

開東閣の免震レトロフィット

三菱地所
加藤 晋平



同
増田 直巳



同
平川 倫生



1. はじめに

開東閣は、岩崎家の高輪別邸として、英国人ジョサイア・コンドルが設計し、明治41年に竣工した英国の建築様式を取り入れた煉瓦造の建物である。主要施設である本館と附属施設である別館とからなり、渡り廊下で結ばれている。

本建物は、大正12年の関東大震災時には軽微の被害を受け、昭和20年の東京大空襲によって屋根及び内部が焼失している。その後昭和36～39年に三菱地所建築部で、外観の原型を残し内部を全面復旧改装し、その際に別館の一部をRC造で増築している。

平成7年の阪神淡路大震災を契機に耐震診断を行った結果、耐震補強が必要であることが判明した。各種補強方法を検討し、ジョサイア・コンドルが設計した、数少ない現存する建物として、出来るだけ内外観を損なわないよう、主要施設である本館は免震レトロフィット工法を採用した。附属施設である別館は、機械室及び厨房等にRC耐震壁を増設する補強工法を採用している。

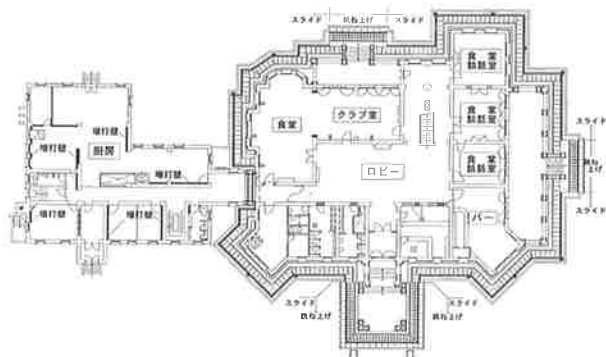
2. 建物概要

補強前建物概要

所在地	東京都港区高輪 4-25-33
用途	特定集会室
設計者	ジョサイア・コンドル
施工者	三菱社
規模	建築面積 1,426.04 m ² 延床面積 3,386.63 m ² 地上3階、軒高 12.88m
構造種別	煉瓦造
構造形式	壁式構造
基礎形式	直接基礎
竣工	1908年1月

補強後建物概要

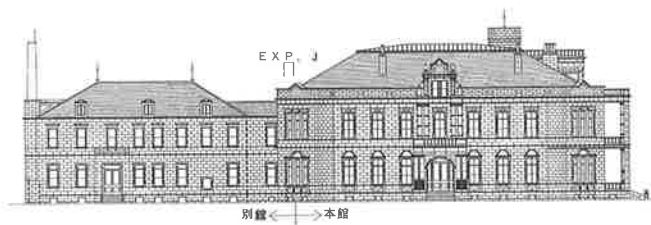
補強設計者	三菱地所株式会社一級建築士事務所
施工者	大林組・三菱建設共同企業体
工事期間	2000年2月～2001年5月
補強概要	(本館)免震レトロフィット工法 (別館)RC耐震壁補強



平面図



建物外観



立面図

3. 建物調査

本建物の耐震性能及び耐久性能を把握し、耐震改修のための基礎的資料を作成することを目的とし、以下に示す項目について、調査を行った。結果の概要を併せて示す。

(1) コア抜き調査

構造体煉瓦コア10体、基礎コンクリートコア6体のコア抜きを行い、材料強度を調べた。これらの結果から、耐震診断及び耐震補強の際の材料強度を決定した。

(2) 躯体寸法調査、図面照合調査、基礎形状調査

建物形状、躯体寸法、基礎形状、基礎深さの計測を行い、改修計画に反映させた。

(3) 常時微動測定

建物内4点、建物周辺地盤上3点の計7点で常時微動測定を行った結果から、本建物の固有周期は、X方向0.147秒、Y方向0.151秒であることが分かった。これは建物を純せん断モデルと仮定し、せん断剛性 $G = 12,000 \text{ kgf/cm}^2$ を用いて推定した固有周期とほぼ一致する。この結果は、既存建物のモデル化に反映させる。

