

歴史的建築物の耐震評価法

—伝統構法木造建築物の詳細評価法—

花里 利一^{*1}・森田 仁彦^{*2}・柳澤 孝次^{*3}

Keywords : seismic diagnosis, traditional timber building, historical building

耐震評価, 伝統木造建築, 歴史的建築物

1. はじめに

1995年1月17日兵庫県南部地震は、在来工法の木造家屋とともに多くの歴史的建築物が未曾有の大被害を受け、わが国において文化財建造物の耐震性に対する関心が高まった地震である。翌1996年には、文化庁から『文化財建造物等の地震時における安全性確保に関する指針』が各都道府県の教育委員会に通知された。この地震を契機として伝統木造建築を中心に文化財の耐震問題に関する研究が活発になり、2001年には同庁文化財部から、『重要文化財建造物耐震診断指針』が示された¹⁾。実際、文化財建造物の保存改修工事において、一般に耐震検討が行われるようになったのは、阪神大震災以降のことである。さらに、歴史的建築物の耐震診断とともに、木造伝統構法の構造技術を定量的に評価して、耐震設計を行うことが一般にも行われるようになった。筆者らは、このような背景のもと、伝統構法五重塔の設計における耐震・耐風解析を実施するとともに²⁾、竣工後の微動測定により設計解析を検証している³⁾。

ところで、わが国の文化財建造物の耐震研究は、この地震から始まったものではない。1940年代前半に、坂静雄⁴⁾が法隆寺の昭和大修理に関連して、柱の傾斜復元力や貫の耐力等の研究を行っており、その考え方は現在の伝統木構造研究の基礎をなすものである。その後も後藤一雄⁵⁾、坂本功⁶⁾らによる一連の研究など、伝統木造の耐震研究はごく少数の研究者が続けてきた。しかし、原子力・高層建築分野を中心に耐震工学が高度化するなかで、伝統木造建築の構造分野の研究課題の多くは残されたままであった。一方で、阪神大震災は、わが国の建築界において、スクラップアンドビルトの時代からスト

ックの時代に移行する時期に発生したものである。海外では、すでに1980年代頃から歴史的建築物の耐震研究が盛んに行われてきたが、わが国では阪神大震災が契機となった。

国際的な文化財建造物の耐震補強の原則をふたつ挙げると、1)最小限の補強であること(minimum intervention)、2)可逆的すなわち元に戻すことが可能なこと(reversible intervention)である。この原則は、国内においても適用されるものである。最小限の補強で安全性を確保するためには、将来の地震荷重を合理的に予測すること、構造解析によって耐震性を定量的に評価することが重要である。とくに、長い歴史のなかで地震動を受けてきた地震国の歴史的建築物の場合には、優れた耐震性能を有しているものも多いと考えられ、構造補強計画にあたっては、もともと有する耐震性能を理解し、それを活かすような補強方法を考案することが望まれる。

本稿では、国内外の歴史的建築物の耐震診断および対策に関する流れをふまえて、歴史的木造建築物の耐震改修における専門診断と補強計画の流れを示す。この一連の検討は、要素技術を組み合わせたものである。本稿では、いくつかの代表的な要素技術を示す。

2. 歴史的木造建築物の耐震評価フロー

文化庁文化財部『重要文化財建造物耐震診断指針』¹⁾によれば、耐震診断は、所有者診断、基礎診断、専門診断の3段階からなり、所有者診断及びやや詳細な基礎診断は具体的な評価方法が示されている。しかし、建物がもともと有している耐震性能を評価し、前述の歴史的建築物の耐震補強の原則に基づいた改修計画を立案するに

