

コンクリートの軸ひずみに基づく免震部材の軸力推定

舟木秀尊* 川井伸泰** 山上聡*

1. はじめに

近年、従来の免震部材では免震化が難しかった建物についても免震化が望まれる場面が出てきた。これらの建物に対応する方法として金属製転がり支承（以下CRB）と鉛入り積層ゴム（以下LRB）を併用したハイブリッド型免震システム（Flat rail - Rubber bearing System：以下FRS）を開発し、17階建ての建物に初めて適用した。建物の外観パースを図-1に、建物概要の一覧を表-1に示す。FRSの設計においては異種免震部材の併用によって生じる軸力の不均一やクリープによる荷重変動についての十分なデータがなかった。今回、実建物において鉄筋コンクリート架台（以下免震部材架台）の軸ひずみを継続的に計測し、免震部材の軸力分布の把握と設計モデルの検証を行った。本報では軸ひずみの計測とそれを補完するために行った架台の載荷試験およびFEM解析の結果について報告する。

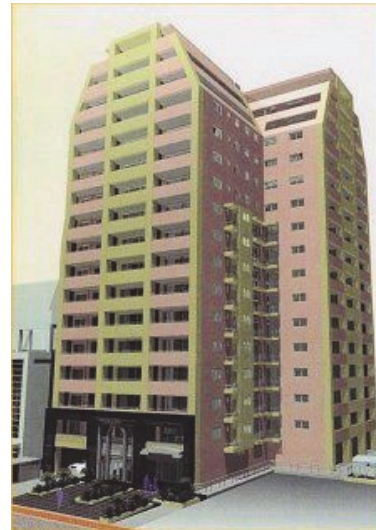


図-1 CRB適用建物の外観パース

表-1 建物概要の一覧

階数	地上17階 塔屋1階
軒高	51.05m
構造種別	RC造
基礎形式	直接基礎（べた基礎）
免震部材	鉛入り積層ゴム（角形） 転がり支承

2. 計測の概要

免震部材の配置を図-2に示す。CRB-6基、LRB-11基で構成され、サイズはCRBが9.9MN支承と4.7MN支承、LRBが□950と□850支承である。免震層の荷重分布を把握するために17基全ての免震部材架台の内部に鉄筋計（ひずみゲージ）を埋設し、免震部材の設置から竣工後に至るまで軸ひずみを計測している。鉄筋計の配置を図-3に、免震部材の設置状況を写真-1に示す。1本の鉄筋計において深さの異なる上下2点のゲージによって軸ひずみを計測している。この方法では直接的に軸力を計測することはできないが、全支承の免震部材架台において同じ位置と深さで軸ひずみを計測していることから、各免震部材の相対的な軸力分布の傾向を把握することができる。

