国立西洋美術館本館保存免震レ
トロフィット
—構造設計—

林 理 ——*1 伊藤昭浩 ——*2 阿部文昭 ——*3
中村康一 ——*4 持田泰秀 ——*5

キーワード：
既存建物、保存、免震レトロフィット、基礎免震

Keywords :
Existing building. Preservation. Seismic isolation retrofit. Baseisolation

SEISMIC ISOLATION RETROFIT TO PRESERVE THE NATIONAL MUSEUM OF WESTERN ART —Structural design—

Tadashi HAYASHI —* 1 Akihiro ITO ———* 2 Fumiaki ABE —* 3
Yasukazu NAKAMURA* 4 Yasuhide MOCHIDA* 5

Taking into account the earthquake-resistant design standards in effect when the building was designed, new earthquake-resistant design criteria were established for the retrofit, to check the earthquake-resistant safety of the retrofit design. Structural and functional considerations led to a choice of laminated rubber for the isolator material. The results of vibration analysis using a mass system model demonstrated that the earthquake motion input into the building would be reduced substantially by the retrofitwork. It was also shown that the work would substantially meet the earthquake-resistant design criteria. Three-dimensional vibration analysis was also carried out using a solid frame model to calculate the margin of safety of each structural member would be earthquake-resistant.

1. はじめに

東京上野の国立西洋美術館本館は印象派のコレクションと共にル・コルブジエの設計した建築物（本館）により広く知られている。1993年から美術館全体の再整備計画が検討され、その中では、本館の大地震に対する耐震性能の改善も課題となった。

本館の改修計画は、その文化的価値を考えると、耐震改修の構法選択に当たって、単に構造体の大きな損傷を防ぐだけでは不十分で、ル・コルビュジェのオリジナルデザインの継承、美術品の保護、来館者の安全の確保などの総合的検討の必要性が認識された。これらの条件を満足する計画を検討するため、建築史・構造の専門家、美術館、当初の設計に携わった関係者等からなる「国立西洋美術館本館等改修検討委員会」（委員長 岡田恒男 東京大学生産技術研究所教授 当時）を設置し、慎重に検討を行った。耐震補強としては、在来構法による補強で耐震安全性の確保と共に、オリジナルデザインを出来る限りそこなわない方法として、耐震壁新設主体の強度型補強案と既存柱梁補強主体のじん性型補強案の2案を検討したが、機能的確保及びオリジナルデザインの保存という要求を満たすことは困難と考えられ、免震構法による改修方法が提案された。建設省関東地方建設局では、施工性や経済性も合わせて総合的に検討した結果、保存免震レトロフィットを採用することとし、免震構造評定を取得し工事実施したものである。本報告は、その構造設計内容を報告するものである。

2. 原設計概要

原設計当時の構造設計は、その建物のデザインの特徴と地震国である日本の耐震基準とを両立させるために、詳細にわたり各所に当時としての工夫がされている。その特徴は、材料として丸柱にスパイラルフープを用いていること、部材として照明ギャラリーを吊す150φのRC柱を使用していることがあげられる。その後、構造的改修として、1977年の新館増築時に本館収蔵庫部分の壁の撤去、1993年に外壁PC版の軽量化が行われている。設計当時の構造概要を以下に、図1に改修後建物1階伏図、図2に改修後建物軸組図を示す。

図 1 改修後建物 1階伏図(見下げ)

圖 2 改修後建物軸組圖

*1 建設省関東地方建設局営繕部 計画第一課長
(〒100-0004 東京都千代田区大手町1-3-1)

*2 建設省関東地方建設局営繕部 建築第一課構造係長

*3 (株)横山建築構造設計事務所 設計室長
*4 清水建設(株)設計本部構造設計部1部 副部長
*5 清水建設(株)設計本部構造設計部1部

*¹ Manager, 1st Planning Div., Government Buildings Dept., Kanto Regional Construction Bureau, Ministry of Construction
*² Assistant Manager, 1st Building Div., Government Buildings Dept., Kanto Regional Construction Bureau, Ministry of Construction
*³ Chief Engineer, Yokoyama Consulting Structural Engineers
*⁴ Deputy General Manager, Structural Design Dept., Shimizu Corporation
*⁵ Senior Engineer, Structural Design Dept., Shimizu Corporation

設計当時の構造概要

基礎：直接基礎 支持地盤：関東ローム層
 長期耐力：15.0t/m² 構造：鉄筋コンクリート構造
 構造形式：XY方向共RC耐震壁付ラーメン構造
 使用材料：普通コンクリート $F_c=180 \text{ kg/cm}^2$
 鉄筋 SR24 (9φ~22φ)

