



煉瓦造建築物の耐震補強事例

FEM 解析を用いた耐震性能の検証

正会員 (株)構造計画研究所
構造技術部 設計リノベーション室
望月 滢

1. はじめに

煉瓦造建築物は、明治初期から大正にかけて文明開化の象徴として広く普及したが、濃尾地震、関東大地震を経て構造上の問題点が明らかとなったことを機に、その数を減らしていった。築 100 年を超え現存する煉瓦造建築物は、昨今その文化財的価値より保存を目的として耐震診断および補強の検討が広く行われているが、耐震改修促進法に基づく具体的な耐震診断方法が定められていないのが実状である。

ここでは、FEM 解析を用いた煉瓦造の耐震補強事例として、千葉県指定有形文化財である「三菱銀行佐原支店旧本館」の耐震性能検証方法を紹介する。

2. 建物概要

三菱銀行佐原支店旧本館は、千葉県香取市に位置する県指定有形文化財建築物である。

大正 3 年に、清水満之助本店（現清水建設）にて設計された煉瓦造 2 階建（2 階部分は回廊のみが存在）の建築物であり、現在は香取市の観光案内施設である街並み交流館の一部として使用されている。



写真 1 建物外観



写真 2 建物内観（回廊部）

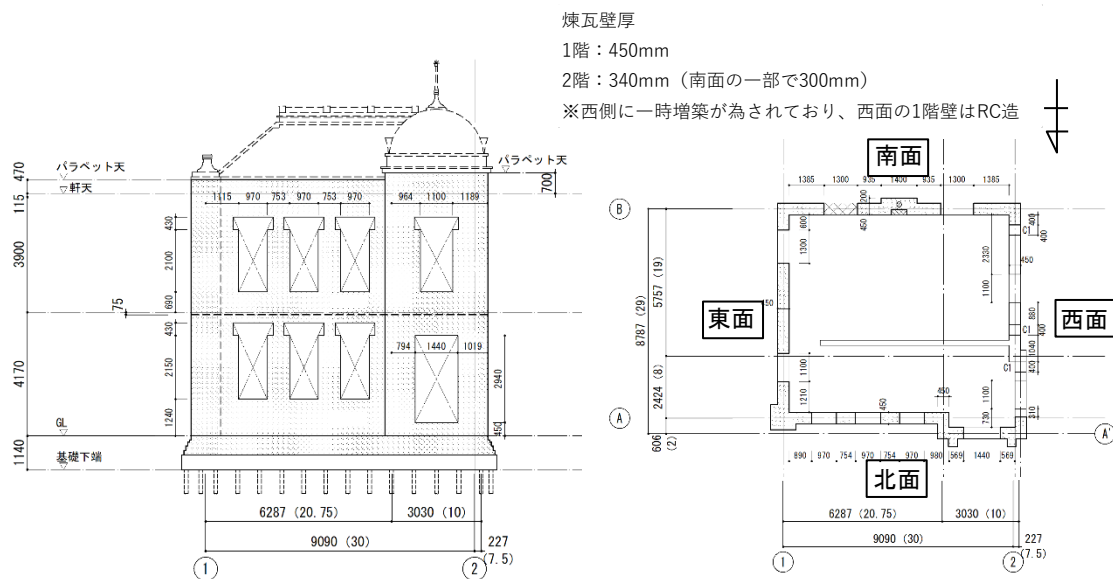


図1 北面軸組図

図2 1階伏図

平成 26 年に耐震診断を実施し、補強前の建物では所要の耐震性能を有していないことが明らかとなった。その後、文化財建造物としての長期保存を見据え、平成 27 年～29 年に耐震補強および建設当初の姿を復元するための改修設計を実施し、令和 4 年 3 月に改修工事が完了した。

3. 補強方針

本建物は、外周面に上下に並んだ縦長の開口部を複数有しており、耐力要素として寄与する壁面耐力が低いことから面内方向の耐震性能が不足することが明らかとなった。また、壁体の中間部および頂部に臥梁が設けられておらず、水平拘束能力が低いことから面外方向耐力が低く、面外方向の耐震性能が不足することが明らかとなった。

