

免震レトロフィット技術

－中間階免震工法の適用例－

Seismic Isolation Retrofit for Existing Building

- Practical Example of First Floor Seismic Isolation System for Existing Building -

茂木正史* 小河義郎* 稲留康一*
森川 勤** 舟山勇司*** 西野晃平***

要 旨

奥村組東京本社ビルは、平成元年に竣工した鉄骨鉄筋コンクリート造による事務所ビルである。このビルを免震レトロフィットのモデルケースとするとともに、東京方面の防災拠点とすることを目的として免震化した。採用したのは1階の柱頭部に免震支承を配置する中間階免震の方式である。免震化のための技術的検討として、①免震建物としての構造性能の検討、②施工中の耐震安全性の検討、③1階柱部に免震装置を設置することによる耐火安全性の検討、さらに、④業務を継続しながら工事を行うために騒音・振動対策を検討した。以上により、地震時の建物内部の揺れも低減することができ防災拠点としての性能を確保することができた。

キーワード：免震レトロフィット、耐火設計、無騒音・無振動解体工法

1. まえがき

免震工法は奥村組がつくばの技術研究所に我が国最初の実用的免震ビルを建設して以来 20 年余りが経過する中で、一般技術として定着してきている。一方、循環型社会の到来で、古い建物を使い続ける気運が高まっており、それに必要な既存建物の地震対策として、従来の柱や壁を補強する耐震改修に加えて免震レトロフィットが新たな方法として期待されている。免震レトロフィットは従来の耐震補強と比べて、建物を使用しながらの工

事が行いやすいなどのメリットがある。しかし、実施例が少ないため、免震レトロフィット普及のためには、実際に免震化工事を行い、工事の内容も含めて関係者の理解を深めることが必要である。そこで、免震レトロフィットのモデルケースとすることをひとつの目的として、奥村組東京本社ビル（以下東京本社ビルと略す）の免震化を実施した。図-1に東京本社ビルの立面、表-1に本社ビルの概要を示す。

以下では、免震建物としての構造性能の検討、施工中の耐震安全性の検討、1階柱部に免震装置を設置するこ

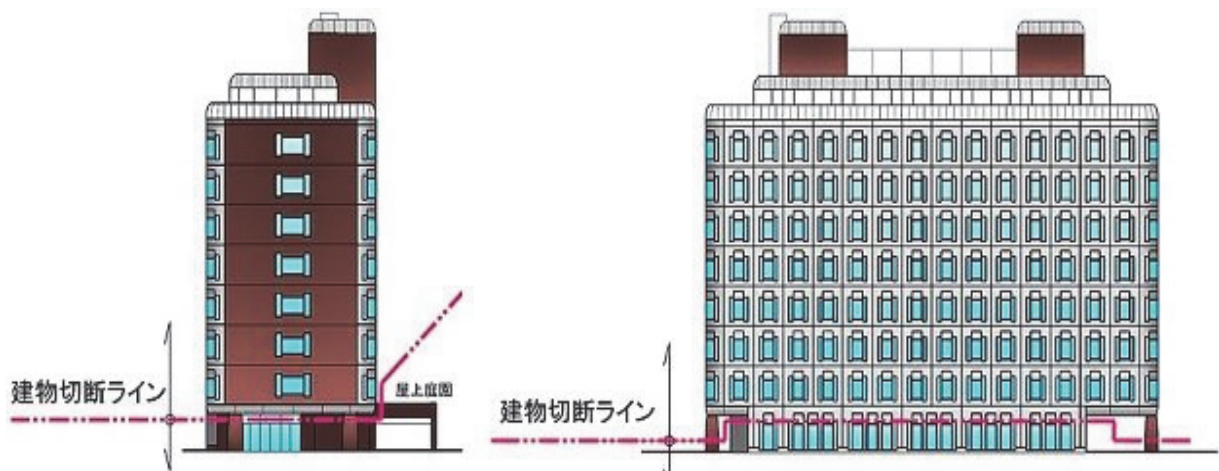


図-1 奥村組東京本社ビル立面と建物切断ライン

*技術研究所 **東京支社建築工務部 ***東京支社建築設計部

表一 東京本社ビルの概要

建築場所	東京都港区芝5-6-1
設計	村野・森建築事務所
竣工	平成元年11月
構造形式	鉄骨鉄筋コンクリート造
階数	地上9階、地下3階
基準階面積	966.9m ²
延床面積	9738.6m ²
軒高	GL+33.17m
基礎底深さ	GL-16.1m