3. 地盤概要

土質は地表面より、関東ローム層／洪積層上部砂層／洪積層粘性土層／洪積層下部砂層の構成である。地下水位はG.L-18mであり、液状化の恐れはない。常時微動測定結果によると、地盤の卓越周期は0.36秒、第二種地盤相当である。今回の改修後も、基礎は関東ローム層と一部砂層を支持地盤とした直接基礎（マツスラブ）とした。

4. 躯体の劣化状況

・コンクリート圧縮強度調査および中性化調査

壁のコア抜きによる圧縮強度試験の結果、平均値 254 kg/cm^2 となり設計基準強度 180 kg/cm^2 を十分満たしている。また、屋外打ち放し部は表面より10~14mm中性化しており、内部の鉄筋は部分的ではあるが若干の錆が生じていた。室内の仕上げのないコンクリート部は、コア抜きによる調査を行った。その結果、表面より14~34mm中性化していた。

・構造体のひび割れ状況

打ち放しコンクリートの柱には、ひび割れは観察されなかった。一方、大梁には、部分的な曲げ応力によるひび割れが観察された。現時点において、スラブのたわみ等による障害も観察されず、建物全体として、有害なひび割れは生じていないものと推察される。

・調査のまとめ

この建物は、竣工より37年経過していたが、経年による有害な劣化は見られなかった。従って、現状においては新築時とほぼ同程度の耐力を有していると想定される。今回、将来の対応のため、屋外の打放し面である2階外部軒裏とR階柱梁接合部にフッ素系撥水材の塗布、及び室内の比較的亀裂幅の大きいクラックに対してエポキシ樹脂注入を行った。

5. 耐震診断

本館は、1959年の竣工から数度の改修を行っており、現時点における、また現行基準による耐震性能を把握し、改修計画の方針を決定するために耐震診断を行った。耐震診断は、「官庁施設の耐震点検・改修要領」（建設大臣官房官庁営繕部監修 1987年：公共建築協会）に基づき、条件として劣化係数 $U=0.9$ 、重要度係数 $I=1.1$ （Ⅱ類）として診断した。その結果、「緊急に耐震改修を行うべき建物」の判定となった。

したがってこの建物の重要性を考慮した慎重な補強方法の検討が必要となった。

6. 免震補強設計

(1) 設計方針

本設計では、建設当時の建築基準法・同施行令・同関連告示及び通達に準拠し設計されている既存部分と地下の増築部分を一体化させた構造体に対し、建物の使用期間中に想定される地震動に対する耐震安全性を確認することとした。第一に、既存部分が建設当時の基準により設計されていることに鑑み、地下1階を含む全階についてせん断力係数0.2の設計用地震荷重を設定する。この荷重による応力解析結果に基づき、各部材の応力度が短期許容応力度以下となっていることを断面検定により確認することとした。第二に、地震動の強さを免震層下部における最大速度値により基準化し、25cm/s及び50cm/sの2つのレベルについて、各種地震動による地震応答解析を行い、建物に作用する層せん断力及び最大変位を表1に示すクライテリアを満足することを確認すること

とした。最大変位については、本建物と周囲の既存建物のクリアランスが40cm程度しか確保できないことも考慮し設定したものである。

表 1 改修設計のクライテリア

レベル (入力最大速度)	上部構造	免震部材	設備配管・電気配線
レベル1 (25 cm/s)	全部材が短期 許容応力度以内	—	無被害
レベル2 (50 cm/s)	全部材が弾性 耐力以内	最大相対変位30cm 程度、免震部材に引き 抜きが生じない	雑排水等重要度の低い 配管では被害を認 める。但し、給水管 等重要度の高い配管 は無被害とする

(2) 免震部材の設計

免震部材の仕様は、本建物の地下が複雑な形状をしていることから、部材の設置場所が限られるため、上部構造の支承機能とダンパー機能が一体となったものとし、さらに、構造機能上、中小地震動時より免震効果を発揮させることが可能なものとして、高減衰積層ゴムを採用することとした。本建物に適用する免震部材の設計目標を表2に示す。また、免震部材に加わる鉛直荷重および面圧を図3に示す。

表 2 免震部材の設計目標

項目	内容
水平方向固有周期	中地震動時 $T=2.0 \text{ sec}$ 程度 大地震動時 $T=2.5\sim3.0 \text{ sec}$ 程度
垂直方向固有振動数	10 Hz以上
積層ゴム面圧	100 kg/cm^2 以下
積層ゴム変形能力	40 cm程度

図 3 免震部材に加わる鉛直荷重および面圧

(3) 質点系振動解析

解析モデルは、X及びY方向について図4に示すような各階床位置に質量を集約した4質点等価せん断型モデルとした。免震層より下部の基礎部分は十分剛となるように構築するため、本モデルでは積層ゴム下部位置を固定とし、地震動の入力位置とした。また、上部構造は、静的弾塑性解析の結果から、レベル2時の層せん断力が作用した場合にも十分弾性的な挙動を維持するため、線形モデルとした。免震層は高減衰ゴムのせん断履歴特性を実験式に基づく非線形モデル（菊地モデル²⁰⁰⁴）とした。減衰は、基礎固定時の上部構造の1次モードに対して $h=1\%$ とする剛性比例型とした。

