断面積（柱の軸剛性）の割増し
 - 1.2～1.6倍
 - ・ジャッキ支持台のモデル化は行わない（支持台の鉛直剛性を考慮しない）

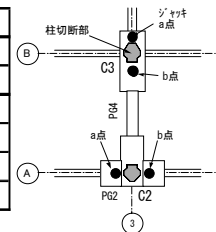
図-8 解析モデル

表-1 軸力の一覧

	1	2	3	4	5
D	7,551 kN	9,581 kN	9,571 kN	9,581 kN	7,551 kN
C	8,865 kN	13,720 kN	13,916 kN	12,722 kN	9,022 kN
B	8,865 kN	13,886 kN	15,328 kN	14,632 kN	9,022 kN
A	7,551 kN	9,581 kN	9,571 kN	9,581 kN	7,551 kN

表-2 荷重受け替え時の鉛直変位とジャッキ反力

種別	柱	部位	Step 1	Step 2	Step 3
鉛直変位 (mm)	C3	柱切断部	0.00	0.00	2.02
		C2	0.00	0.27	0.27
	ジャッキ反力 (kN)	C3	a点	7,649	7,659
b点			7,649	7,551	9,169
C2		a点	-	4,903	4,550
		b点	-	4,903	4,550



ップ能力について解析による検討を行った。

a) 解析モデル

解析モデルを図-8に示す。モデルは立体フレームとし、柱脚支持条件は、切断前の柱については固定、切断後の柱についてはジャッキ位置をピン支持とした。また、柱脚部における軸力の一覧を表-1に示す。

b) 解析方法

図-7に示す施工サイクルのうち最終サイクル（M5サイクル）を模し、3通り柱を切断する過程を検討することとした。解析は以下のステップにより行った。

- Step1：B3(C3)柱を切断し、柱横（柱芯より1,500mmの位置）でジャッキ支持した状態
- Step2：Step1と同様にA3(C2)柱をジャッキ支持した状態
- Step3：弾性すべり支承の弾性変形分をジャッキアップすることを想定し、B3(C3)柱を2mmジャッキアップした状態

c) 解析結果

各ステップにおける荷重受け替え時の鉛直変位とジャッキ反力を表-2に示す。ジャッキの反力はStep3におけるB3(C3)柱の反力が最大となり9,169kNとなった。これより、今回の施工においては、一箇所当たり4,900kN×2台=9,800kNのジャッキを使用することとし

表-3 最大応力と余裕率の一覧

Step	通り	通り間	梁記号	部位	位置記号	最大応力			部材断面			主筋			せん断補強筋				
						Mmax kN·m	Qmax kN	σ_c N/mm ²	σ_b N/mm ²	b cm	D cm	Fc N/mm ²	部位	本数	径 cm	at cm ²	本数	径 cm	ピッチ cm
12	A	-	PG2	2通り端	②	1834	4864	4.77	2.01	220	140	36	上下共	8	D32	63.52	4	D16	10
13	2	A-B	PG4	変断面	③	382	20	0.00	0.95	100	140	30	上下共	2	D29	12.84	4	D16	10
13	2	A-B		変断面	④	-226	324	0.00	0.55	100	140	30	上下共	2	D29	12.84	4	D16	10
13	2	A-B		ジャッキ部	⑤	-941	8689	5.76	0.71	225	170	36	上下共	8	D29	51.36	4	D16	10
13	2	A-B		B通り端	⑥	8345	8600	5.76	6.23	225	170	36	上下共	8	D29	51.36	4	D16	10
13	2	A-B		B通り端	⑦	9620	9120	5.76	7.18	225	170	36	上下共	8	D29	51.36	4	D16	10
13	2	B-C		B通り端	⑧	9620	9120	5.76	7.18	225	170	36	上下共	8	D29	51.36	4	D16	10
13	B	2-3	G5	2通り端	⑩	-1030	235	0.00	2.13	50	220	30	上下共	4	D22	15.48	2	D10	20