とによる耐火安全性の検討、業務を継続しながらの工事のための騒音対策について述べる。

2. 構造設計

2.1 免震層設置位置 (建物切断位置)

免震層を1階に設置する中間階免震とした。一般的には免震建物の免震層は基礎部に設けられているが、中間階に設けるメリットとして以下が挙げられる。

- i. 免震層の変位を確保するための地盤周辺の掘削を省略できるので敷地を有効に利用できる
- ii. 改修工事においては基礎部分の工事が必要な基礎免震よりも工期、コストの軽減が図れる

建物切断位置は1階柱頭 (建物両側ピロティ柱は柱脚) に設定した。図-1に示す屋上庭園部分は、梁・スラブを切断することにより上部構造から切離し、1階の柱より再支持させる計画とした。

2.2 免震部材

免震部材の配置を図-2に示す。上部構造を22基の高減衰ゴム系積層ゴム支承により支持することとした。支承のゴム総厚は160mm、ゴム径はφ650mm～φ750mmを用い、支承にはそれぞれ耐火被覆を施す。また、長辺および短辺方向ともに最大減衰力500kNのオイルダンパー

をそれぞれ2基設け、応答変位を極力低減させる計画とした。

2.3 設計用入力地震動

設計用入力地震動は、告示に定められた加速度応答スペクトルを持ち、工学的基盤から基礎底までの表層地盤による増幅を考慮して作成した告示波を3波、代表的な観測地震波を3波、関東地震を想定して入倉の方法 (経験的グリーン関数法) を用いて作成したサイト波とした。入倉の方法は大地震の震源域で生じた小地震記録を、グリーン関数として重ね合わせることにより、大地震の強震動を評価する方法である。図-3に示す3箇所の小地震記録を要素地震として用いた。設計用入力地震動のスペクトル特性を図-4に示す。告示波はいずれも擬似速度がほぼ一定でpSv=100cm/s程度である。サイト波は8秒付近のピークでは擬似速度がpSv=250cm/sを越える長周期地震動となっている。敷地での常時微動測定結果や地震基盤までの地盤の増幅特性の計算値においても、7～8秒付近にピークが見られる。この8秒付近の特性は、関東平野の厚い堆積地盤により励起されていると考えられる。