(4) 煉瓦の積み方調査

(5) 地盤の平板載荷試験

(6) 非構造部材、仕上材の劣化調査、設備機器の耐震調査

4. 構造計画概要

(1) 構造計画

本建物は昭和36年～39年の改修補強工事で、開口部廻りおよび煉瓦壁頂部等で部分的に鉄筋コン

クリートにて補強が施されている。また、上部構造の層の弾性限耐力を算定した結果、ベースシヤ係数で、X・Y両方向共0.16程度であることが判明した。そこで、内外観を損なわないように基礎部に免震装置を組み込み、免震化することにより地震入力を低減させ、建物の耐震性能を向上させる。また別館については I_s 値が目標 I_s 値に近いため、RC耐震壁増設による補強とする。なお、別館と本館は、エキスパンションジョイントにて切り離す。

(2) 目標耐震性能

地震動の強さに3つのレベルを想定し、時刻歴地震応答解析を行い、表-4-1に示す目標耐震性能に基づき上部構造、免震装置および基礎構造の評価・判定を行う。設計用入力地震動の強さは、レベル1、レベル2、安全余裕度検討用地震動とし、それぞれ最大入力速度値を25.0cm/s、50.0cm/s、75.0cm/sとした。

表4-1 目標耐震性能一覧

地震動レベル	レベル1 (25cm/s)	レベル2 (50cm/s)	余裕度検討用 (75cm/s)
カテゴリ	C1	C2	C2
上部構造	層間変形角 $\leq 1/4000$ 短期許容応力度以内	層間変形角 $\leq 1/2000$ 弾性限耐力以内	層間変形角 $\leq 1/1000$ 保有水平耐力以内
免震装置		安定変形以内 (30.0cm以下)	性能保証変形以内 (41.0cm以下)
下部構造 (補強梁)		短期許容応力度以内	弾性限耐力以内
基礎構造		短期許容支持力以下	短期許容支持力以下

5. 補強設計

(1) 免震装置の設計

免震装置としては、天然ゴム系積層ゴムアイソレータ(600φ)を主に煉瓦壁交差部直下に計37基、弾性すべり支承は地震時に軸力変動の少ない部分に計14基設置した。また、減衰装置として鉛ダンパー(U-180)を計24基設置する。免震装置および減衰装置は、地震時にねじれないような平面配置とした(図5-1)。建物周囲は、免震層の水平変位に対してクリアランス50.0cm、鉛直変位に対してクリアランス5.0cmを確保するように計画した。

(2) 上部構造の補強設計

建物重量を免震装置を介して基礎に伝達させるために、基礎煉瓦壁両側に鉄筋コンクリート造（断面50cm×90cm）の補強梁を設け、それらをP C鋼棒にて締め付けることにより煉瓦壁と一体化させる補強を行う（図5-3参照）。また、1階床下に鉄骨小梁を新設し、これまで1階床を支持していた煉瓦束柱を撤去する。屋根面には水平剛性確保のため、煉瓦壁頂部の鉄筋コンクリート補強部に鉄骨ブレースを新設する。

