

## 論文 歴史的建造物の経済性能評価における復元力特性の影響

片貝 勇介\*1・高橋 典之\*2

**要旨：**歴史的建造物の保存を目的として耐震改修を行う場合、建造物の経済性能を考慮した耐震補強方法の検討が効果的と考えられる。本研究では組積造耐震壁を含む混合構造歴史的建造物を検討対象とし、ステンレスピンを用いたピンニング補強法を耐震改修工法として適用した場合について、供用期間中に発生が予想される中小地震を含めた入力地震動シナリオを用いてライフサイクルコスト耐震費用を算出し、経済性の観点から要求される構造特性の検討を行った。その際、組積造耐震壁の損傷による耐力低下を復元力特性としてモデル化し、建物のライフサイクルコスト耐震費用に与える影響について検討した。

**キーワード：**歴史的建造物、ライフサイクル地震動、ライフサイクルコスト、ピンニング補強

## 1. はじめに

現存する歴史的建造物は、建設当時の技術力・建設知識だけでなく生活・習慣・建物の果たした役割など多くの文化的価値を継承するものとして、現在まで取り壊されずに受け継がれてきた貴重な資料である。同時に、地域のシンボルとして親しまれ、景観形成・地域活性化に貢献するポテンシャルを有しており、保存再生を求める声が少ない。近年、実際の保存・再生ケースとして、建造物を観光資源とすべく、収益用建造物として活用するケースが多くみられる。これは、歴史的建造物に対し経済活動を期待できる非常に有効な保存方法となっている。

しかしながら、歴史的建造物の保存を考える場合、建設時の設計基準が現行基準を満たさないことに加え、収益検討期間中の様々な外力による劣化も考慮する必要があり、歴史的価値を維持しながら合理的に建物の補修・補強を進める手法が確立されているとは言えない。現実には、所有者の経済的な事情から取り壊されてしまう事例も多く存在する。そこで本研究では、歴史的建造物の保存・再生にあたり、所有者にとって合理的な建物の補修・補強方法の選択に資する情報を提供すべく、耐震改修による補強効果を考慮した建造物の経済性能評価について検討する。具体的には、歴史的建造物の保存・再生に向けた意思決定時点において、継続使用のための耐震改修初期費用を投資額として、収益検討期間中のフロー収益を回収額として、供用



写真-1 実地調査した歴史的建造物（万田坑事務棟）

期間中に発生が予想される入力地震動シナリオ(ライフサイクル地震動シナリオ<sup>1)</sup>)を用いた地震応答解析から推定されるフロー支出を地震損傷補修費用としてそれぞれ算出し、パラメトリック解析を通して目標とする経済性能を満たす構造性能の領域を表示する曲線を要求スペクトルとして求める。この一連の、歴史的建造物の経済性能評価手法の概要をフローとして図-1に示す。

## 2. 検討対象概要

## 2.1 対象とする建造物

本論では熊本県荒尾市にある万田坑事務棟(写真-1)を、耐震改修をふまえた収益用建造物としての保存と活用を検討するための検討対象事例に設定した。

万田坑事務棟(写真-1)は、一見すると煉瓦造(外壁厚さ一枚半積・柱型付き)に見えるが、実際にはRC造の柱、梁と、鉄骨造の大梁が建物中心部分の架構を形成し、外周部に煉瓦造の組積壁が組み合わさった混合構造である。

なお、同様の構造形式を持つ歴史的建造物(文化財登録制度において、登録有形文化財の選定対象となる竣工後50年以上を経過した建造物)のうち、3階建て以下の建造物の構造特性データベースを作成し、後述する構造特性パラメータを用いた経済性能評価に用いた。

## 2.2 耐震改修方法

歴史的建造物の意匠に影響を与えにくいと考えられる耐震改修方法として、本論では組積造壁のピンニング補強法を対象に検討を行う。

具体的には、補強効果の検証実験<sup>2)</sup>を参考に、ピン挿入時の注入材としてJIS A 6024-1998 適合エポキシ樹脂を用いて、付着特性を良くするため全長にわたりねじきりを施した補強用ステンレスピン SUS304p6により、壁体両面からおのおの45°の角度でピンニングを行う工法が耐震改修方法として採用されるものとした。

\*1 東北大学大学院 工学研究科 都市・建築学専攻 (学生会員)