・余裕率の計算

Step	梁記号	位置記号	曲げ応力の検討				せん断力の検討											
			$\sigma_{min}(-)$ N/mm ²	fc(中期) N/mm ²	余裕率	判定	$\sigma_{max}(+)$ N/mm ²	σ_{cr} N/mm ²	余裕率	判定	Qmax kN	QA(中期) kN	余裕率/QA	判定	Qmax kN	sQcr kN	余裕率/sQcr	判定
12	PG2	②	-6.78	15	-2.21	OK	-2.76	3.42	-	-	4864	7659	1.57	OK	4864	7208	1.48	OK
13	PG4	③	-0.95	12.5	-13.14	OK	0.95	3.12	3.28	OK	20	1687	88.01	OK	20	1589	82.54	OK
13		④	-0.55	12.5	-22.76	OK	0.55	3.12	5.68	OK	324	1687	5.22	OK	324	1589	4.89	OK
13		⑤	-6.46	15	-2.32	OK	-5.05	3.42	-	-	8689	10268	1.18	OK	8689	9601	1.10	OK
13		⑥	-11.97	15	-1.25	OK	0.47	3.42	7.27	-	8600	10268	1.19	OK	8600	9601	1.12	OK
13		⑦	-12.93	15	-1.16	OK	1.42	3.42	2.41	OK	9120	10268	1.13	OK	9120	9601	1.05	OK
13		G5	-	-2.13	12.5	-5.87	OK	2.13	3.12	1.47	OK	235	1000	4.33	OK	235	1245	5.37

*せん断補強筋を考慮しない

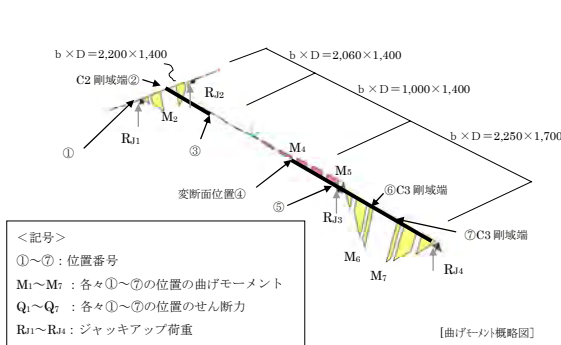


図-9 モーメント概要図

た。また、柱切断部（軸力作用位置）とジャッキ支持位置が 1,500mm 偏心しているため、柱切断部の変形を 0mm とするためには、ジャッキ部では更なるジャッキアップが必要となり、その値は B3(C3)柱で 0.13~0.60mm 程度となった。また、B3(C3)柱においては、上部架構の剛性の違い（A-B 間、B-C 間の PG 梁の有無）によって、同じ荷重でジャッキアップした場合にジャッキ部の変位に差が生じ、その値は 1mm 程度となった。実施工においては、これらの値に注意して作業を進めることとした。

柱軸力受け替え時に生じる曲げモーメントの概要図を図-9 に、周辺梁の最大応力と余裕率の一覧を表-3 に示す。表-3 より、曲げ応力に対しては 1.14 倍以上、せん断力に関しては 1.13 倍以上（せん断補強筋は考慮せず）、せん断ひび割れに対して 1.05 倍以上の余裕率があることを確認した。なお、せん断ひび割れに対する余裕率が 1.05 倍と最も低くこれは Step3 においてであった。B3(C3)柱のジャッキアップの際は、せん断ひび割れの発生を重点管理項目とするとともに、隣接する柱(A3(C2))との相対変位を 2mm 以下に抑えて施工を行った。