本建物の補強においては、文化財的価値を極力損ねないため、外観、内観に影響のない補強方法の採用が求められた。そこで、面内方向については、壁体内に鉛直方向に PC 鋼棒を挿入してプレストレスを導入することにより、壁体のせん断耐力を向上させる方法（以下、PC 補強とする）を採用した。

また、面外方向については、水平拘束トラスを回廊部および小屋裏部に設けることで、面外変形を抑える方法を採用した。水平拘束トラスは鉄骨造とすることで、将来的に別の補強方法が考案された際の可逆性に配慮するとともに、建設当初使用されていない部材をあえて用いることで、補強のために新設した部材であることが明確となるよう区別性にも配慮している。

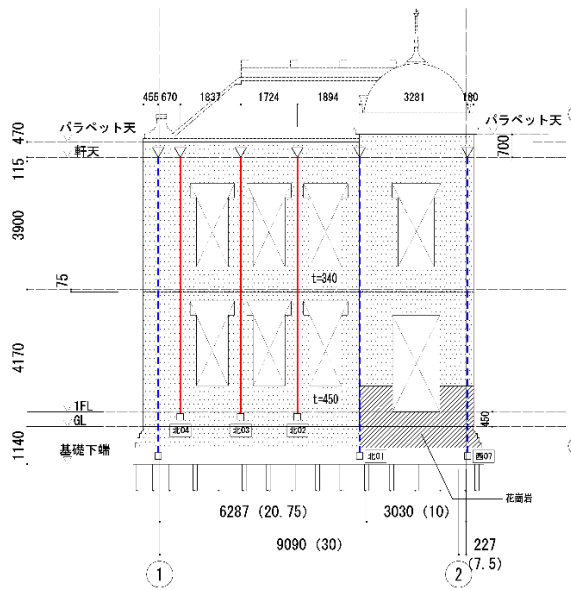


図3 北面補強軸組図

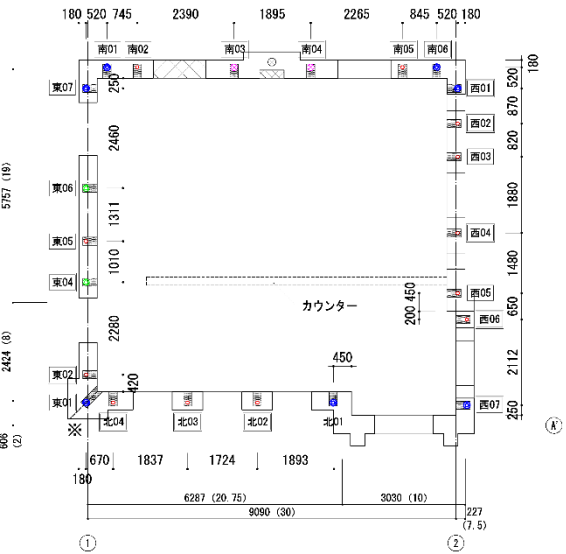


図4 1階PC補強伏図

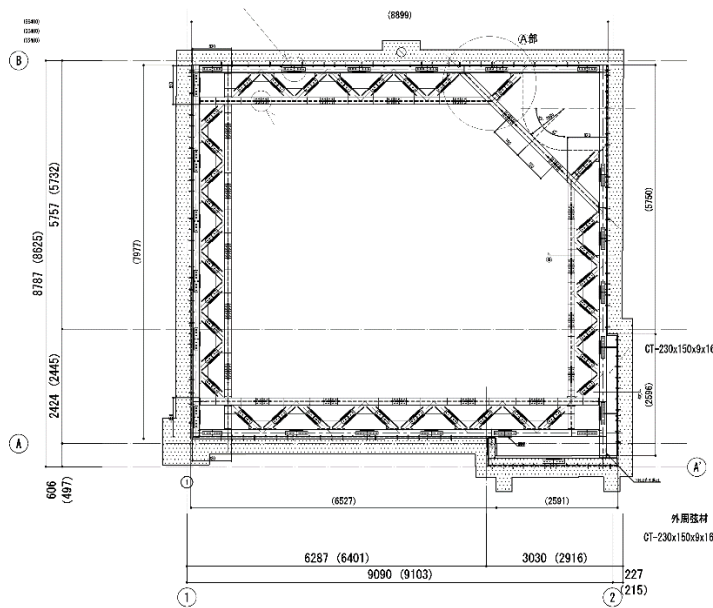