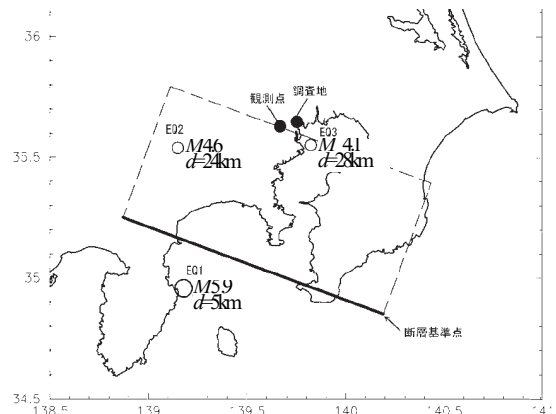


図-3 関東地震の作成概要

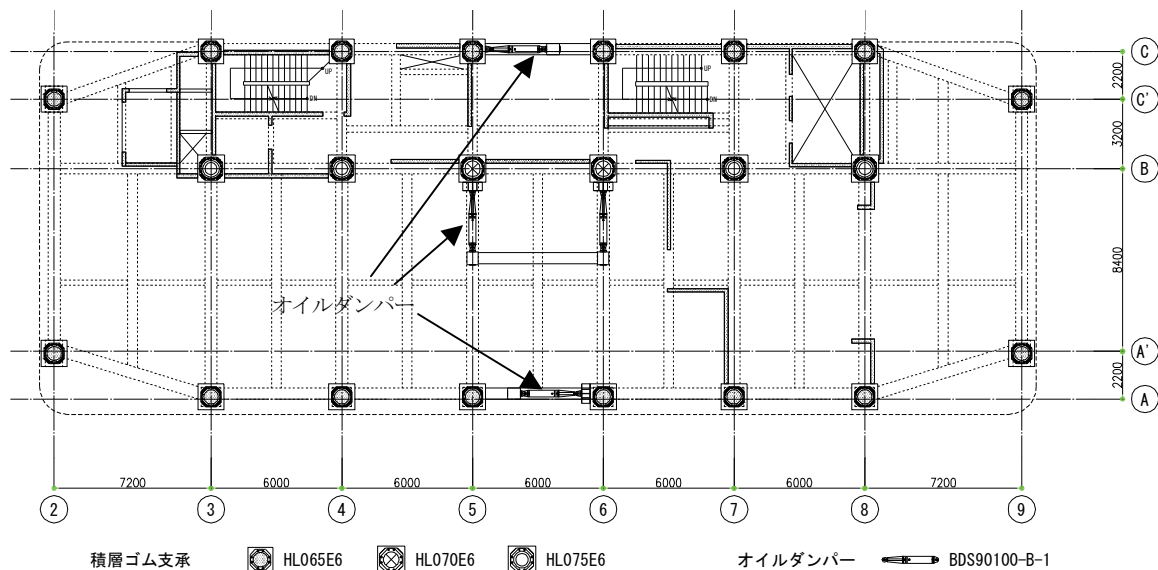


図-2 免震部材配置図

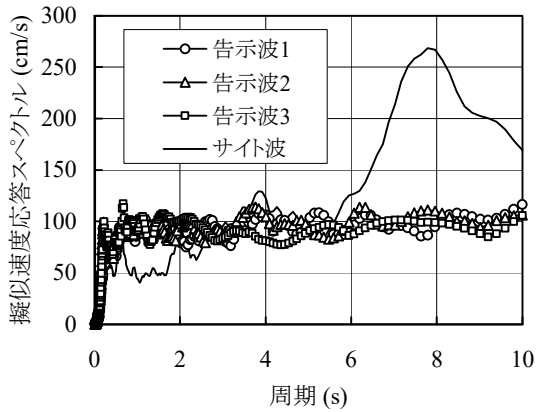


図-4 入力地震動のスペクトル特性

2.4 時刻歴応答解析

免震化後の建物について、適切な振動モデルに置換して時刻歴応答解析を行い、目標とする耐震性能を有することを確認した。解析に用いた振動モデルは、各階の床位置に質量を集中させた質点系モデルとした。地下階は壁量が多く十分な剛性を有することから剛体とし、1階の積層ゴム支承に上部構造が支持される基礎固定の9質点等価せん断ばねモデルとした。

解析結果の一例として、最大応答加速度の分布を図-5に、層せん断力係数の分布を図-6に示す。最大応答加速度の分布状態はほぼ一様であり、最上層における最大応答加速度は 200cm/s^2 程度であった。上部構造の層せん断力係数は、当初設計の50%程度に抑えられており、柱や梁部材が短期許容応力度以下であった。また、最大層間変形角は $1/919$ であり、目標とした $1/500$ を下回る結果であった。