\*2 東北大学大学院 工学研究科 准教授 博(工) (正会員)

### 3. 各種費用の規準化

経済価値評価を行うにあたり、本論では、国土交通省建築着工統計調査 2017 年 10 月<sup>4)</sup>に基づき新築工事平均費用 (70 万円/坪) を用いて (表-1)、改修費用、修復費用、収益費用の規準化を行った。具体的な改修工事費用、修復工事費用、収益費用は、それぞれ工事実施時点での経済状態によって金額が変動すると考えられるが、本論では一般的な新築工事費用に対する比率として各種工事費用が規準化される者と仮定し、結果の分析に用いることとした。

### 4. ライフサイクル地震動による損傷のモデル

#### 4.1 入力地震動モデル

防災科学技術研究所が提供している確率論的地震動予測地図 J-SHIS<sup>5)</sup>に基づき万田坑事務棟の所在地 (熊本県荒尾市) における地震ハザード曲線を用いて、地震発生超過確率と入力地震動強さの関係を定めた。

#### 4.2 ライフサイクル地震動シナリオの作成

建物所有者が対象構造物の収益検討をする期間を 50 年間と定め、ライフサイクル地震動シナリオ<sup>6)</sup>を算出した。文献 6)よりプロットングポジション公式を援用した(1)式、(2)式から、年最大地震動の非超過度数の組合せ (表-2) を作成した。

$$F(x_i) = \frac{i - \alpha}{N + 1 - 2\alpha} \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{(N + 1) \ln(1 - P) + iT}{2 \ln(1 - P) + T} \quad (2)$$

ここに、 $F(x_i)$  : 観測値の大きい順に  $i$  番目の非超過度数、 $N$  : 観測値個数 (検討対象期間年数)、 $\alpha$  : 定数、 $P$  : 検討対象期間で最大の地震動における  $T$  年超過確率 (本論では 50 年超過確率 10% の地震動が最大地震動として発生するものとした) である。地震ハザード曲線と表-2 から求められる地表面最大速度 (PGV) の組合せが、検討期間を通じランダムな順序で発生するものとする (図-2)。なお、後述する時刻歴応答解析の際は、国土交通省告示 1461 号の設計用応答スペクトルに適合する模擬地震動に倍率を乗じ、PGV に応じた入力地震動を作成した。模擬地震動の位相特性は文献 1)、3) を参考に、神戸海洋気象台 1995(NS)、El Centro 1940(NS)、八戸港湾 1968(EW)、東北大学 1978(NS) の 4 種類を用いて検討し、すべての算出結果の平均をとることとした。

#### 4.3 構造物の地震応答モデル

##### 4.3.1 構造物のモデル

歴史的建造物のうち、局所的に激しく劣化している場合や極端に不整形な構造物では適切かつ詳細な解析モデルを用いる必要があるが、本研究では歴史的建造物の継続使用を念頭に、耐震改修後の構造特性が 1 自由度系に縮約