(4) 計測システム

積層ゴム取り付け柱（フラットジャッキ使用柱）部分の柱廻りのセンサー取り付けイメージを図-10 に、取り付けしたセンサーの一覧を表-4 に示す。計測は柱切断

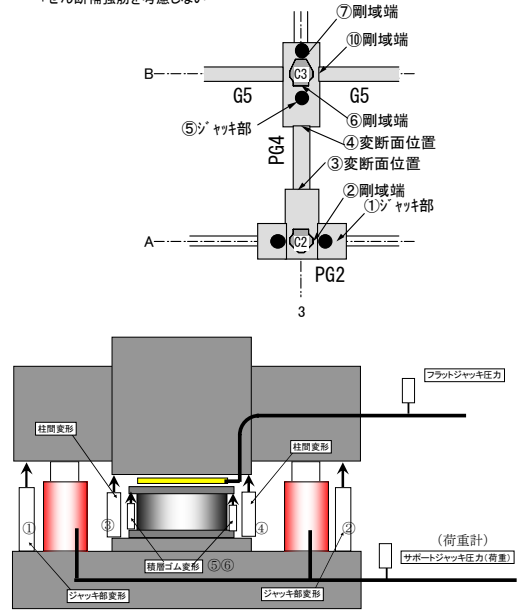


図-10 センサーの取り付けイメージ

表-4 センサーの一覧

No.	取付位置	計測期間
変位計① (CDP-25)	サポートジャッキ部	サポートジャッキセット時~ジャッキダウン時
変位計② (CDP-25)	層間鉛直変位	
変位計③ (CDP-25)	柱切断部鉛直変位	支保設置時~ジャッキダウン時
変位計④ (CDP-25)	(積層ゴムのみ)	
変位計⑤ (CDP-25)	積層ゴム鉛直変位	支保設置時~ジャッキダウン時
変位計⑥ (CDP-25)		
荷重計 (電圧入力)	サポートジャッキ荷重	サポートジャッキセット時~ジャッキダウン時
圧力計①	フラットジャッキ油圧	フラットジャッキグラウト充填時
電気式変位計本数	4本(中柱:すべり支承)	6本(側柱:積層ゴム)
圧力計本数	1本	