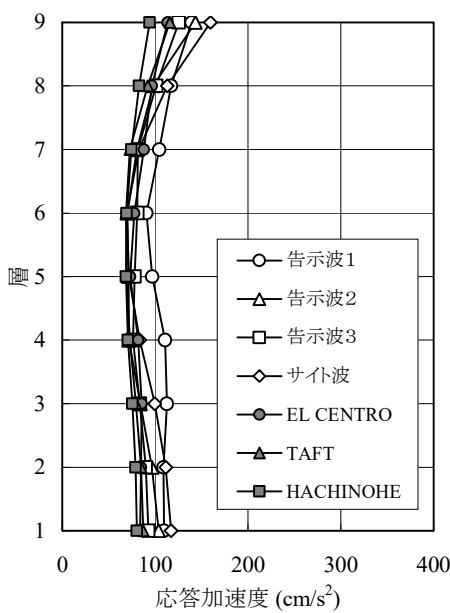


図-5 最大応答加速度の分布

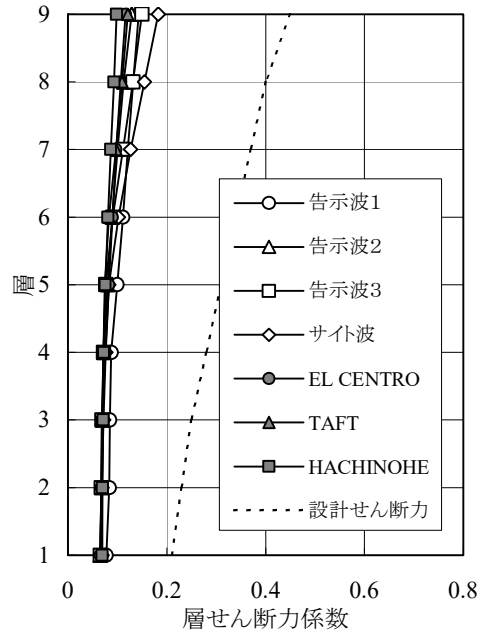


図-6 層せん断力係数の分布

免震変位に関係するのは、支承の周囲に配置される耐火被覆材と積層ゴムとが接触する水平変位は 34cm 、EVのレールと1階の柱との接触が 35cm 程度である。そこで、免震層の最大変位の目標値を 33cm (積層ゴム支承のせん断ひずみ $\gamma=200\%$) とした。時刻歴応答解析による免震層の最大変位は 32.6cm であり、目標を満たす結果であった。

地下・基礎構造については、基礎梁の一部に許容曲げモーメントを超える部材が見られるが、せん断力に対しては十分に余裕がある。杭に発生する曲げモーメントおよびせん断力は終局耐力以下であり、軸力は短期許容支持力以下である。

3. 施工の概要

3.1 施工計画

建物を使用しながらの工事となるので、免震装置を設置する1階を2つのゾーンに分け、1つのゾーンで工事を行い、他は業務で使用した。これに応じて全工程を2期に分けて工事を行った。

柱の切断にはワイヤーソーを、壁についてはウォールソーを併用した。両装置ともに水冷ではなく空冷式を採用し、これにより、使用する地下階への漏水を防止でき、作業場所は冷却水による汚染もなく清潔を保つことができた。

積層ゴム支承の設置手順を図-7に示す。まず、2階の梁との接合部に仮設柱および積層ゴム支承の架台となるキャピタルを製作する。次に、柱の両脇に仮設柱を配置し、油圧ジャッキにより軸力を作用させた後に柱を切