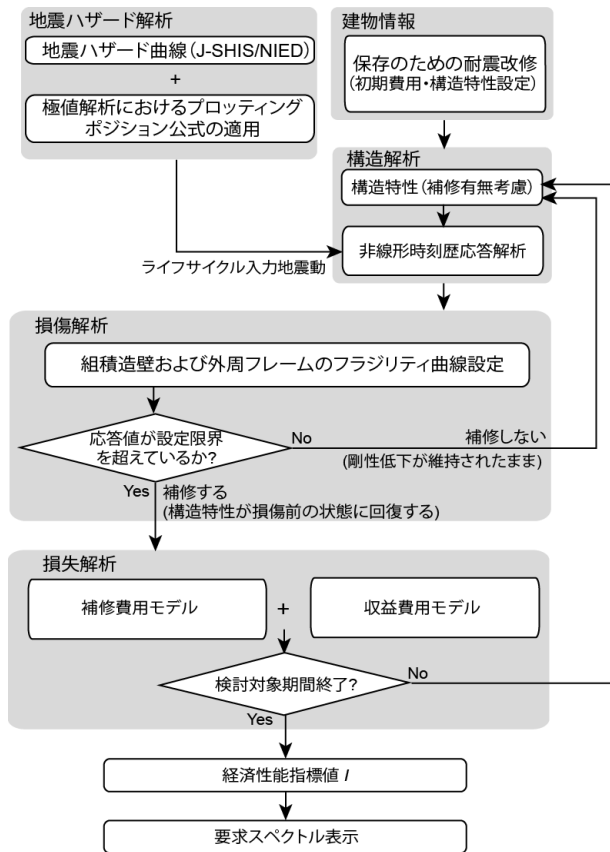


図-1 経済性能評価フロー

表-1 2017 年 10 月の国土交通省建築着工統計<sup>4)</sup>

建築着工統計調査 (2017 年 10 月)		全建築物計
工事費用予定額 (万円)		240,908,763
床面積合計 (坪)		3,515,175
新築工事平均費用 (万円/坪)		70

表-2 ライフサイクル地震動の非超過確率組合せ<sup>6)</sup>

地震の大きさ順	$i=1$	$i=2$	$i=3$	$i=4$	...	$i=50$
非超過確率	0.998	0.978	0.958	0.938	...	0.018
再現期間 $r(i)$ [年]	475.0	45.2	23.7	16.1	...	1.02
50 年超過確率[%]	10.0	69.2	87.8	95.5	...	100

可能な架構になると仮定する。次節に定めた復元力特性を用いた非線形時刻歴応答解析により地震応答を求める。

##### 4.3.2 復元力特性

ピンニング補強後の構造物の復元力特性 (図-3) を文献 2) を参考に設定した。組積造構造物の復元力特性は、簡便性から骨格曲線を bilinear 型、履歴則を bilinear-slip (図-4) としてモデル化することが多い。しかし本研究では、

図-3 にみられるような組積造壁損傷時の耐力低下を考慮して復元力特性を定めた場合と、考慮せずに復元力特性を定めた場合の比較検討を行うため、復元力特性として骨格曲線に耐力低下を考慮した trilinear型、履歴則に trilinear-slip (図-5) を仮定した復元力特性モデルを導入した。なお、耐力低下を考慮した trilinear-slip モデルは、文献7)の takeda-slip モデルにおいてひび割れ点強度を降伏点強度よりも大きく設定したものであり、内部ループでの指向点で負勾配部分による不具合が生じないように修正している。その際、trilinear-slip (図-5) モデルにおける剛性の設定は takeda-slip モデル同様、以下のように定めた。

$$K_u = \frac{Q_{max}}{X_{max}} \quad (3)$$

$$K_s = \left| \frac{Q_{max}}{X_{max} - X_0} \right| \cdot \left| \frac{X_{max}}{X_Y} \right|^{-\alpha} \quad (4)$$

$$K_d = \frac{Q_C + Q_Y}{X_C + X_Y} \cdot \left| \frac{X_Y}{X_{max}} \right|^{\beta} \quad (5)$$

ここに、 $K_u$ ：経験最大点指向剛性、 $K_s$ ：スリップ時剛性、 $K_d$ ：スリップ後剛性、 $Q_{max}$ ：経験最大せん断力、 $X_{max}$ ：経験変位、 $X_0$ ：除荷後変位、 $Q_C$ ：組積目地破壊せん断耐力、 $Q_Y$ ：組積壁降伏せん断耐力、 $X_C$ ：組積目地破壊変位、 $X_Y$ ：組積壁降伏変位、 $\alpha, \beta$ ：剛性低減係数 ( $\alpha=0.5$ ,  $\beta=0.45$ )、降伏後剛性を初期剛性の0.1倍とし、減衰は内部減衰5%の瞬間剛性比例型とした。

耐力低下を考慮した trilinear-slip モデルを導入する際に、組積造壁損傷にいたる最大耐力  $Q_c$  と組積造壁損傷後の降伏後耐力  $Q_Y$  の比率を考慮する必要があるが、図-3 では最大耐力時に  $1.4Q_Y$  程度のせん断耐力を有していたことから、目地破壊時の耐力低下について  $1.4Q_Y$  を標準として耐力低下のパラメータを定めた (表-3)。Case1~Case4 のそれぞれに対して、組積造壁損傷時の耐力低下が中小地震動群を考慮した耐震経済性能評価に与える影響について比較検討を行った。