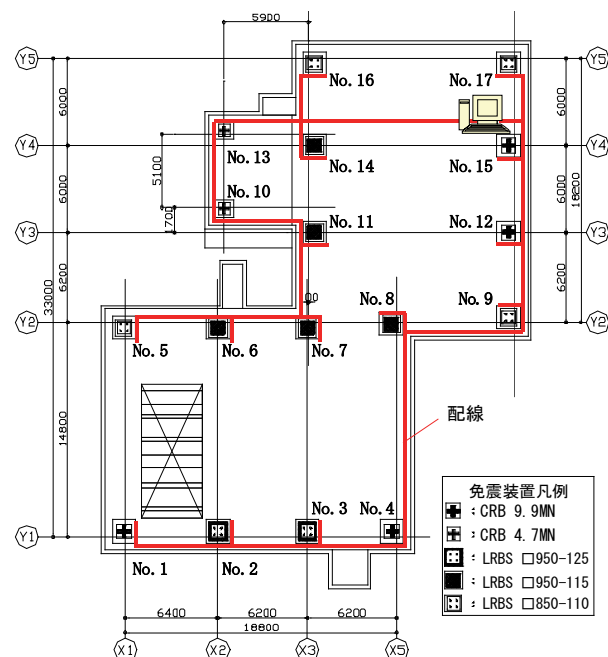


図-2 免震部材の配置

*技術研究所 **東京支社建築設計部

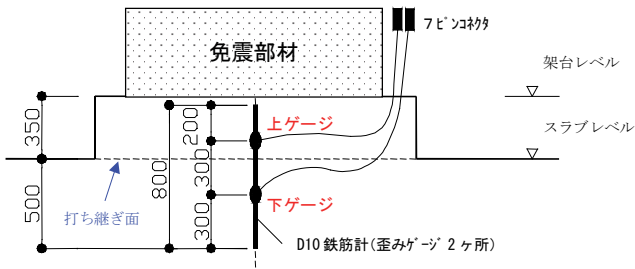


図-3 鉄筋計 (ひずみゲージ) の配置



金属製転がり支承 (CRB) 鉛入り積層ゴム (LRB)

写真-1 免震部材の設置状況

3. 計測結果

3.1 軸ひずみの実測値

軸ひずみは鉄筋計を埋設する架台のコンクリートを打設する前の2002年2月18日の計測値を初期値とし、最初の約5ヶ月間はコンクリート打設(1フロア)毎に手で1回/日、それ以後は自動計測システムによって1時間ピッチで計測している。軸ひずみの推移についてLRBおよびCRBの一例を図-4に示す。建物平面に対してNo.7は中央部、No.9は隅部、No.10はエレベーターピット下、No.12は外周部にそれぞれ位置している。2003年2月までの躯体工事中に軸ひずみが段状に進行している箇所はコンクリート打設日に負担軸力が増加したことを表している。上下ゲージの計測値を比較すると計測深さの違いによる感度の差がみられる。LRBの2例に着目すると、建物中央に位置するNo.7では躯体工事の進行に伴って軸ひずみが継続的に増加しているのに対し、隅部に位置するNo.9では躯体工事中であっても軸ひずみが減少している時期がある。これは同じLRBでも配置によって傾向が異なり、コンクリート打設以外の時でも各支承の負担軸力が変動していることを示している。No.10についてはエレベーターが設置された後に軸ひずみが増加している。全般的に竣工後の軸ひずみは安定した推移を示しているが局所的には小刻みな増減がみられる。これは日照や外気温の変動によって上屋コ

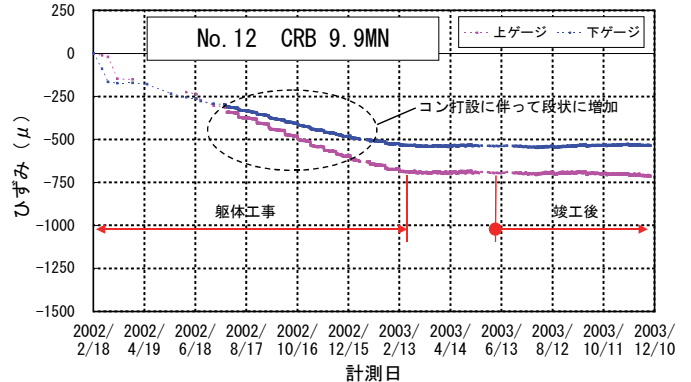
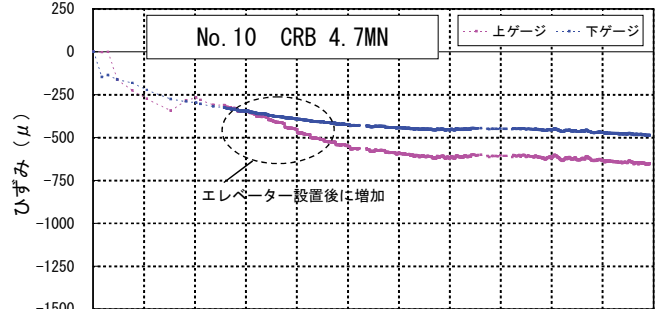
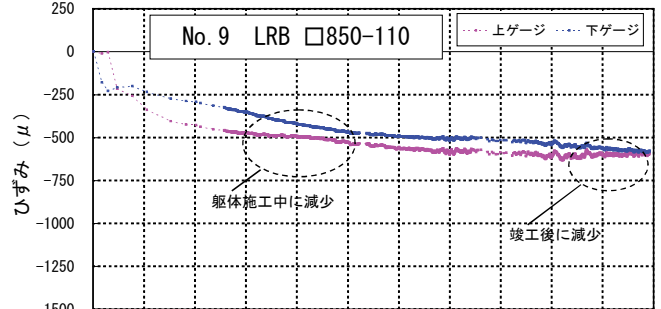
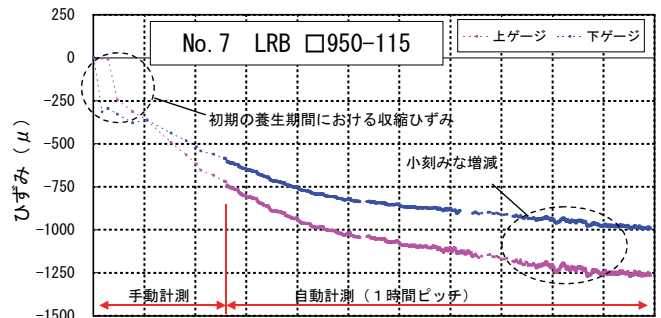