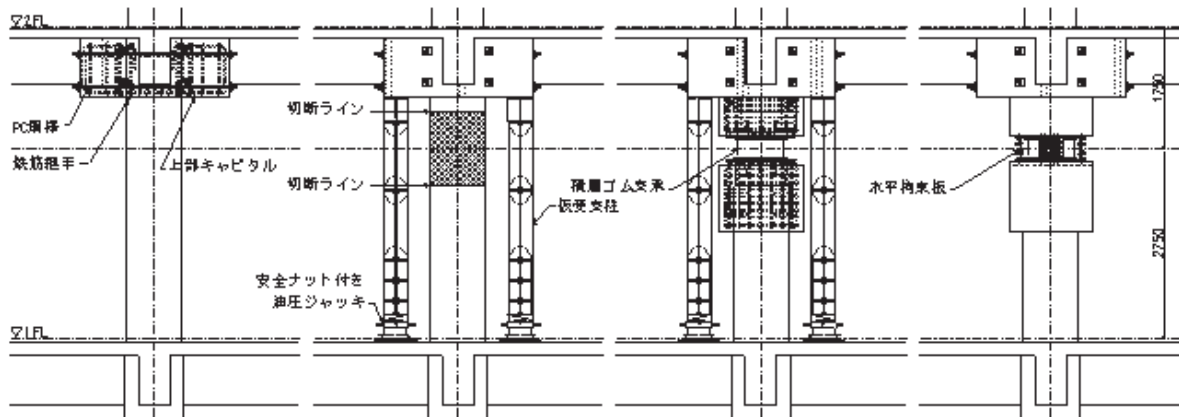


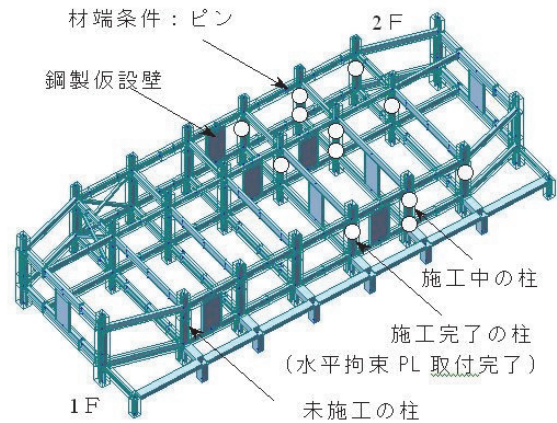
図-7 積層ゴム支承の設置手順

断する。積層ゴム支承の挿入、補強筋を施した後、コンクリートの打設および無収縮モルタルのグラウトを行なう。仮設柱の除去を行い、積層ゴム支承の周囲に水平拘束板を取り付けて施工期間中の耐震要素とする。

3.2 施工中の耐震性能

施工中も供用する建物であるため、施工前と同等の耐震性能を確保するように補強を計画した。時刻歴応答解析により1階に生じる水平力および補強材の数を求め、部分架構モデルにより崩壊形を把握した。

時刻歴応答解析にあたり、1階の振動モデルは施工の最終ステップの状態を模擬して定めた。図-8に示す鋼製仮設壁は、ウェブプレートのせん断降伏により振動エネルギーを吸収する機能を持ち、バイリニア型せん断ばねとして建物モデルに付加した。



施工中：柱頭・柱脚ピン（仮支柱にて支持）
 施工完了：柱頭ピン（積層ゴム支承位置）

図-9 部分架構モデルの概要

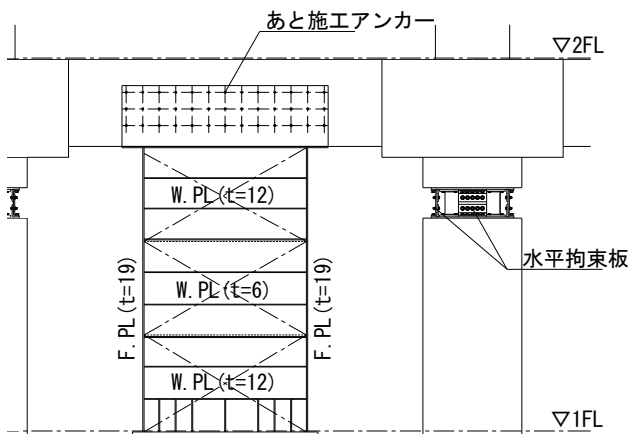


図-8 鋼製仮設壁の概要

部分架構モデルの概要を図-9に示す。施工中の耐震要素は、切断前の柱・耐震壁、施工完了の柱、および鋼製仮設壁である。各々の施工ステップ毎に応力解析を行い、時刻歴応答解析により求めた水平力に対して柱が脆性破壊をすることなく、支持力を失わない結果を得た。

4. 免震装置の耐火検証

東京本社ビルは建築基準法第61条に規定された耐火建築物としなければならない建築物に該当する。免震レトロフィットで、高減衰積層ゴム支承を設置した1階の柱は耐火構造に該当しないので、耐火被覆を施した柱について耐火性能を検証した。建築基準法の評価手順には仕様規定であるルートA、性能規定であるルートBとルートCがあり、ルートBの評価基準は建設省告示第1433号¹⁾に定められており、ルートAとルートBは確認申請で足りるがルートCでは大臣認定が必要になる。免震装置の耐火被覆はルートCの検証が必要であり、その場合建物全体にルートCの適用が必要である。