表-3 検討ケース別に用いる復元力特性モデル

検討ケース		最大耐力 $Q_c$
Case1	耐力低下が生じない場合	$Q_c = 1.0Q_Y$ (bilinear)
Case2	目地付着強度が弱い場合	$Q_c = 1.2Q_Y$ (trilinear)
Case3	標準 <sup>2)</sup>	$Q_c = 1.4Q_Y$ (trilinear)
Case4	目地付着強度が強い場合	$Q_c = 1.6Q_Y$ (trilinear)

#### 4.4 損傷のモデル

構造物の損傷として組積壁体損傷発生時と架構終局時を考慮する。それぞれの損傷発生における fragility 曲線の、対数正規分布上の中央値と標準偏差は文献2), 3), 8)~10)に基づき表-4のように設定した。標準偏差は竣工後、年月の経過した RC 建造物の大破時 fragility 曲線

対数標準偏差の値<sup>10)</sup>を用いている。本論では fragility 曲線の損傷確率を、修復費用算出にあたり規準化改修費用に乘じる損傷係数  $D$  と定めた (図-6)。

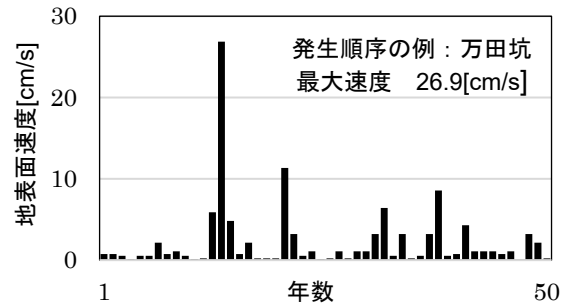


図-2 年最大 PGV のシナリオ例

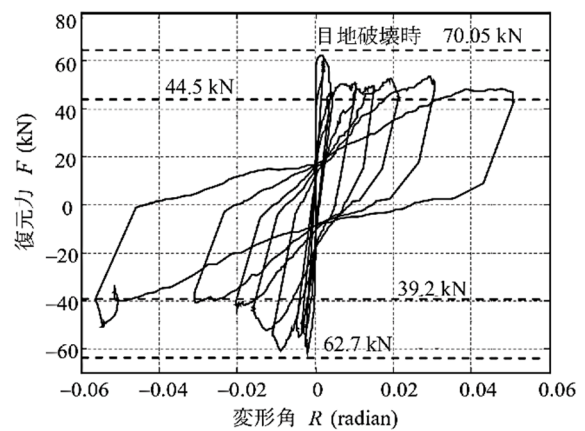


図-3 ピンニング補強後の復元力特性の一例<sup>2)</sup>

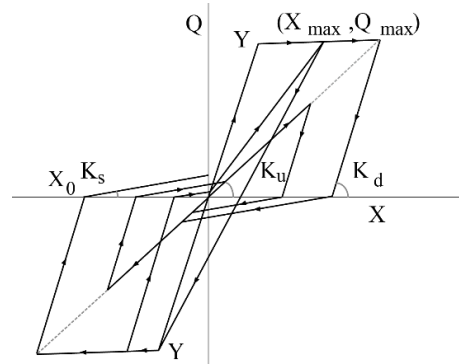


図-4 bilinear-slip モデル

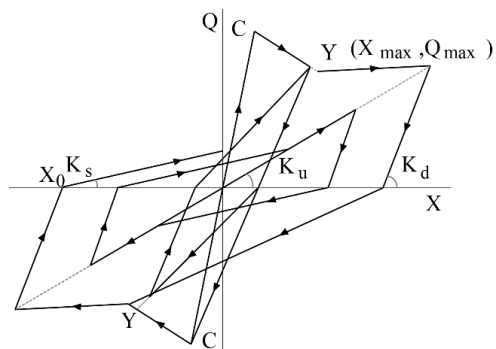


図-5 耐力低下を考慮した trilinear-slip モデル

なお、損傷発生限界変形角より応答が小さい場合は補修せず、剛性低下したまま次の地震動を受けるものとする。

#### 4.5. 構造特性パラメータと耐震改修による構造特性変化

本論では紙面の都合上、耐震改修案としてピンニング補強のみを検討対象とした。構造特性を表すパラメータとして固有周期、ベースシア係数、終局塑性率、減衰定数を採用し、文献 8), 11)~19)を参考に耐震改修により各パラメータがとり得る範囲を表-5 のように定めた。ここで、本論の混合構造建築物の塑性率は、一般的に RC 造で用いられる降伏点に対する終局時の変形比ではなく、組積造壁損傷時に対する混合構造全体の終局時の変形比として定めている点に注意が必要である。なお 7 章で評価対象とする万田坑事務棟について、原状の構造特性<sup>20)</sup>、および、改修工法を適用した場合に過去の歴史的建造物の改修事例<sup>13) 14) 17)</sup>から推定される平均的な構造特性の変化分が適用されるとした場合の想定値を表-6 に示す。ピンニング補強後の構造特性を推定する場合、建造物の物性調査結果から構造計算ソフト等を用いた構造計算により算出することが望ましいが、万田坑事務棟に対しては過去に物性調査を行った記録がなく、また、組積造壁体は目地ごとの強度が異なるため壁のせん断耐力の算定が非常に難しいことから万田坑事務棟と比較的近しい規模の建物を用いて推定した。