図5 回廊部水平拘束トラス

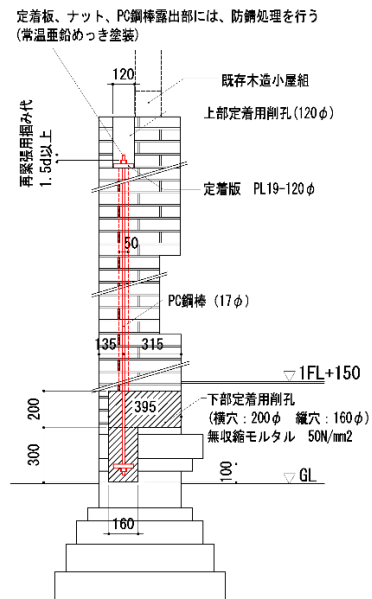


図6 PC補強詳細図

4. FEM解析を用いた耐震性能の評価例

前述の通り、煉瓦造建築物においては耐震改修促進法に基づく具体的な耐震診断方法が定められていない。社団法人北海道建築技術協会にて取り纏められた「煉瓦造建築物の耐震診断規準」に準拠し、1次診断相当の耐震診断が行われている事例が多く見られるが、上記基準では建物の破壊メカニズムの把握が困難であること、また、補強方法として採用したPC補強の効果を適切に考慮できないことから、本建物ではFEM解析を用いた耐震性能の検証を実施した。

図7のように煉瓦壁を板要素、水平拘束トラスを梁要素としてそれぞれ形状通りに建物をモデル化した。木造小屋組、パラペット、既存回廊および玄関底については等分布荷重にて重量のみを考慮した。PC補強については、アンボンドタイプのPC鋼棒を使用することから、上部定着版位置および下部定着版位置にそれぞれ導入プレストレス力相当の集中荷重として評価した。