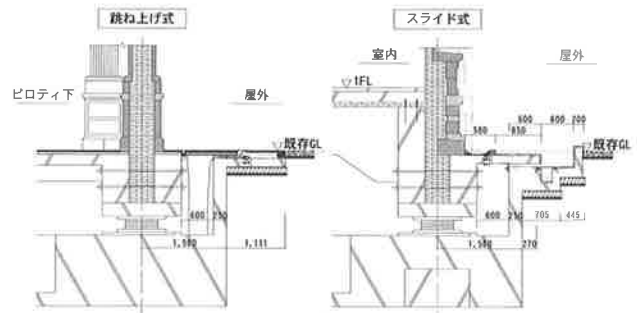


図5-3 1階補強梁形状と基礎形状

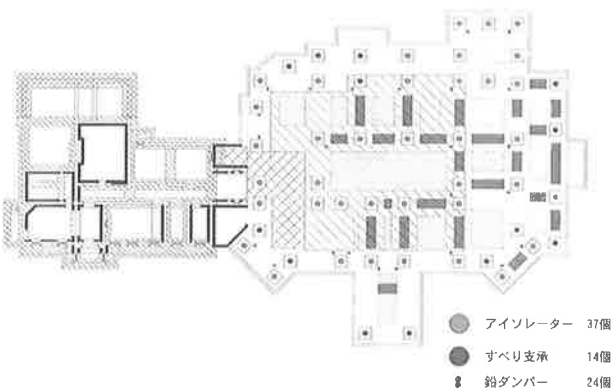


図5-1 免震装置の配置

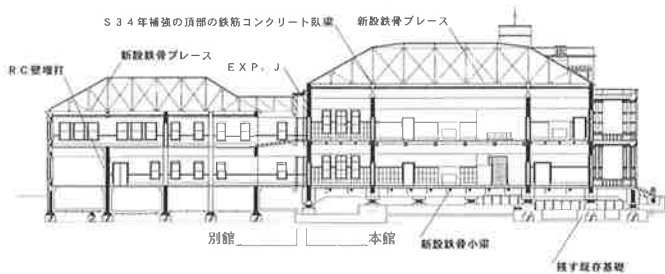


図5-2 断面図

(3) 基礎構造の設計

基礎形式はGL-2.3m以深の関東ロームを支持層とする直接基礎（鉄筋コンクリート造布基礎）を新設する。（長期許容支持力度15.0 t/m²）

布基礎は、格子状に配置し、不同沈下が生じないように鉛直方向に十分な剛性を確保する。また、基礎間には厚さ25cmの底版（土間コンクリート）を設け、水平剛性を確保する。

既存建物基礎で利用できる部分については、できる限り既存基礎を残す計画とした(図5-3)。

(4) 検定用および設計用地震力

既存の煉瓦造上部構造の検定用地震力と下部構造（1階 RC 補強梁）の設計用地震力は、予備地震応答解析を行った結果、1階と2階の層せん断力係数で、レベル1、レベル2において、それぞれ0.088、0.16とした。

(5) 応力解析および断面検定

上部構造の応力および変形の解析は、長期荷重及び上記の地震力に対して行った。解析法は立体フレームマトリックス法による。各部材を線材置換した骨組モデルとし、全架構を剛床とする。上部架構の支持条件は、1階柱下部に免震装置を配置する箇所を支点とし、免震装置の鉛直方向ばねを考慮して、解析を行った。

コア抜き取り調査の結果より、本建物の煉瓦部材の引張強度、せん断強度、圧縮強度を表5-1のように定め煉瓦部材の断面検定を行った。

表5-1 煉瓦部材の許容応力度(kgf/cm²)

	圧縮	せん断	引張(鉛直)	引張(水平)
長期	39.1	3.90	1.40	3.90
短期(レベル1時)	58.7	5.80	2.10	5.80
降伏(レベル2時)	88.0	8.70	3.15	8.70

その結果、表4-1の目標性能を満足することを確認した。また、本設計においては、有限要素モデルにより解析、検討を行い、線材置換モデルの妥当性を確認した。解析モデルの形状と結果の一部のイメージを図5-4に示す。