耐火性能の検証は次のステップで実施したが、建物一般部の検証についてはルートBの基準に準拠した。

- ステップ1 火災継続時間の算定
- ステップ2 保有耐火時間の算出

ステップ3 保有耐火時間>火災継続時間
以下、免震装置の耐火検証過程について述べる。

4.1 免震装置耐火被覆の概要

図-10 に耐火被覆の概要を示す。繊維混入ケイ酸カルシウム板のリングが段状に積層ゴムの周りに配置され、積層ゴムとの間はグラスウールが充填されている。

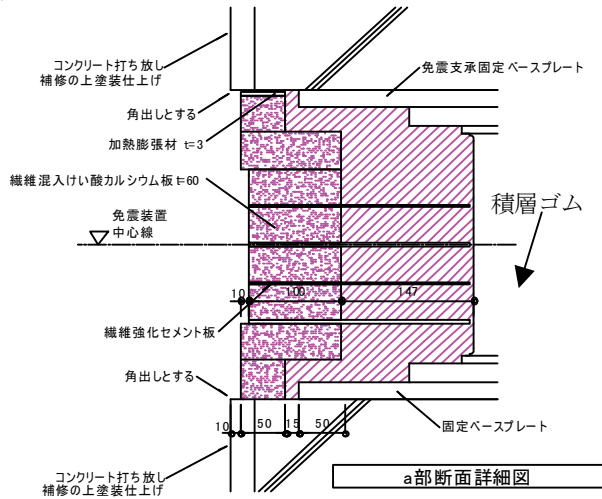


図-10 耐火被覆の概要

表-2 耐火被覆の概要

部分	材料の種類と形状寸法
一般部耐火被覆	繊維混入ケイ酸カルシウム板 厚さ60mm リング幅100mm
変形伝達板	繊維強化セメント板 厚さ4mm
固定プレート部 耐火被覆	繊維混入ケイ酸カルシウム板 厚さ60mm リング幅60mm
耐火被覆上端	グラファイト系加熱膨張材 (厚さ3mm)
免震装置-耐火被覆間充填材	グラスウール 16kg/m ³

4.2 火災継続時間の算定

ルートBの基準に従って、1階(免震層)の各火災室の火災継続時間を算定し、その最大値は53.35分となった。

4.3 保有耐火時間の算定

保有耐火時間は今回採用とほとんど同一条件の高減衰積層ゴムと耐火被覆材の組み合わせについて実施された加熱試験と加熱前後の復元力特性試験結果より求めた。

加熱試験方法は JIS A 1304 に準拠した3時間の加熱試験であり、同一仕様のA、B2体の試験体についてそれぞれ各部の温度が測定されている。各部の最高温度および到達時間を表-3に示す。

本加熱試験に用いられた免震装置は高減衰積層ゴム支承であり、積層ゴムの内部温度が高温となった試験体B

について履歴復元力特性試験が実施されている。

3時間加熱前後の試験結果を図-11に示す。3時間加熱前後とも荷重変形関係に違いはなく、上記の耐火被覆を施せば、標準加熱温度曲線に沿って3時間の加熱を受けても構造上支障がないと判断される。

以上より、免震装置と耐火被覆は3時間の保有耐火時間を有すると考えられる。

4.4 耐火性能の検証

耐火被覆を施した高減衰積層ゴム支承の保有耐火時間は180分であり、1階(免震階)火災室の火災継続時間を越えており、耐火安全性が検証された。

表-3 各部最高温度及び到達時間

温度測定位置	試験体A	試験体B
被覆ゴム表面温度(°C)	91(113分)	81(109分)
積層ゴム内部温度(°C)	10mm	49(134分)
	20mm	36(130分)
	30mm	35(537分)
ケイ酸カルシウム板裏面温度(°C)	164(207分)	275(271分)
アンカーボルト(°C)	58(461分)	75(248分)
フランジ(°C)	60(151分)	79(231分)

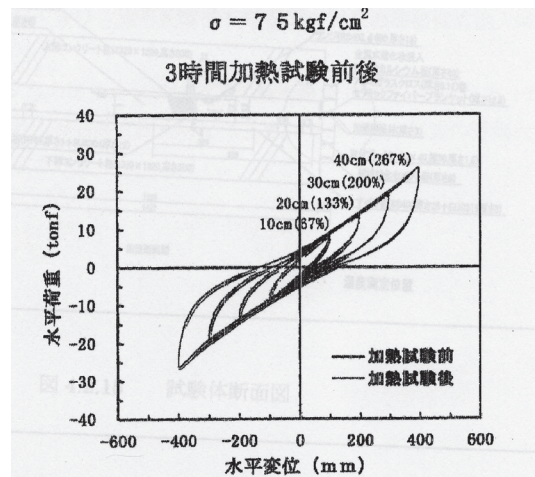


図-11 試験前後の履歴復元力特性

5. 解体工法の騒音対策

施工計画に先立って、東京本社ビルと同一構造の柱、壁試験体を使用して解体時の騒音対策について実験的に検討した。その詳細は参考文献2)に述べているのでここではその概要を述べる。