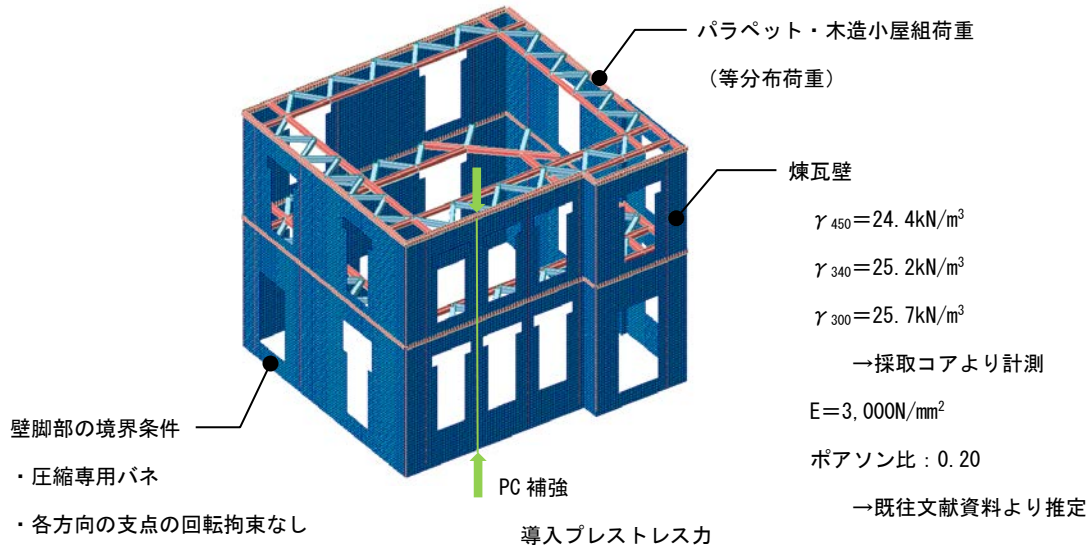


図7 検討用モデル

検討に用いる煉瓦壁の物性値については、前述の「煉瓦造建築物の耐震診断規準」を参考とし、コア抜きによる強度試験結果を基に、煉瓦単体の圧縮強度、煉瓦目地のせん断強度および引張強度を設定した。

PC補強後の目地せん断強度については、導入プレストレス力を軸力とした軸力載荷時のせん断強度試験を別途実施し、その結果より推定した(図8)。

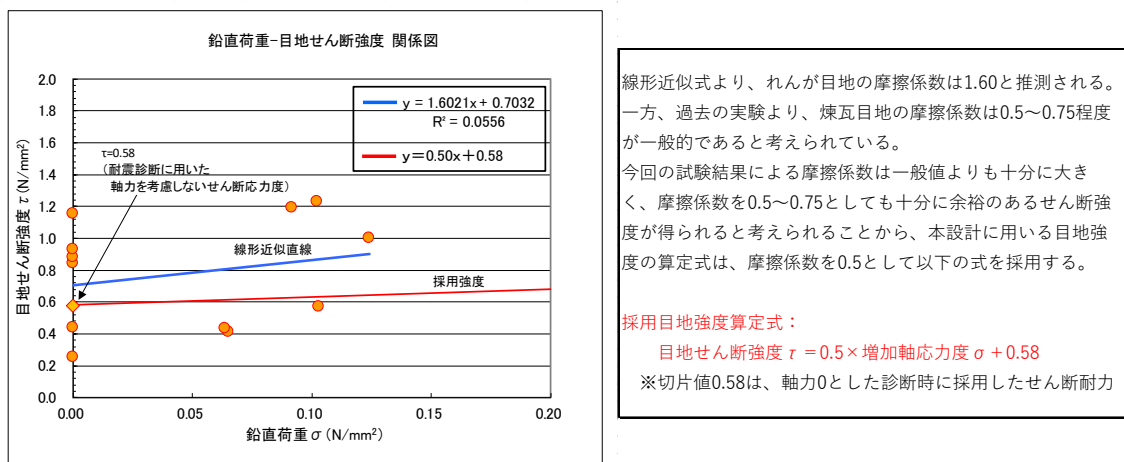


図8 PC補強後の目地せん断強度

解析結果より終局時の保有水平耐力を算定し、(財)日本建築防災協会「2001年版既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準」に規定された構造耐震指標に相当する数値(Is)より耐震性能を評価した。

なお、本建物は屋根面に十分な水平剛性が期待できないことから、各構面毎に面内方向、面外方向それぞれの耐震性能を評価している。

【面内方向の耐震性能評価方法】

壁面の破壊形式を、以下のように想定した。

① 壁のせん断破壊

② 壁の曲げ破壊

③ 中央境界梁の破壊 (図9)

各構面の上下開口間に存在する煉瓦壁の破壊を指す。

中央境界梁が破壊することで、両端の壁が1階、2階一体の縦長の壁として挙動することとなり、壁耐力が低下する要因となる。

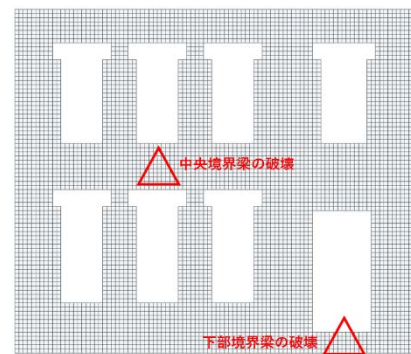


図9 壁面の破壊形式

④ 下部境界梁の破壊 (図9)