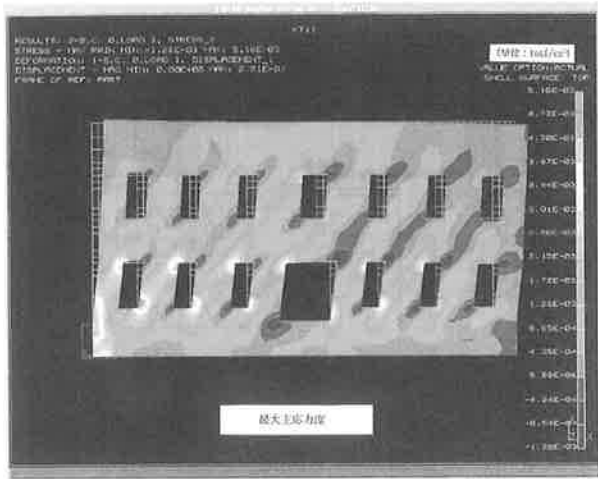


図5-4 FEM解析モデル

6. 振動解析モデル

時刻歴地震応答解析を行うにあたり、下記の条件を仮定し、建物をモデル化した。

- ・ 上部構造を3質点等価せん断型弾塑性モデルとする。免震層は①天然積層ゴム、②弾性すべり支承および③鉛ダンパーの並列ばねとする。(図6-1、表6-1参照)

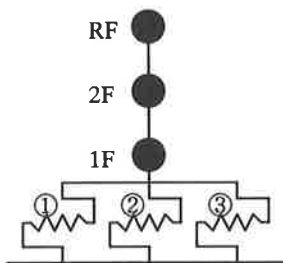


図6-1 解析モデル

- ・ 減衰は内部粘性型による他、上部構造は1階固定時の1次固有振動モードに対し3%の初期剛性比例型とし、免震層は、0%とする。

既存躯体の復元力特性はTri-linear型とし、次のように定めた。

- ・ 1次剛性(K_1)は建物調査結果を踏まえ、煉瓦目地のせん断剛性 $G=12,000\text{kgf/cm}^2$ とし、定めた。また第1折れ点は、弾性限耐力(Q_c)とした。ここでは、煉瓦各部材(壁または梁)が最初に降伏する時の、

各階の煉瓦壁のせん断力の合計を弾性限耐力と定義した。

- ・ 第2折れ点は保有水平耐力(Q_y)とした。ここでは、水平加力時にある煉瓦壁が最初に浮き上がりが生じた時の各階煉瓦壁のせん断力の合計を保有水平耐力と定義した。また、第2折れ点の変形を、 $1/500$ とし、2次剛性(K_2)を定めた。

表6-1 免震装置の諸元

天然積層ゴム	水平剛性	0.72 tf/cm
	鉛直剛性	1960 tf/cm
	装置高さ	281mm
鉛ダンパー	1次剛性	12.0 tf/cm
	2次剛性	0.0 tf/cm
	降伏耐力	7.5 t
弾性すべり支承	1次剛性	2.02 tf/cm (300φ) 2.51 tf/cm (400φ) 3.93 tf/cm (500φ)
	2次剛性	0.0 tf/cm
	鉛直剛性	1740 tf/cm (300φ)
		2060 tf/cm (400φ)
		3320 tf/cm (500φ)
	動摩擦係数	0.16

表6-2 上部構造の復元力特性

階	方向	重量 (ton)	K_1 (t/cm)	K_2 (t/cm)	Q_c (t)	Q_y (t)
2	X	1863.3	9139.6	312.9	336.7	699.0
	Y	1863.3	9513.2	373.6	317.4	751.3
1	X	2136.2	11486.6	785.4	660.3	1433.9
	Y	2136.2	11157.3	866.5	652.3	1504.9

また建物の固有値解析の結果を表6-3に示す。1階床下固定時の固有周期が、常時微動測定から求めた固有周期とほぼ一致していることから、ここのモデル化は妥当であると考えた。

表6-3 固有値解析結果

方向	字数	1階床下固定時		免震装置挿入時 (せん断歪み 200%)	
		固有周期 (sec)	刺激係数	固有周期 (sec)	刺激係数
X	1次	0.1378	1.205	2.613	1.002
	2次	0.0569	0.316	0.098	-0.002
Y	1次	0.1384	1.199	2.613	1.002
	2次	0.0564	0.295	0.098	-0.002