図4 解析モデル図

表3 固有周期一覧表

ケース	方向	次数	固有周期(sec)	刺激係数
上部建家 1階床 位置固定	X方向	1次	0.20	1.2318
		2次	0.08	0.4630
		3次	0.04	0.0819
	Y方向	1次	0.18	1.2257
		2次	0.07	0.4284
		3次	0.03	0.0710
積層ゴム支持時 (積層ゴム剛性は 水平変位10cm 等価剛性)	X方向	1次	2.17	1.0070
		2次	0.16	0.0075
		3次	0.08	0.0010
	Y方向	1次	2.17	1.0055
		2次	0.14	0.0059
		3次	0.07	0.0007
積層ゴム支持時 (積層ゴム剛性は 水平変位20cm 等価剛性)	X方向	1次	2.65	1.0047
		2次	0.16	0.0050
		3次	0.08	0.0007
	Y方向	1次	2.65	1.0037
		2次	0.14	0.0039
		3次	0.07	0.0005

表4 入力地震動一覧表

波名	観測波最大加速度 (cm/s ²)	*A/V比 (1/s)	入力最大加速度(cm/s ²)		総断時間 (s)
			25cm/s	50cm/s	
ELCENTRO 1940 NS	341.70	10.215	255.38	510.75	40.00
TAFT 1952 EW	175.95	9.933	248.33	496.65	40.00
HACHINOHE 1968 NS	225.00	6.602	185.05	330.10	36.00
TOKYO101 1956 NS	74.00	9.699	242.00	485.00	12.00

*A/V比とは、観測波の最大加速度と Trifunac の方法で積分した最大速度の比を示す。

建物の固有周期一覧表を表3に、入力地震動一覧表を表4に示す。解析手法は、直接積分法による非線形時刻歴応答解析とする。レベル2の解析結果を、図5最大応答加速度(X方向)、図6最大応答水平変位(X方向)、図7最大応答せん断力(X方向)、表5最大応答層せん断力係数(50cm/s入力)に示す。尚、標準装置剛性とは、標準温度での剛性を表す。

表5 最大応答層せん断力係数
(50cm/s入力, 単位 ton 標準装置剛性)

入力波	X方向		Y方向	
	1階	3階	1階	3階
EL CENTRO	0.127	0.132	0.127	0.134
TAFT	0.117	0.119	0.117	0.118
HACHINOHE	0.121	0.127	0.121	0.125
TOKYO101	0.095	0.102	0.096	0.106

図5 最大応答加速度(X方向・標準装置剛性)

図6 最大応答水平変位(X方向・標準装置剛性)

図7 最大応答せん断力(X方向・標準装置剛性)

(4) 立体骨組振動解析

今回の改修目的の一つに「建物の保存」があることと、免震部材の設置レベルが異なること、中央に吹き抜けの空間があることを考慮し、また各々の部材の安全性確認のために、建物を3次元のままモデル化した部材系立体振動解析を行った。その結果により、各部材の余裕度を求め、全部材の耐震安全性の確認を行った。解析モデルは、積層ゴム下部位置を固定とした立体解析骨組系モデルとし、図8に示す。上部構造は、柱・梁・耐震壁のすべてに非線形性を考慮することとした。また、免震層については、高減衰ゴムのせん断履歴特性を、実験式に基づく菊地モデルとした。解析上の仮定を表6に、入力地震動を表7に示す。解析結果を図9最大応答加速度(X方向)、図10最大応答水平変位(X方向)に示す。地震応答解析結果による降伏耐力に対する比を図11B通り耐力比図に示す。梁部材については、曲げ降伏耐力に対する最大応答曲げモーメントの比を示し、耐震壁については、せん断降伏耐力に対する最大応答せん断力の比を示している。さらに、各部材の時刻歴応答結果を図12柱のM-N時刻歴応答結果図、図13耐震壁の $\tau-\gamma$ 時刻歴応答結果図に示す。

図8 立体解析骨組系モデル
(固有モード図、ねじれ方向1次)

表6 解析上の仮定

項目	仮定
床の剛性	床面ブレースに置換
柱梁接合部	剛域を仮定
降伏判定	剛域減衰
鉄筋の材料強度	基準強度の1.1倍
大梁の曲げ剛性	剛性割増として両側スラブ付き2.0 片側スラブ付き1.5
上部構造の減衰	内部減衰型、積層ゴム上部を固定とした建物 水平剛性の1次固有振動数に対する減衰定数 を1%とする剛性比例型
柱・梁の曲げ特性	Degrading Tri-Linear
耐震壁	ブレース置換とし、せん断特性はブレース、 曲げ特性は側柱