#### 5. 経済性能評価モデル

経済活動に伴い変動する収益用建造物の収益を適切にモデル化することは大変難しい。そこで本論では簡便に収益の大小が経済性能に与える影響をとらえるべく、収益用建築物の価値を評価する DCF(Discounted Cash Flow)法により収益用建造物の経済性能評価を行う。文献 21)を参考に経済性能評価に以下の経済性能指標値  $I$  を用いた。

$$I = \frac{V'}{A} = \frac{1}{A} \left[ \sum_{i=1}^n \frac{a_i}{(1+r)^i} + \frac{V_s}{(1+r)^n} - \frac{BD}{(1+r)^m} \right] \quad (6)$$

ここで、 $V'$ :建設  $m$  年後 ( $m \leq n$ ) に地震による規準化修復費用  $BD$  (6.2 節にて後述) が生じた場合の収益用建築物の価値、 $A$ :初期投資費用、 $BD$ :規準化修復費用、 $n$ :所有期間(年)(本研究では検討対象期間 50 年)、 $m$ :建設から地震発生までの経過年数、 $V_s$ : $n$  年後の売却価格、 $a_i$ : $i$  年目における年純利益、 $r$ :割引率である。割引率は経済的リスクが大きいと高くなるが、文献 21)を参考に本論文では 4%とした。なお、 $V_s$ は文献 21)より次式で求めた。

$$V_s = \frac{a}{r} \quad (7)$$

ここに、 $a$ :年間純収益の検討対象期間における平均値である。

また、実際に活用されている歴史的建造物の収益調査から本論では収益が高いケースとして  $a_i$  を規準化費用で 0.05 と定めた結果を紹介する。経済性能指標値  $I$  は事業の収益性を分析する際に用いられる式(8)に基づいており、経済性能指標値  $I$  が 1 以上であれば投資額以上の収益があることを意味し、収益用建造物としての価値が認められる。

$$I = \text{資本収益率} = \text{収益} / \text{投資} (\geq 1) \quad (8)$$

#### 6. 費用モデル

##### 6.1 イニシャルコスト設定

歴史的建造物建設時の詳細な建設費用は不明な場合が多い。そこで、継続使用に対する意思決定段階において、式(6)の初期投資  $A$  を現状維持に最低限必要な初期費用とした。具体的には、ピンニング補強工法の耐震改修費用を文献 13), 14), 17)を参考に算出し、これを前述の規準費用で除して規準化したイニシャルコストを定めた(表-7)。