7. 時刻歴応答解析

上部構造の層間変形角および免震装置の変形が表4-1の目標性能を満たすことを確認するために、時刻歴応答解析を行った。入力地震波の一覧を、表7-1に示す。

表7-1 入力地震動一覧

	レベル1			レベル2		
	A_{max}	V_{max}	D_{max}	A_{max}	V_{max}	D_{max}
El Centro NS	255.4	27.12	6.70	510.8	54.25	13.39
Taft EW	248.3	22.54	7.62	496.6	45.09	15.25
Hachinohe NS	165.1	24.55	7.17	330.1	49.11	14.33
Takanawa 1(*1)	-	-	-	307.0	53.01	27.63
Takanawa 2(*2)	-	-	-	415.8	47.20	22.42

*1 関東地震の断層パラメータに基づき作成した模擬地震波
 *2 東京湾北部断層(仮想断層)のパラメータに基づき作成した模擬地震波

解析結果のうちレベル2時(ばらつき考慮せず)の最大応答せん断力、最大応答水平変位、及び最大応答加速度を図7-1~7-3に示す。また概要を表7-2に示す。

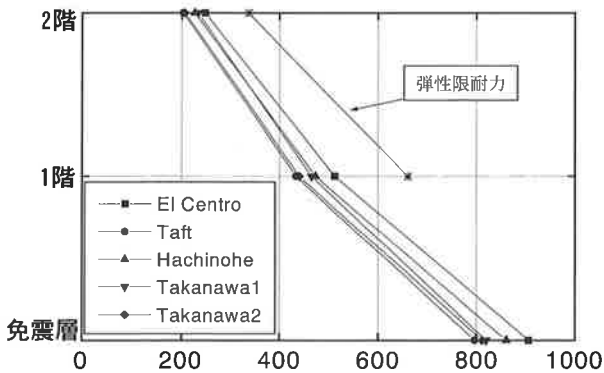


図7-1 最大応答せん断力(tonf)

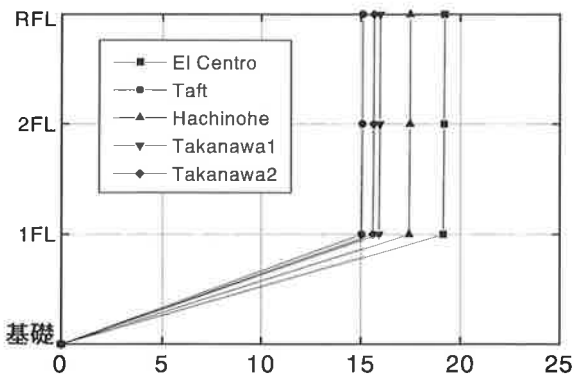


図7-2 最大応答水平変位(cm)

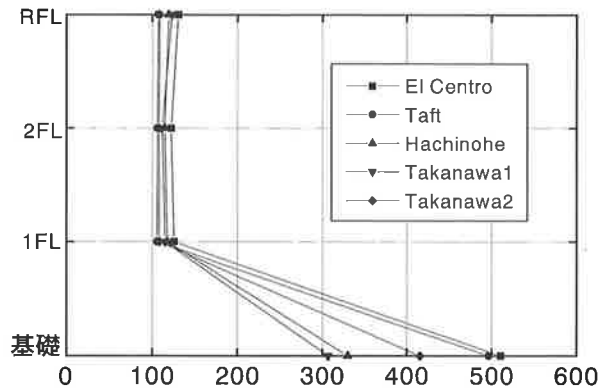


図7-3 最大応答加速度(gal)

表7-2 解析結果概要*

免震装置	最大相対変位(cm)	レベル	方向	値	地震動
			X方向	7.47	Taft EW
免震装置	最大せん断力係数	レベル1	Y方向	7.47	Taft EW
			X方向	25.1	Takanawa 1
		レベル2	Y方向	25.1	Takanawa 1
			X方向	0.081	Taft EW
上部構造	最大層間変形角	レベル1	Y方向	0.081	Taft EW
			X方向	0.144	Taft EW
		レベル2	Y方向	0.144	Taft EW
			X方向	1/17821	Taft EW
上部構造	最大層間変形角	レベル1	Y方向	1/17294	Taft EW
			X方向	1/10269	Taft EW
上部構造	最大層間変形角	レベル2	Y方向	1/9975	Taft EW
			X方向	1/9975	Taft EW