図-4 軸ひずみの推移 (No. 7, No. 9, No. 10, No. 12)

ンクリート躯体が伸縮するなどの影響で免震部材同士の軸力が刻々と再配分されているためと推測される。

3.2 弾性ひずみの分離

軸ひずみの実測値にはコンクリートが養生終了後に収縮するひずみや持続応力の載荷後に時間の経過と共に発生するクリープひずみが含まれており軸力の推定にはこれらの成分を適切に評価する必要がある。今回、躯体工事において各フロアのコンクリート打設毎(1フロア約 300 m³)に発生した軸ひずみを弾性ひ

ずみと定義している。また、実測値から弾性ひずみとクリープひずみを減じたものを収縮ひずみと定義し、弾性ひずみには実測値を、クリープひずみの算出には CEB-FIP Model Code 1990 の式¹⁾を用いている。17 基の計測ひずみの合計を平均化して各因子に分離したものを図-5に示す。収縮ひずみはコンクリートの初期養生期間に発生した後は安定しており、クリープひずみは竣工後も緩やかに進行している。個々の支承における弾性ひずみは、計測ひずみから全支承の平均で求めたクリープひずみと収縮ひずみを減じて評価する。

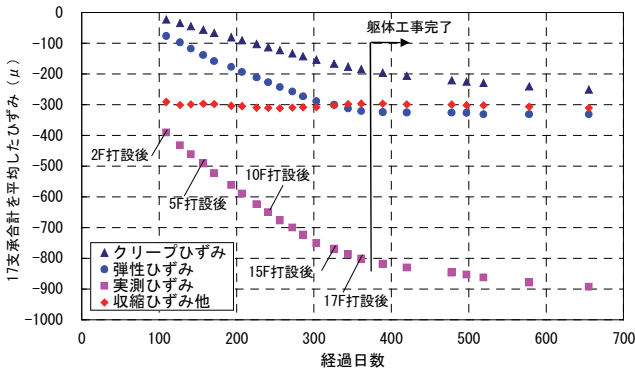


図-5 計測ひずみの分離

3.3 ひずみと軸力の関係

計測したひずみから軸力を推定するためにコンクリート打設量(重量)と打設毎に発生した弾性ひずみの関係から校正係数 23.44 (kN/μ) を求めた。個々の免震部材で得られた弾性ひずみに校正係数を乗じることで軸力を推定することができる。正確にはCRBとLRBでは同じ軸力が載荷された場合でも架台内部に生じるひずみの分布(応力集中度)が異なるため、この影響を考慮する必要がある。