各構面の1階開口下に存在する煉瓦壁の破壊を指す。下部境界梁が破壊することで、壁脚部の拘束効果が失われ、壁回転型の破壊形式となる可能性がある。ただし、壁脚部に浮上りが生じていない場合は、せん断破壊型の壁となり、耐力は保持できる。

各構面の壁の破壊形式を考慮した解析を行い(図10)、最も負担せん断力が大きくなる時点を保有水平耐力時と仮定した。一例として、北面の復元力を示す(図11)。

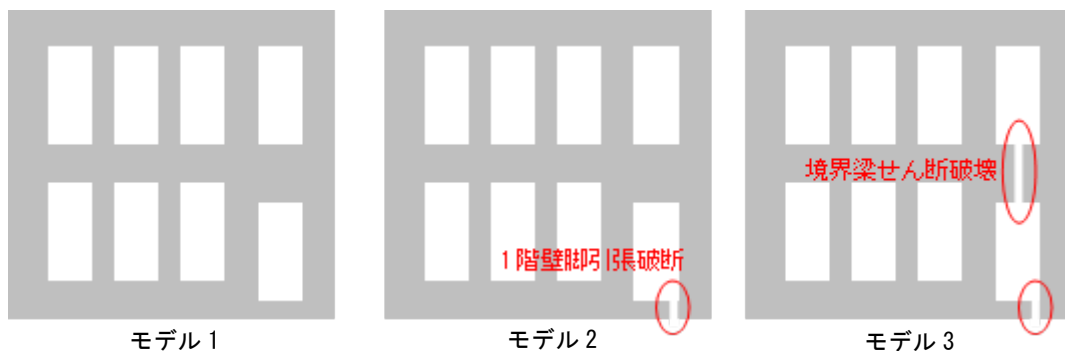


図10 破壊形式を考慮した段階検討用モデル例

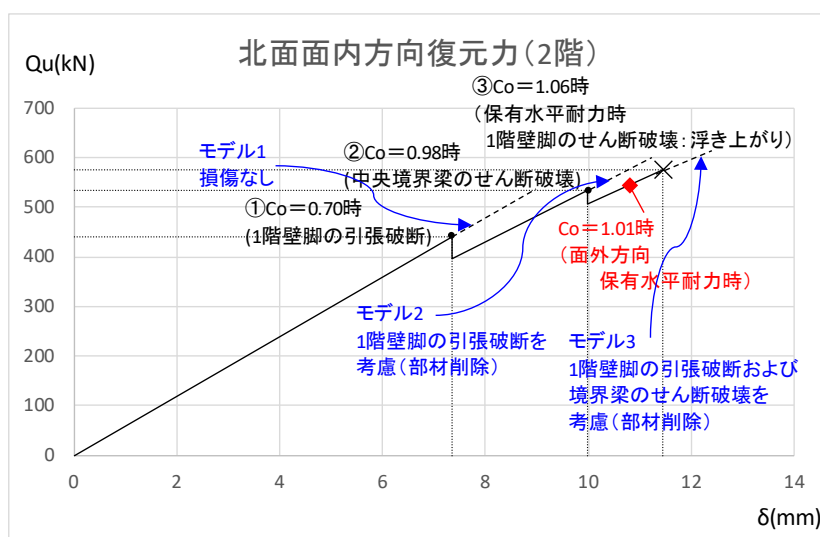


図 11 北面面内方向の復元力

構造耐震指標 I_s は、以下の式にて算出した。

面内 $I_s = \text{面内応力度比} \times \text{形状指標 SD} \times \text{経年指標 T} \times \text{構造耐震判定指標 } I_{so} (=0.60)$

面内応力度比 = 保有水平耐力 Q_u / 発生地震力 P

発生地震力 P : 建物重量 W に $Co=1.00$ を乗じた地震力

※形状指標 SD および経年指標 T は、「煉瓦造建築物の耐震診断規準」に準拠して算定する

【面外方向の耐震性能評価方法】

$Co=1.00$ 時に、耐震性能上の影響が無視できる局所的応力を除外した煉瓦壁体の最大引張縁応力が、煉瓦目地の引張強度を超えた時点を各構面の保有水平耐力時とした。