表-4 フラジリティ曲線のパラメータ

	中央値	標準偏差
壁体損傷発生変形角	0.0014	0.81
架構終局変形角	0.0014×終局塑性率 $\mu$	0.81

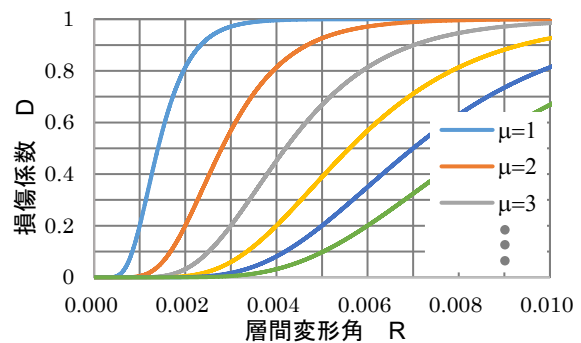


図-6 損傷係数  $D$  と層間変形角  $R$  の関係

表-5 ピンニング補強後の構造特性パラメータ設定

固有周期	ベースシア係数	終局塑性率	減衰
0.1~0.3	0.15~0.8	2~6	5%

表-6 耐震改修による万田坑事務棟構造特性変化仮定

	固有周期	ベースシア係数	終局塑性率	減衰
原状	0.14	0.38~0.4	1~1.5	5%
改修後	0.15	0.53~0.56	3~4	5%

表-7 耐震改修費用の規準化

	坪当たり補強費用	規準化費用
ピンニング補強工法	112 万円/坪	1.6

##### 6.2 修復費用の設定

文献 12)~18)より、歴史的建造物の修復費用に関するデータを分析した。修復費用は坪あたり 116.7 万円と算出され、116.7 万円/坪を規準費用 70 万円/坪で除した値  $B=1.67$

が規準化した修復費用係数  $B$  となる。この規準化修復費用係数  $B$  に、必要な修復量を表す損傷係数  $D$  を乗じることで、検討期間中に生じる損傷の補修に要する規準化修復費用  $BD$  が算出される。

### 7. 要求スペクトル算出事例

復元力特性モデルの異なる Case1~Case4 のそれぞれについて、前章までの手法に従い経済性能指標値を試算した。縦軸にベースシア係数、横軸に降伏点変位（建物固有周期より算出）をとり、経済性能指標値  $I$  の等高線を「要求スペクトル」として描いた一例（混合構造塑性率3の場合）を図-7~10に示す。経済性能指標値  $I$  の値は式(8)に基づき算出され、本検討では収益が大きく投資を上回ることなく  $I$  の最大値が2未満となった。図-7~10において、建物が経済性能指標値  $I \geq 1$  となる領域の構造特性であった場合に検討対象期間後に経済的利益が生じ、すなわち建物所有者にとって経済的な価値がある構造物であるといえる。図-7~10中では  $I=1$  の線（黒線）の右上部の領域で表される構造特性がこれに相当するが、図-7と図-8~10の比較から bi-linear-slip モデルで建造物のモデル化を行った場合と、耐力低下を考慮した trilinear-slip モデルで建造物のモデル化を行った場合において、経済性能指標値  $I$  の分布傾向が異なっていることが分かる。図-7では  $I \geq 1$ （黒線より上）の領域は、降伏点変位（固有周期）に依らずベースシア係数 0.45 以上であり、図-8~10では  $I \geq 1$ （黒線より上）の領域はベースシア係数だけでなく降伏点変位（固有周期）によって大きく異なっていた。

図-7は小さな変形角での組積造壁による耐力上昇分を実質的に無視した bilinear-slip モデルを用いたことでライフサイクル地震動における中小地震の影響が経済性能評価にあまり反映されなかったのに対して、図-8~10では小さな変形角での組積造壁による耐力上昇分を trilinear-slip モデルで考慮したことでライフサイクル地震動における中小地震の影響が経済性能評価に反映されたことが、要求スペクトルが示す傾向の差として現れたものと考えられる。

また、図中黒点部は、万田坑事務棟にピンニング補強を適用した場合に推定される構造特性変化分（表-6）を考慮した領域を示している。図-7においては黒点部分の構造特性は経済性能指標値  $I < 1$  と算出されるのに対し、図-8~10では黒点部分の構造特性が経済性能指標値  $I > 1$  と算出された。このことから、組積造壁の損傷による耐力低下を考慮しない場合はピンニング補強工法が経済的に価値のある耐震改修工法にならないと判断されてしまうが、組積造壁の損傷による耐力低下を考慮した場合はピンニング補強工法が経済的に価値のある耐震改修工法であると判断することができる。

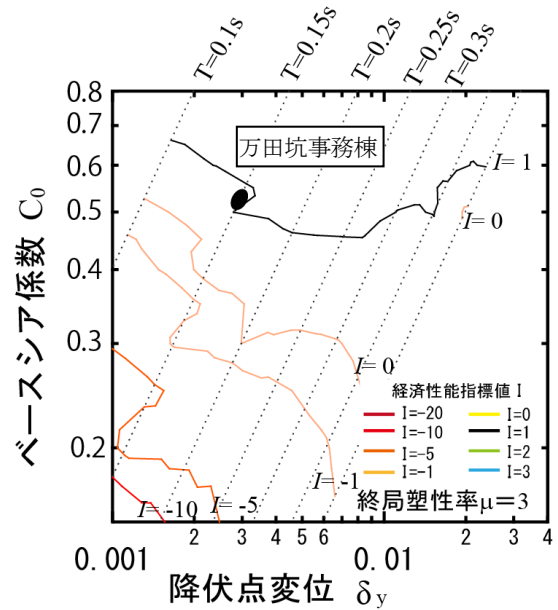


図-7 Case1 最大耐力  $1.0Q_y$  (bilinear-slip)