*ばらつきを考慮した結果も含めた値

以上の結果、免震装置の変形および上部構造の層間変形角が、表4-1の目標性能を満足することを確認した。

8. 施工計画概要

既存建物の1階床下に免震装置を設けるためには、床下煉瓦壁、布基礎の大部分を撤去し、場所によっては、基礎の下部を掘削する必要がある。そのため、次の点に注意して施工を行った。

- ・建物の沈下・不同沈下を極力抑え、建物に損傷を与えないこと。
- ・工事中に発生するかもしれない地震による水平力を上回る耐力を確保すること。

図8-1に免震化施工フローを示す。また地震対策としては、プレート式水平拘束材、及びリング式水平拘束材(写真8-1,8-2)を配置し、煉瓦壁と水平拘束材の耐力の合計が地震による水平力を上回るようにした。

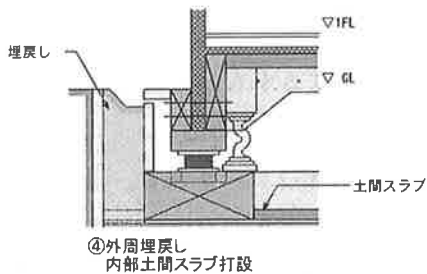
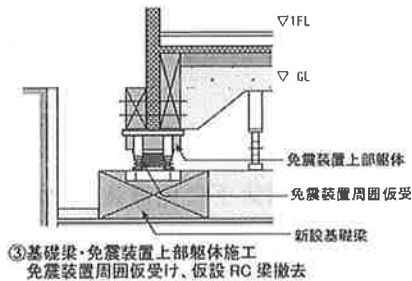
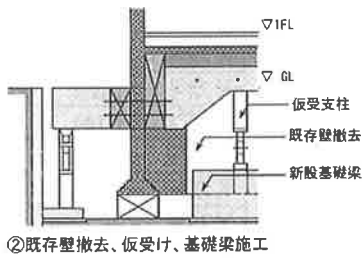
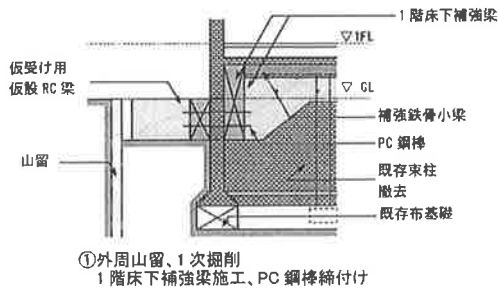


図8-1 免震化施工フロー



写真8-1 プレート式水平材拘束

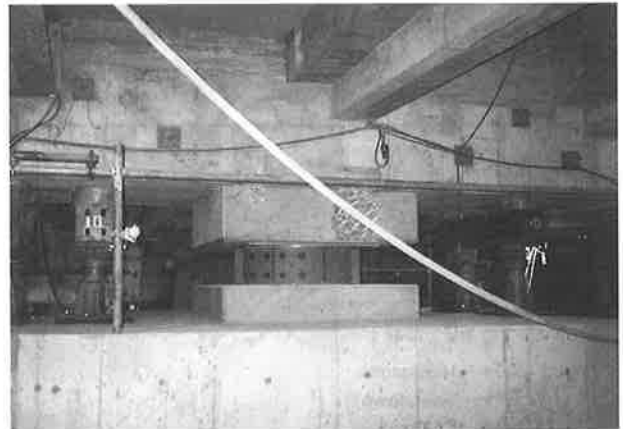


写真8-2 リング式水平拘束材

9. 終わりに

現地調査に基づく煉瓦造躯体の状況把握およびモデル化、既存基礎梁の補強方法、施工手順などの課題を解決し、免震レトロフィットによる耐震改修を行った。これにより、建物の内・外観を損なうことなく耐震性能を向上を図った。

本改修は平成11年11月にセンター評定を取得し、着工し、平成13年5月に改修完了予定である。