3.4 各免震部材の分布

異種免震部材を併用した場合、温度変化に伴って個々の負担軸力が変動することが予想された。外気温と免震ピット及び架台内部の温度の推移を図-6に示す。また、各免震部材の弾性ひずみ(実測ひずみから収縮ひずみとクリープひずみを除去)の比較を図-7に示す。ピット気温(9月:24℃、12月:14℃)の変化に伴う1支承の変動幅は校正係数を用いて軸力に換算するとCRB(No.13)で+351kN(9.1%)、LRB(No.9)で-465kN(11.2%)が最大となった。全般的にはLRBが減りCRBが増える傾向が見られた。温度が10℃下がることでLRBが縮みCRBに荷重が流れたことが要因として考えられる。

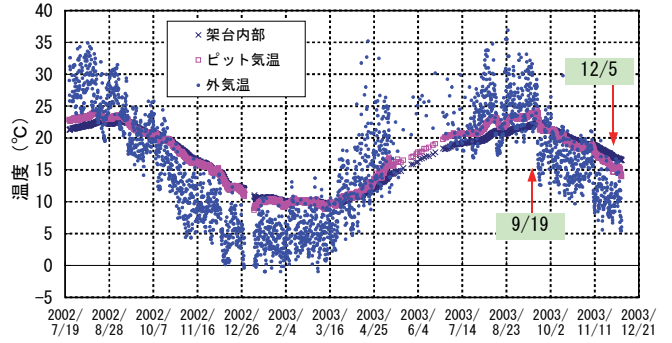


図-6 温度の推移(外気温, ピット気温, 架台内部)

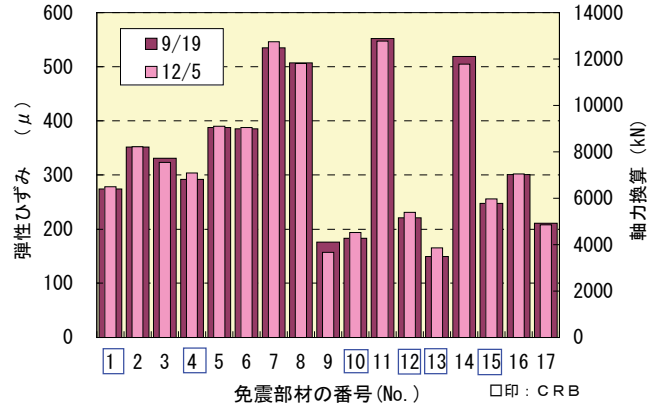


図-7 各免震部材の比較(9/19, 12/5)

4. FEM解析による載荷試験の検証

4.1 載荷試験

CRBを設置する免震部材架台にはローラーからの集中的な線状の荷重が作用する。この架台の構造性能を確認するために実機と同一形状のCRB(長期許容耐力に相当する基準荷重が1600kN支承)を鉄筋コンクリート架台(1/2.6縮小モデル)に設置した状態で載荷試験を行った。また、適用建物における軸ひずみ計測の妥当性を検証する目的も兼ねて、鉄筋コンクリート躯体の平面中心部に鉄筋計を埋設した。試験体とひずみ計測の位置を図-8に示す。

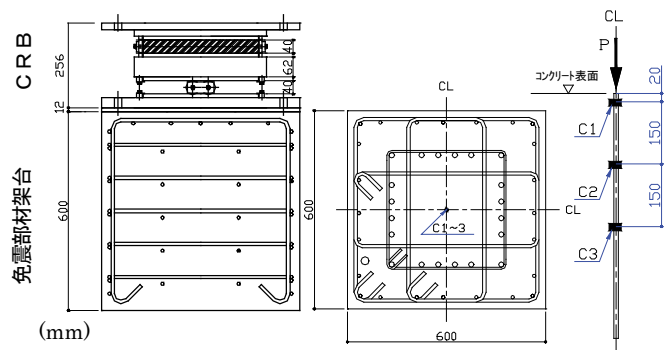


図-8 試験体とひずみ計測の位置

4.2 試験結果

試験では最大 5500 kN の荷重を行い、免震部材架台が CRB を設置する上で十分な構造的な性能を有していることを確認した。ここでは軸力推定に関わる軸ひずみの結果について着目する。CRB の基準荷重 1600 kN までの荷重について荷重と軸ひずみの関係を図-9 に示す。軸ひずみは CRB を設置した躯体コンクリート表面から -20 mm (C1)、-170 mm (C2)、-320 mm (C3) の位置で計測しており、コンクリート表面からの距離がひずみに影響を与えることを確認した。また、鉄筋コンクリート架台に埋設した鉄筋計の軸ひずみの計測から免震部材が負担する軸力の推定がある程度可能であることがわかった。