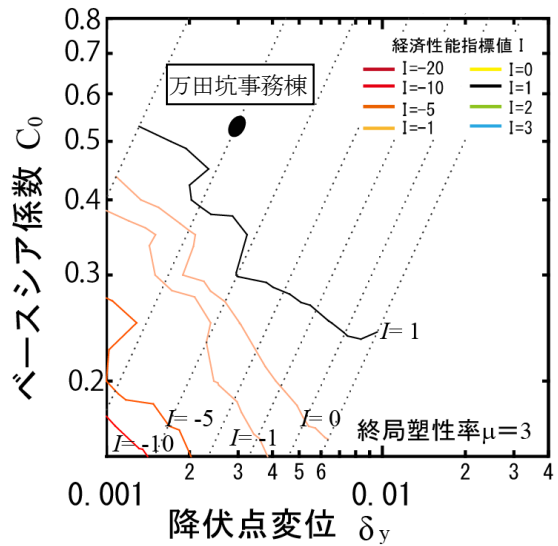


図-8 Case2 最大耐力  $=1.2Q_y$  (trilinear-slip)

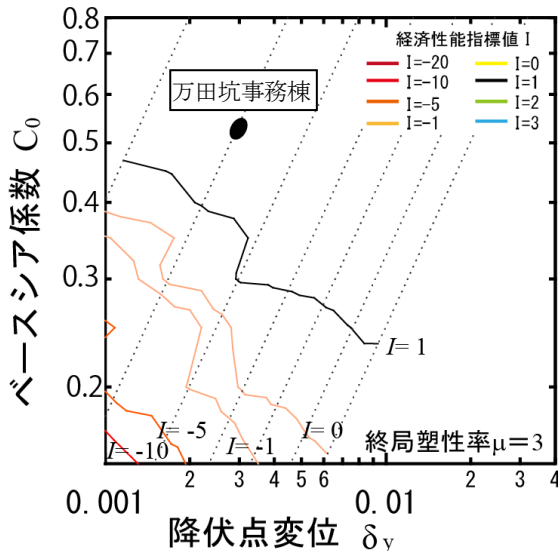


図-9 Case3 最大耐力  $1.4Q_y$  (trilinear-slip)

## 8. まとめ

歴史的建造物の歴史的価値・文化的価値のある建造物もオーナーの経済的事情により取り壊される事例が少ない現状を鑑み、歴史的建造物の歴史的価値を生かした収益用建造物としてオーナーにとっても保存再生のインセンティブとなりえる経済性能評価の検討を行った。

ピンニング補強を施した組積造を含む混合構造歴史的建造物を対象に、収益検討対象期間中に生じる地震動シナリオを用いて経済性能指標を算出し、経済性の観点から建物所有者が許容し得る構造特性の検討を行った。その結果、中小地震による影響を含む組積造建造物の経済損失評価においては、組積造壁の損傷による耐力低下（小さい変形角における組積造壁の耐力上昇分）を考慮することが重要であることが分かった。

## 謝辞

本研究の一部は、科学研究費基盤研究(S)（課題番号：16H06363）、および、松井角平記念財団研究助成金の助成を受けた。ここに記して謝意を表します。

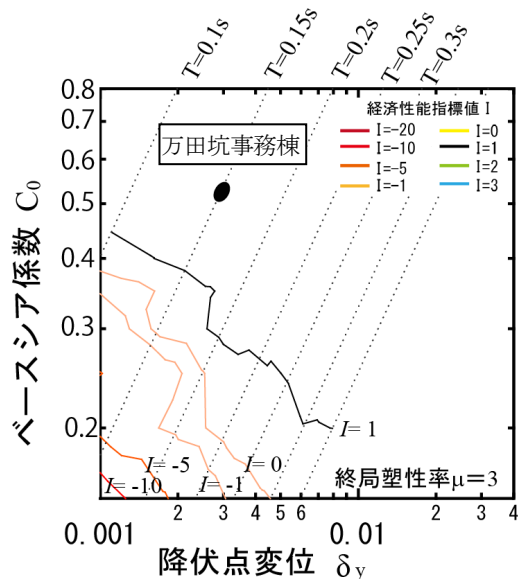


図-10 Case4 最大耐力  $1.6Q_y$  (trilinear-slip)