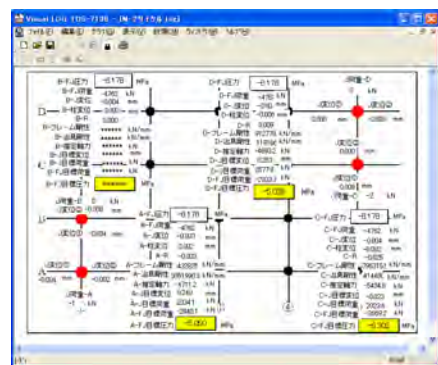


図-11 計測結果表示画面

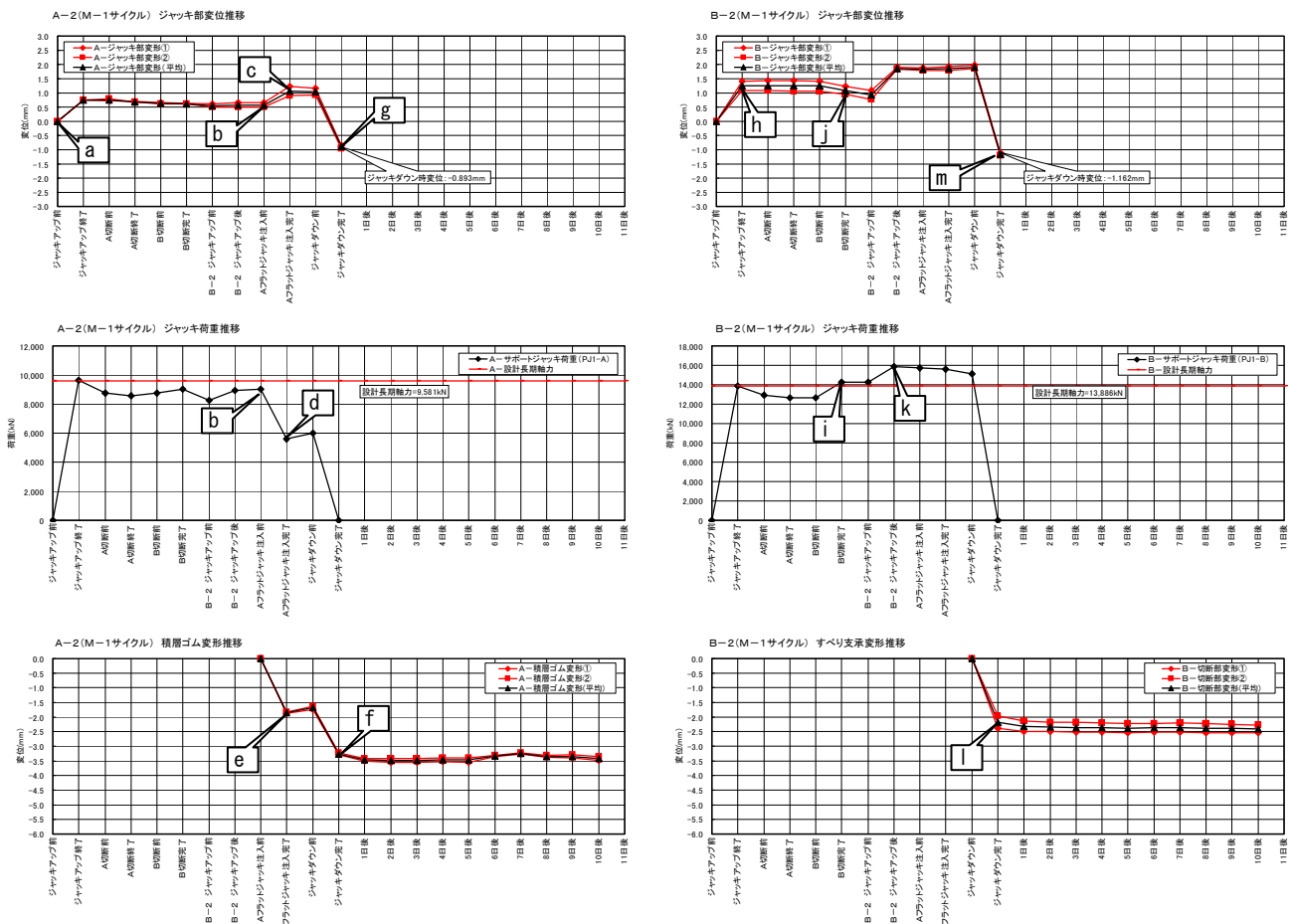


図-12 ジャッキ荷重と変位の推移

前から積層ゴムアイソレータに軸力が戻る（ジャッキダウン時）までの間継続して実施した（免震装置の変形量に関しては、作業工程上支障がない範囲で継続して計測した）。計測値は計測用コンピュータ上にリアルタイムで表示可能とし、フラットジャッキへの無収縮グラウト注入時には、適正な注入圧力を計算表示するシステムとした。計測結果表示画面を図-11 に示す。

(5) 計測結果

各工程におけるジャッキ部の変位、ジャッキ荷重、積層ゴムアイソレータの変位の推移の例（A-2,B-2 柱）を図-12 に示す。A-2 柱（積層ゴムアイソレータを設置）の推移は以下のとおりとなった。

- 設計長期軸力相当(9,581kN)をジャッキに負荷させることによって、その部分に 0.7mm 程度の変形が発生した(a)。
- その後、若干の荷重の低下が見られたが、柱切断時には荷重・変位ともに大きな変化は見られなかった(b)。
- フラットジャッキへの無収縮グラウト注入によって、ジャッキ部の変形は約 1mm となり(c)、ジャッキ荷重は約 6,000kN となった(d)。長期軸力の一部を積層ゴ

- ムアイソレータが負担することによって、同装置に約 2mm の変形が生じた(e)。
- サポートジャッキを撤去（ジャッキダウン）することにより、全荷重が積層ゴムアイソレータにかかり、同装置はトータルで約 3.3mm 変形した(f)。
- ジャッキダウン時の同部変位は約-0.9mm であった(g)。
- また、B-2 柱（弾性すべり支承を設置）の推移は以下のようなった。
- 設計長期軸力相当(13,886kN)をジャッキに負荷させることによって、その部分に 1.2mm 程度の変形が発生した(h)。
- その後、若干の荷重の低下が見られたが、柱切断完了時に若干荷重が増加するとともに(i)、変位が下がる傾向を示した(j)。
- 弾性すべり支承の弾性変形分をジャッキアップすることによって、ジャッキ反力が約 16,000kN まで上昇した(k)。
- サポートジャッキを撤去（ジャッキダウン）することにより、全荷重が弾性すべり支承にかかり、同装置は約 2.2mm 変形した(l)。
- ジャッキダウン時の同部変位は約-1.2mm であった(m)。

表-5 ジャッキ部の最終変位

	1	2	3	4	5
D	-0.936	-1.187	-1.340	-1.381	-0.683
C	-0.906	-1.131	-1.581	-1.664	-0.905
B	-0.455	-1.162	-1.714	-1.971	-0.678
A	-0.631	-0.893	-1.739	-1.446	-0.785

積層ゴムの平均値: -0.998 mm
すべり支承の平均値: -1.537 mm

最大変位: -1.971 mm (B-4)
最小変位: -0.455 mm (B-1)

隣接する最大変位: 1.293 mm

表-6 免震支承の変形量

	1	2	3	4	5
D	-3.024	-4.152	-4.415	-3.211	-3.991
C	-4.130	-2.763	-2.898	-2.473	-6.153
B	-4.341	-2.173	-2.832	-3.021	-5.065
A	-3.207	-3.258	-3.859	-3.888	-3.232