4.3 試験体の FEM 解析

鉄筋計の軸ひずみから軸力を推定するためには免震部材架台内の応力状態を把握しておく必要があるが、ひずみや変形量といった実測データから架台内部全ての応力状態を推定するには限界がある。そこで解析的な裏付けとして CRB と免震部材架台の FEM 解析を行い、架台に作用する荷重と軸ひずみの関係について検討した。本検討には汎用有限要素法解析プログラム「ADINA ver8.0.4」を用いた。解析のモデル化の概要を表-2 に示す。試験体の平面 1/4、高さ 1/1 の領域についてモデル化し、微小変形微小ひずみ解析を行った。解析に用いる材料物性は、材料試験の結果をもとに表-3 のように設定した。CRB と免震部材架台の荷重試験についてシミュレーション解析を行い FEM 解析の精度を検証した。

4.4 解析結果

CRB の基準荷重 1.6 MN を荷重した状態におけるモデル化境界面および計測位置 C1 断面のひずみ分布 (Z 方向) を図-10 に示す。CRB が受ける荷重はローラーを介して鉄筋コンクリート架台に伝達されるため、架台の表層部ではローラーに沿ってひずみが集中し、架台の内部では球根状に分布している。ひずみについて試験結果と同位置の解析結果を比較したものを表-4 に示す。解析結果は実験値を良く模擬できており、本解析手法によって免震部材架台内のひずみの状況を評価できることが確認できた。実建物に適用した CRB と LRB の免震部材架台の FEM 解析を行うことで免震部材の種別で異なる架台内部の応力集中度を反映した計測ひずみからの軸力推定が可能になる。

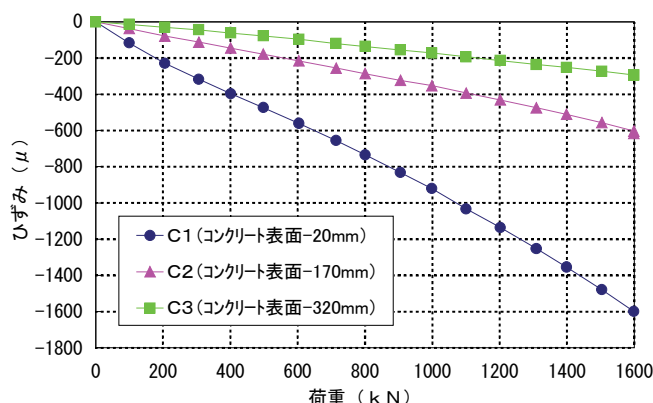


図-9 荷重-軸ひずみ関係

表-2 モデル化の概要

モデル化領域	: 平面 1/4 (高さは 1/1)
拘束条件	: XZ面 Y方向の変位拘束 YZ面 X方向の変位拘束 最上Z面 Z方向の同一変位拘束 最下Z面 Z方向の変位拘束
使用単位	: kN, cm
鋼材 (免震装置)	: 3次元ソリッド要素 (非線形)
コンクリート	: 3次元ソリッド要素 (線形)
鋼材 (鉄筋)	: ビーム要素 (非線形)

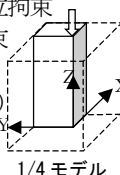


表-3 解析に用いる材料物性

材料	ヤング係数 (kN/mm ²)	ポアソン比	降伏荷重 (kN/mm ²)
鋼材 C13B (ローラ, レール)	194.0	0.300	1.550
鋼材 SS400 (プレート)	205.0	0.300	0.292
鋼棒 D16 (籠筋, 芯筋)	205.0	0.300	0.383
鋼棒 D10 (補強筋)	205.0	0.300	0.379
鋼棒 D6	205.0	0.300	0.361
コンクリート	23.9	0.1667	-