## 参考文献

- 1) 高橋典之, 塩原等: RC 建造物の耐震修復性能評価におけるライフサイクル影響係数, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.2, pp.1741-1746, 2004
- 2) 多幾山法子, 長江拓也, 前田春雄, 荒木慶一: ステンレスピンにより耐震補強された組積壁の面内曲げせん断特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.3, pp.1621-1626, 2008
- 3) 多幾山法子, 長江拓也, 前田春雄, 喜多村晶利, 吉田亘利, 荒木慶一: ステンレスピン挿入による歴史的組積造建造物の耐震改修, 日本建築学会構造系論文集,

Vol.74, No.635, pp.167-176, 2009.1

- 4) 国土交通省, 建築・住宅関係統計データ, [http://www.mlit.go.jp/statistics/details/jutaku\\_list.html](http://www.mlit.go.jp/statistics/details/jutaku_list.html) (閲覧: 2017年12月)
- 5) 防災科学技術研究所: J-SHIS 地震ハザードステーション, <http://www.j-shis.bosai.go.jp/>
- 6) 佐藤真俊, 高橋典之: ライフサイクル地震動を用いた RC 造建築物の経済性能設計に関する研究, コンクリート工学会年次論文集, Vol.37, No.2, pp.709-714, 2015
- 7) 江戸宏彰, 武田壽一: 鉄筋コンクリート構造物の弾塑性地震応答フレーム解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造, pp.1877-1878, 1977
- 8) 松田芳範, 岩田道敏, 八巻一幸, 山内俊幸: 既設レンガ部材の力学的性状について, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.1, pp.541-546, 1997
- 9) A.A. Akbarzade M. and A.A. Tasnimi: Nonlinear Analysis and Modeling of Unreinforced Masonry Shear Walls Based on Plastic Damage Model, JSEE, Vol.11, No.4, 2010
- 10) 吉川弘道, 大滝健, 前田欣昌, 中村孝明: 地震リスク解析におけるフラジリティ曲線と地震損失関数, コンクリート工学, 45 巻, 10 号, pp.26-34, 2007
- 11) 藤井智規, 福和伸夫, 千賀英樹, 飛田潤, 吉田明義: 常時微動計測による博物館明治村の近代建築物の振動性状データベース構築, 日本建築学会技術報告集, Vol.13, No.25, pp.59-64, 2007
- 12) 文化財建造物保存技術協会: 重要文化財山形県庁舎及び県会議事堂保存修理工事報告書, Vol.1, 1991, Vol.2, 1995
- 13) 文化財建造物保存技術協会: 重要文化財函館ハリストス正教会復活議事堂保存修理報告書, 1989
- 14) 文化財建造物保存技術協会: 重要文化財碓氷峠鉄道施設変電所(旧丸山変電所)保存修理報告書, 2002
- 15) 京都府教育庁指導部文化財保護課: 重要文化財同志社クラーク記念館修理工事報告書, 2008
- 16) 文化財建造物保存技術協会: 重要文化財旧神戸居留地十五番館保存修理工事報告書, 1993
- 17) 京都府教育庁指導部文化財保護課: 重要文化財座同志社礼拝堂修理工事報告書, 1990
- 18) 京都府教育庁指導部文化財保護課: 重要文化財同志社彰栄館保存修理工事報告書, 1981
- 19) 社団法人北海道技術協会: 煉瓦造建築物の耐震診断基準 改訂第二版, 2015
- 20) 荒尾市教育委員会: 重要文化財三井炭鉱業株式会社三池炭鉱旧万田坑施設保存活用計画, 2014
- 21) 衣笠秀行: 経済損傷指標に基づく収益用建築物の耐震性能評価, 日本建築学会構造系論文集, Vol.74, No.636, pp.401-408, 2009.9