面外 $I_s = \text{面外応力度比} \times \text{形状指標 SD} \times \text{経年指標 T} \times \text{構造耐震判定指標 } I_{so} (=0.60)$

面外応力度比 = 煉瓦目地の引張強度 / $Co=1.00$ 時の最大発生引張応力度

5. 補強後の耐震性能

以下に、北面の耐震補強後の破壊メカニズム図を示す (図 12)。

北面においては、 $Co=1.06$ 時に面内方向が 1 階壁脚部のせん断破壊による浮上りにより終局状態を迎える。また、 $Co=1.01$ 時に面内方向が目地部の引張破断により終局状態を迎える。

補強後の I_s 値は、面内方向で $I_s=0.606$ 、面外方向で $I_s=0.604$ となり、所用の耐震性能を満たす結果となった。

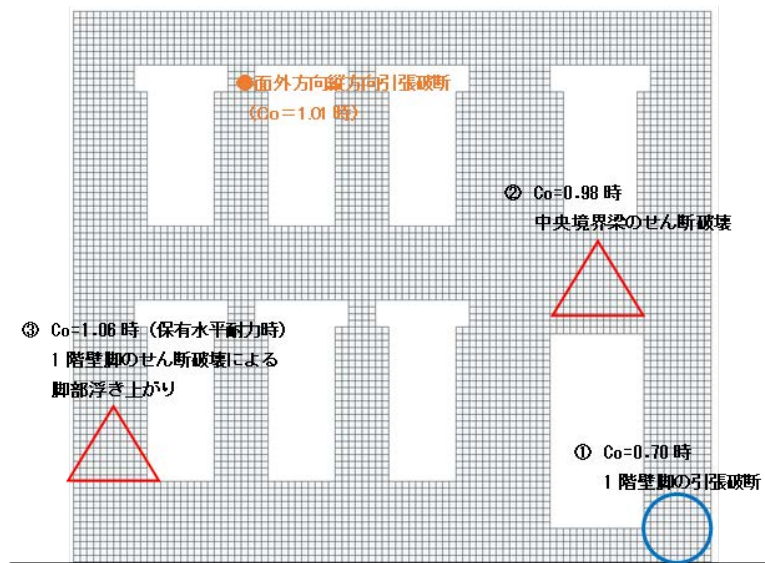


図 12 北面面内方向の破壊メカニズム

補強前後の耐震性能の比較を、以下に示す。

表 1 補強前後の耐震性能比較

		(補強前)構造耐震指標 I_s			(補強後)構造耐震指標 I_s		
		面内方向	面外方向	総合評価	面内方向	面外方向	総合評価
北面	2F	0.252	0.049	0.049	0.762	0.604	0.604
	1F	0.286	0.060	0.060	0.606	0.604	0.604
南面	2F	0.337	0.051	0.051	0.669	0.684	0.669
	1F	0.268	0.108	0.108	0.703	0.855	0.703
東面	2F	0.577	0.154	0.154	0.829	0.604	0.604
	1F	0.478	0.118	0.118	0.725	0.604	0.604
西面	2F	0.678	0.075	0.075	0.870	0.604	0.604
	1F	0.623	0.604	0.604	0.927	0.604	0.604

面内方向については、PC 補強により目地のせん断強度を高めることで、補強前と比較して耐力が向上していることが確認できた。

また、面内方向については、水平拘束トラスによる補強を行うことで、煉瓦壁体にかかる最大引張縁応力が減少し、耐震性能が向上していることが確認できた。

6. まとめ

FEM 解析を用いた耐震診断を実施することで、破壊形式を考慮した上で建物の耐震性能を把握することができた。また、PC 補強や水平拘束トラスによる補強の効果についても定量的に評価することができた。

強度型の建物としての評価方法では耐震性能を適切に把握することが難しい場合において、FEM 解析による評価は有効であるものとする。