鋼材の降伏後ヤング係数は 1/1000 とした。

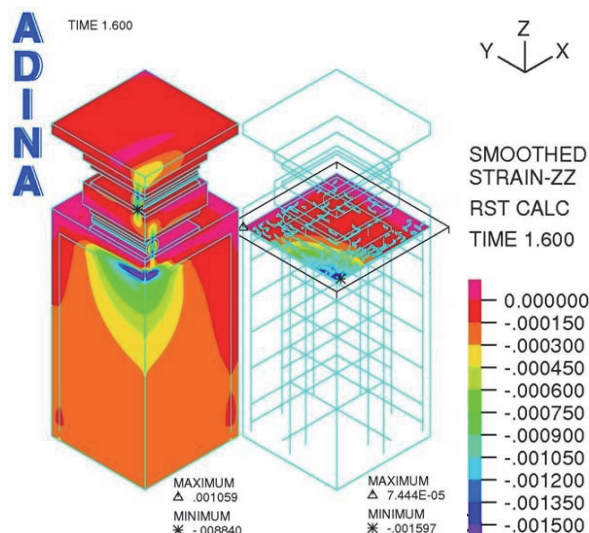


図-10 試験体のひずみ分布 (Z方向)

表-4 ひずみの実験値と解析値の比較

計測位置	C1	C2	C3
実験値	-0.001600	-0.000600	-0.000290
解析値	-0.001597	-0.000477	-0.000276

5. 各免震部材の推定軸力

5.1 実機のFEM解析

載荷試験体のモデル化方法に従って適用建物に使用されているCRBおよびLRBと免震部材架台のFEM解析を行った。適用建物で計測しているひずみデータから軸力を推定するにあたって免震部材の違いが架台内部のひずみ分布に与える影響を考慮することを目的としている。適用建物ではCRBの免震部材架台に対して鉛直剛性を高めるために架台中心部に芯鉄筋(8-D38)を配しており、解析ではこれもモデル化の対象とした。CRB9.9 MN 支承とLRB□850 支承における10 MN 載荷時のZ方向のひずみ分布を図-11に示す。平断面は適用建物における軸ひずみの計測位置(上ゲージ、下ゲージ)と対応している。CRBはLRBに比べて荷重の集中度が高いため、同じ荷重に対して発生するひずみが大きくなるという結果が得られた。ひずみ計測位置での荷重-ひずみ関係を図-12に示す。適用建物における計測データから算出した17基の架台の平均的な弾性ひずみと荷重の関係(校正係数)が $23.44(\text{kN}/\mu)$ であったのに対し、FEM解析結果によるひずみ計測位置での校正係数はCRB = $20.45(\text{kN}/\mu)$ 、LRB = $24.94(\text{kN}/\mu)$ であった。

5.2 各免震部材の推定軸力の検証

建物で計測している鉄筋計ひずみからの推定軸力はCRBとLRBの違いを考慮せずに平均的な校正係数から算出している。これに対してFEM解析から得られた校正係数をもとに免震部材の違いによる影響を考慮して補正を行った。一方、実状に合った荷重条件(床積載荷重 $450 \text{ N}/\text{m}^2$ 等)と免震部材の鉛直剛性(CRB: $8180 \text{ kN}/\text{mm}$, LRB: $6455 \text{ kN}/\text{mm}$ 等)でモデル化した立体フレーム解析によって各部材の軸力を算出した。これらの方法で求めた各部材の推定軸力の比較を図-13に示す。FEM解析に基づいてCRBとLRBの違いを考慮した場合、平均値で評価したものに比べると両者の差は最大で10%程度となった。今回、CRBの架台内部には中心部に芯鉄筋を配しており、架台の鉛直剛性を高めてCRB架台への応力集中を緩和する効果があったと推察される。FEM解析の結果を反映させることによって軸力の推定精度が上がるとともにCRBとLRBの異種免震部材を併用することによる荷重の不均衡なども起きていないことが確認できた。