表 7 解析ケース毎入力地震動一覧表

解析ケース	入力波名	入力方向 (gal)	最大加速度 (秒)	継続時間
建築センター 模擬波 Y方向入力	建築センター 模擬波 (レベル2)	Y	355.7	60.0
建築センター 模擬波 45°方向入力	建築センター 模擬波 (レベル2)	X	251.5	60.0
	建築センター 模擬波 (レベル2)	Y	251.5	60.0
EL CENTRO 水平2方向入力	ELCENTRO 1940 EW	X	314.2	40.0
	ELCENTRO 940 NS	Y	511.0	40.0
EL CENTRO 3方向入力	ELCENTRO 1940 EW	X	314.2	40.0
	ELCENTRO 1940 NS	Y	511.0	40.0
	ELCENTRO 1940 UD	Z	308.5	40.0

入力地震動は、入力レベルを最大速度50 cm/s (レベル2) に標準化した
EL CENTRO (1940) 波と建築センター模擬波 (レベル2) の2波とした。

図 9 最大応答加速度 (X方向・標準装置剛性)

図 10 最大応答水平変位 (X方向・標準装置剛性)

図 11 B通り耐力比図 (EL CENTRO(1940)波 3方向入力)

図12 柱のM-N時刻歴応答結果図
(EL CENTRO(1940)波 3方向入力・1階1-A柱)

図13 耐震壁のτ-γ時刻歴応答結果図

(建築センター模擬波 (レベル2) Y方向入力・1階 6通り D-E間)

7. まとめ

・質点系振動解析 最大層せん断力係数は、2.5 cm/s 入力ではX方向 0.088、Y方向 0.077 となり、いずれの地震動においても上部構造の最大応答せん断力は設計用せん断力を下回っている。5.0 cm/s 入力でも、最大層せん断力係数はX方向 0.132、Y方向 0.134 でいずれの地震動においても設計用せん断力を下回り、十分に各部材は弾性耐力以内になっている。また、免震層の最大応答水平変位は最大で22.2 cmであり、30 cm以内であることが確認された。以上の地震応答解析結果、設定した耐震性能目標をすべて満足しており、本建物が十分な安全性を確保していることを確認した。

・立体骨組振動解析 質点系振動解析の結果と比較すると、ねじれ成分の応答が影響し、X・Y方向の最大応答せん断力、最大応答変位が増加する結果となった。最大応答に対する各構造部材の状況は、梁については一部曲げひび割れの生じる部分があったが、クラック発生程度で概ね弾性範囲内にある。終局せん断耐力に対し最大応答せん断力の比は最大で0.56、せん断ひび割れ耐力に対する比の最大は0.78であり、せん断破壊している部材は存在していない。柱については、すべての部材が弾性範囲内で、ひび割れも生じていない。終局せん断耐力に対する最大応答せん断力の比の最大は0.29、せん断ひび割れに対する比の最大は0.35であり、せん断に対しては十分な余裕を有している。上下動についても悪影響は見られず、軸力に対しても十分な余裕を有している。耐震壁については、1階及び2階の一部で耐震壁にせん断ひび割れが生じるが、せん断破壊している部材はない。終局せん断耐力に対する最大応答せん断力の比は最大値で0.54となっていた。部材系立体振動解析により、各構造部材に非線形を考慮した応答解析を行った結果、各構造部材それぞれについて耐震安全性の確認を行うことができ、本建物が十分な耐震安全性を確保していることを確認した。

謝辞

本論作成にあたって当時メンバーとして参加されていた、以下の諸氏 (当時の役職名) の御尽力と功績に、感謝の意を表します。検討委員会の岡田恒男委員長をはじめとする諸先生方、建設省関東地方建設局管轄部建築第一課構造係長 森廣 和幸氏、(株) 横山建築構造設計事務所・林 省吾氏、清水建設 (株) 設計本部構造設計部 1 部 宮下 茂氏、同 佐藤宗生氏

参考文献

- 1) 国立西洋美術館本館等改修検討委員会報告書 (1996年2月)
- 2) (社) 公共建築協会、建設大臣官房官庁営繕部監修: 官庁施設の総合耐震計画標準/官庁施設の耐震点検・改修要領 (1987年2月)
- 3) 森廣 和幸: 「国立西洋美術館本館のレトロフィットについて」 第50回建設省技術研究会論文集、P107~112 (1996.11)
- 4) 菊地 優: 建物免震用積層ゴムの復元力特性に関する研究 構造工学論文集、Vol. 40B、1994. 3

[1998年 3 月30日原稿受理 1998年 7 月 8 日採用決定]