5.1 実験概要

技術研究所の床衝撃音試験体屋上部に柱壁よりなる切断用試験体を製作し、切断状況の確認、切断作業近傍および階下に設けた各室における騒音の計測を行った。実験状況を写真-1~写真-3に示す。

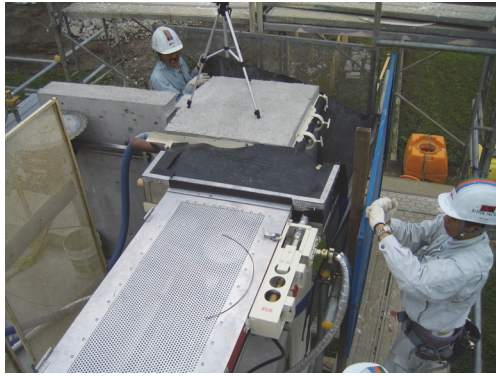


写真-1 ワイヤソー（空冷）



写真-2 ワイヤソー（水冷）



写真-3 ウォールソー（水冷）

5.2 実験結果

各測定点における騒音レベルを図-12 に示す。音源近傍の騒音レベルは打撃工法（ブレーカ）は 93dBA、切削工法は空冷コア抜き以外では 85～90dBA で約 8 dBA 程度打撃工法より低い。また、切断作業直下のG室では、打撃工法の騒音レベルは音源近傍よりも増加傾向にあり、切削工法では 15～20dBA 低減する。さらに、切削工法の騒音レベルはE室やA室などの階下の離れた室では 20～30dBA 程度の低減が見られる。

以上より、切削工法の採用により上下階や隣室への騒音伝播を大幅に低減できることがわかり、空冷式切削工法を中心として解体作業を実施することとした。具体的

工事における騒音については参考文献 2) を参照されたい。

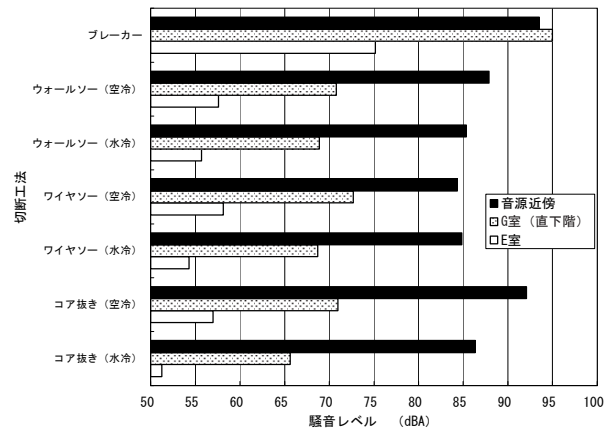


図-12 各測定点における騒音レベル

6. おわりに

既存建物に免震レトロフィット工事を適用し、上部構造の層せん断力係数は、当初設計の 50%程度まで抑えることができた。その実現を通じて以下の成果が得られた。

- i. 適切な地震動を用いた地震応答解析による免震化効果の把握と免震層変位を許容以下とする構造設計法
- ii. 工事中の耐震安全性を考慮した効率的な免震装置設置方法と建物を使用しながらの工事におけるゾーン計画方法
- iii. 仕様規定が適用できないことによる免震装置周辺の高度な耐火性能検証方法
- iv. 切削式解体工法を採用した、建物内業務を継続しながら施工が可能な低騒音・低振動工法

7. あとがき

東京本社ビルは免震レトロフィットにより、防災拠点に必要な耐震性能を備えた建物に生まれ変わった。この技術を重要施設を中心とする様々な建物に適用し、社会資本の効率的な保全に役立たせたい。

【参考文献】

- 1) 国土交通省住宅局指導課、「2001 年度版耐火性能検証法の解説及び計算例とその解説」、平成 13 年 3 月
- 2) 稲留康一、茂木正史、起橋孝徳、柳沼勝夫、「免震レトロフィットに伴う解体工法の騒音に関する検討」、奥村組技術研究年報 No. 33, pp. 83-88, 2007. 7