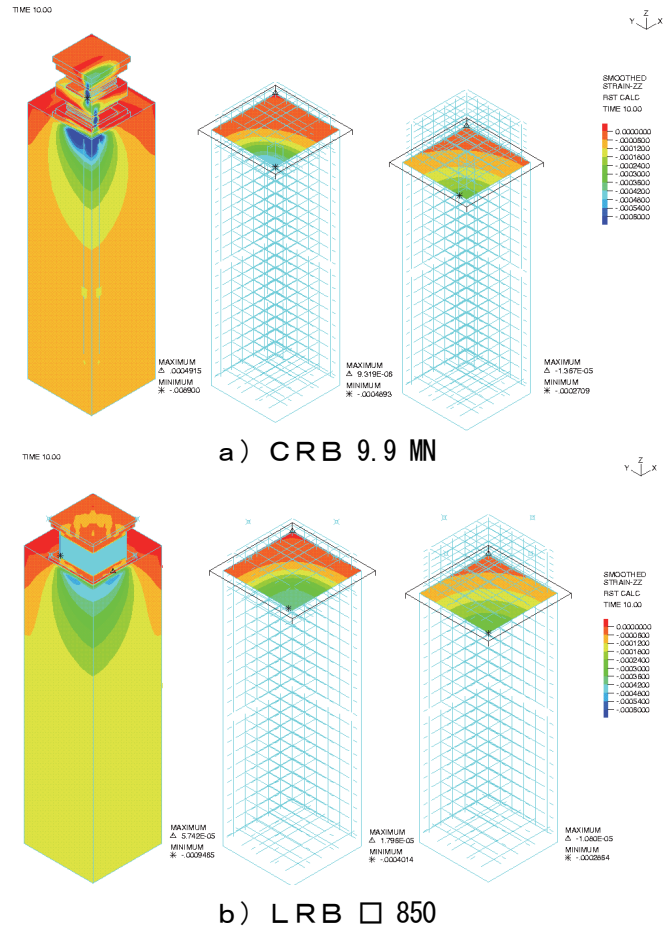


図-11 CRBとLRBのひずみ分布 (Z方向)

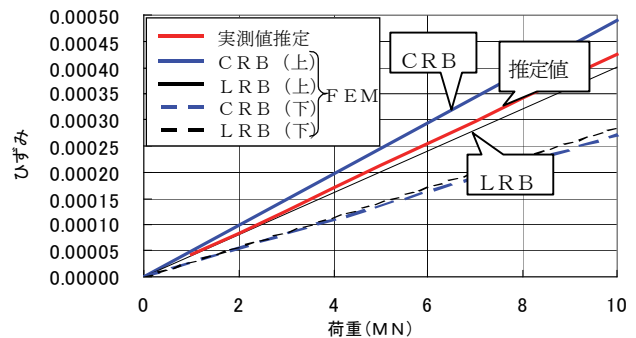


図-12 CRBとLRBの荷重とひずみの関係

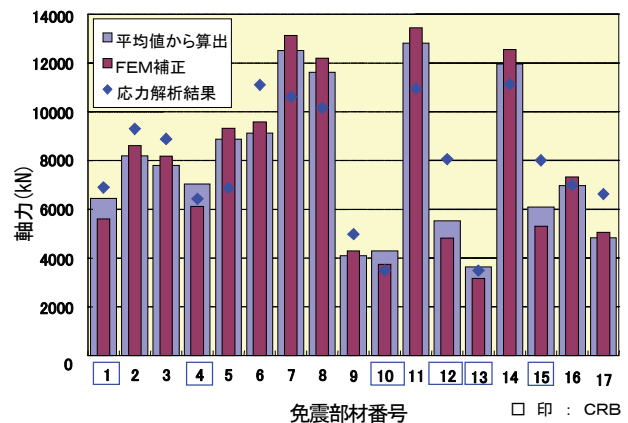


図-13 各部材の推定軸力の比較

6. 立体フレーム解析

6.1 解析の概要

設計モデルの応力解析から得られた各免震部材の軸力と計測ひずみから推定した軸力は、免震部材の位置によって両者に差がみられた。この原因のひとつとして応力解析のモデル化の影響が考えられる。ここでは設計時に用いた解析モデルについて上屋モデルはそのままに免震部材と架台基礎および地盤の支持バネ条件をパラメータとして免震部材の負担する軸力に与える影響を検討した。