表-7 ジャッキ荷重の一覧

	1	2	3	4	5
D	7,551 kN サポート荷重 / サポート荷重 / 長期軸力 6,277 kN / 83.1%	9,581 kN サポート荷重 / サポート荷重 / 長期軸力 9,300 kN / 97.1%	9,571 kN サポート荷重 / サポート荷重 / 長期軸力 9,251 kN / 96.7%	9,581 kN サポート荷重 / サポート荷重 / 長期軸力 8,910 kN / 93.0%	7,551 kN サポート荷重 / サポート荷重 / 長期軸力 6,702 kN / 88.8%
C	8,865 kN サポート荷重 / サポート荷重 / 長期軸力 8,661 kN / 97.7%	13,720 kN サポート荷重 / サポート荷重 / 長期軸力 14,557 kN / 106.1%	13,916 kN サポート荷重 / サポート荷重 / 長期軸力 14,687 kN / 105.5%	12,722 kN サポート荷重 / サポート荷重 / 長期軸力 13,782 kN / 108.3%	9,022 kN サポート荷重 / サポート荷重 / 長期軸力 9,291 kN / 103.0%
B	8,865 kN サポート荷重 / サポート荷重 / 長期軸力 8,465 kN / 95.5%	13,886 kN サポート荷重 / サポート荷重 / 長期軸力 14,253 kN / 102.6%	15,328 kN サポート荷重 / サポート荷重 / 長期軸力 15,059 kN / 98.2%	14,632 kN サポート荷重 / サポート荷重 / 長期軸力 15,401 kN / 105.3%	9,022 kN サポート荷重 / サポート荷重 / 長期軸力 9,279 kN / 102.8%
A	7,551 kN サポート荷重 / サポート荷重 / 長期軸力 6,488 kN / 85.9%	9,581 kN サポート荷重 / サポート荷重 / 長期軸力 8,586 kN / 89.6%	9,571 kN サポート荷重 / サポート荷重 / 長期軸力 9,189 kN / 96.0%	9,581 kN サポート荷重 / サポート荷重 / 長期軸力 9,193 kN / 95.9%	7,551 kN サポート荷重 / サポート荷重 / 長期軸力 6,173 kN / 81.8%

(サポート荷重の合計: 203,505kN) / (設計長期軸力の合計: 207,648kN) = 98.0%

全柱における免震化工事終了後のジャッキ部の変位を表-5に、支承材の変形量を表-6に示す。積層ゴムアイソレータ部分の平均は-0.998mm、弾性すべり支承部分の平均は-1.537mmであり、両者の差は約0.5mmであった。また、表-5,6に示すように免震支承の変形は2~6mmあるのに対して、最終変位量は0.5~2mm程度であり、今回の変位制御手法により、装置個々の弾性変形や“なじみ”のばらつきを吸収し精度よく施工できたと考えられる。

(6) 長期軸力に関する検討

柱切断時のジャッキ荷重の一覧を表-7に示す。設計長期荷重に対する比率は82%~108%と若干のばらつきがあるが、トータル荷重は設計長期軸力に対して98%と非常によい対応を示しており、設計の妥当性を確認できた。

4. まとめ

免震レトロフィット工事においてフラットジャッキを使用した鉛直変位制御システムを開発した。これは、フラットジャッキに無収縮グラウト材を圧入する際に、その圧力(荷重)やサポートジャッキ荷重の変化、鉛直

変位等をリアルタイムで計測・計算することにより、適切な注入圧力を算出するものである。

本システムを実施工に導入し、精度よく施工が可能であることを確認した。

謝辞: 本研究で対象とした建物の改修設計ならびに施工計画に関しては、静岡県総務部財務総室庁舎管理室および(株)日建設計からご指導、ご助言を賜りました。ここに記して深謝の意を表します。

参考文献

- 1) 小野潤一郎ほか: 柱脚部に回転拘束機構を持つ中間層免震レトロフィット(その1~4), 日本建築学会大会(近畿) 学術講演梗概集, 構造IV, pp.527-534, 2005.9
- 2) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, pp.54, 1999
- 3) 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, pp.140, 1999
- 4) 日本建築学会: プレストレスト鉄筋コンクリート(III種PC)構造設計・施工指針・同解説, pp.109, 1999
- 5) 東勝広ほか: 複合型免震レトロフィット構法の開発(その6), 日本建築学会大会(東北) 学術講演梗概集, 構造IV, pp.425-426, 2000.9