6.2 支持バネの影響

免震部材と架台基礎および地盤の支持バネのモデル化を図-14に示す。設計時の支持バネは3つの要素の鉛直剛性を直列に足し合わせて評価している。地盤バネは各免震部材の支配面積に地盤試験データ113.12 kN/m²を乗じたもの、免震部材の鉛直剛性は納品試験のデータを用いている。支持バネのモデル化を①ピン支持、②地盤バネのみ、③免震部材の鉛直剛性のみ、④設計モデル（免震部材+架台+地盤）とした各ケースの軸力分布の比較を図-15に示す。各解析ケースの結果に大きな差はみられず、支持バネのモデル化が各免震部材の負担軸力に与える影響は小さいことがわかった。

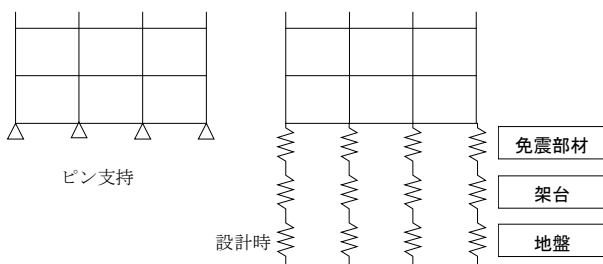


図-14 支持バネのモデル化

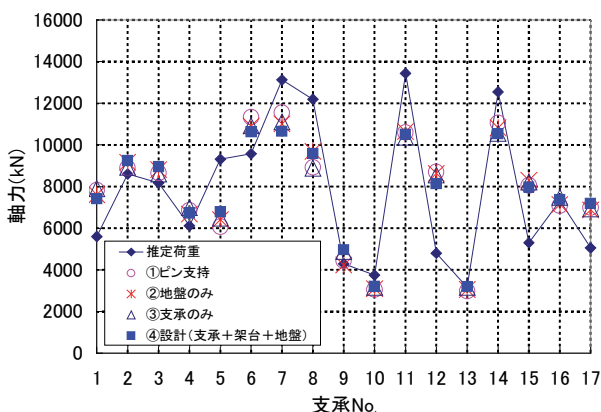


図-15 軸力分布の比較

7. まとめ

金属製転がり支承と鉛入り積層ゴムを併用した建物におけるコンクリートひずみの計測と解析的検討の結果、以下のことが確認できた。

- i. 施工段階からひずみを継続的に計測することで各免震部材が負担する軸力の分布を把握できる
- ii. FEM解析から得られた応力状態を反映することで異種免震部材を考慮した軸力推定ができるが、両者の差は問題にならない範囲であった
- iii. 設計モデルの立体フレーム解析から得られる軸力は軸ひずみから推定した実状の荷重分布を評価できている

8. おわりに

現在、コンクリートひずみの計測を継続中であり、新しい免震構法であるFRSの信頼性向上のためのデータをさらに蓄積している。得られた知見を今後の適用場面で活かしていきたい。なお、CRBの開発はオイレス工業株式会社と共同で実施したものである。

本研究にあたり、東京大学生産技術研究所・藤田隆史教授にご指導を賜った。ここに記して感謝の意を表す。

【参考文献】

- 1) (社) 日本建築学会、「プレストレストコンクリート設計施工規準・同解説」、1998年
- 2) (社) 日本建築学会、「鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ」、2003年
- 3) 舟木、川井ほか、「金属製転がり支承（CRB）の開発とその適用」、奥村組技術研究年報、2002年