* 1 技術センター建築技術研究所防災研究室

* 2 技術センター建築技術開発部建築生産技術開発室

* 3 技術センター技術顧問

は、それらの診断法では十分とはいえず、詳細な専門診断が必要になる。同指針では、専門診断に関する手法は提示されておらず、所有者等が適切な建築構造専門家に

依頼して実施するものと記述されている。保存修理工事における耐震診断として、専門診断および耐震補強計画の基本的なフローを図-1 に示す。

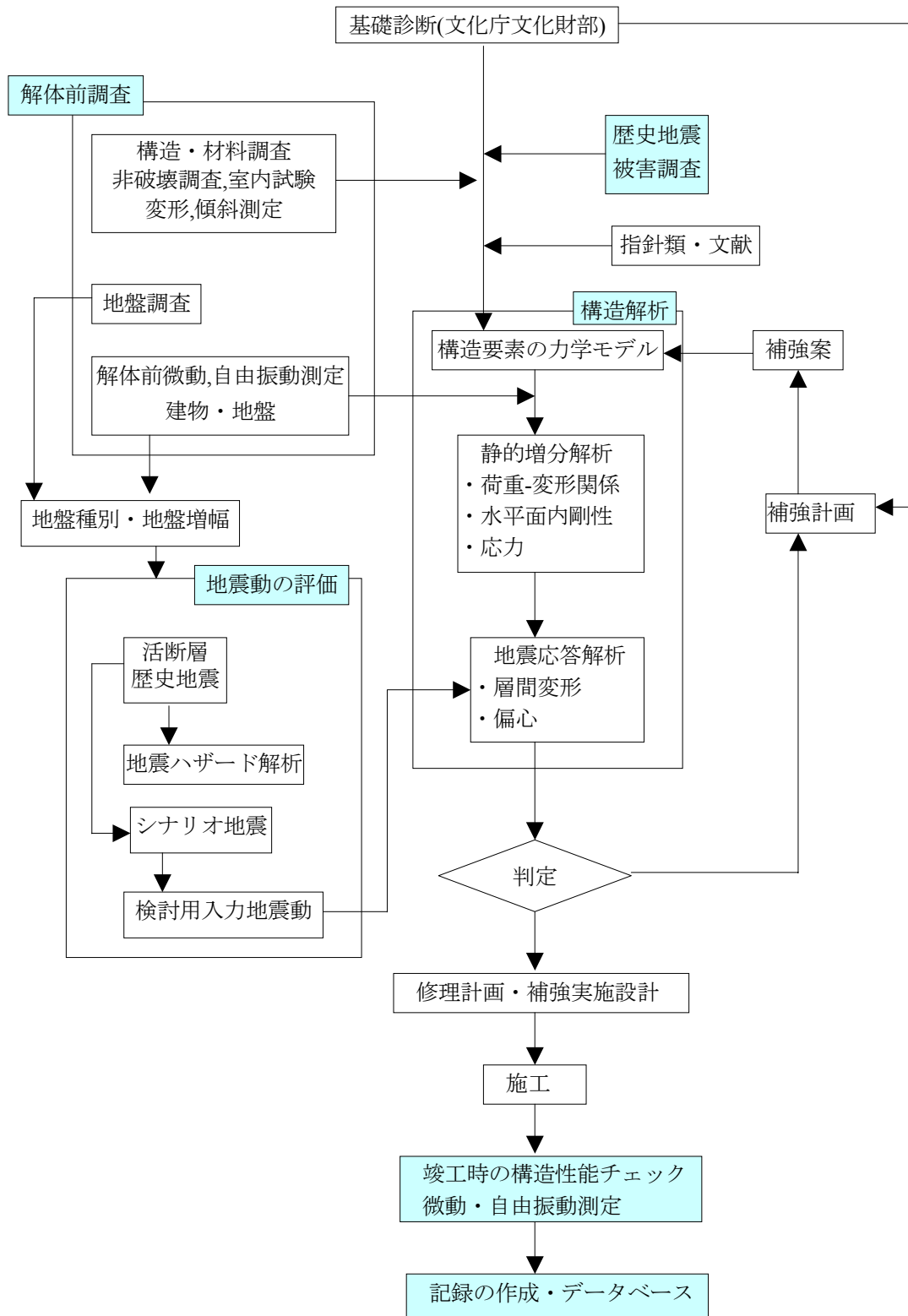


図-1 保存修理計画における耐震評価のフロー
Flow Chart for Seismic Diagnosis for Retrofitting

3. 耐震評価における要素技術

3.1 常時微動測定による振動特性調査

歴史的建築物における常時微動の測定は、対象建物の基本的な振動特性を把握する目的で行われるようになってきている。日常的な振動源による常時微動測定や人力加振等による自由振動測定は、一種の非破壊検査法であり、建物の固有周期、振動形、軌跡、減衰定数が把握できる。耐震診断を目的として建物の解体前に測定するとともに、保存修理工事後も測定することにより、構造補強を含む保存修理工事による構造性能向上のチェックが可能となる。

図-2 は内田らの一連の調査⁷⁾¹⁰⁾、長瀬らの調査¹¹⁾および筆者らの調査による社寺建築(屋根：瓦葺)の1次固有周期を建物高さ(棟高)との関係を示したものである。

いま、固有周期(T)が建物高さ(H)に比例するとして、図-2 に示すデータの直線回帰から下式が得られる。

$$T = 0.05H \text{ (s)} \quad \text{梁間方向}$$

$$T = 0.04H \text{ (s)} \quad \text{桁行方向}$$

梁間方向は、大場ら¹²⁾による多層塔の固有周期と塔身高さの関係を表す式($T=0.050H$)と一致している。

和歌山県有形文化財総持寺本堂(写真-1)の常時微動測定(保存修理工事開始前)では、梁間方向並進 1.2 秒、桁行方向並進 1.1 秒の固有周期が観測された。この建物は、約 1854 年安政南海地震で倒壊した建物を再建したものである(建築面積約 782m²、棟高約 20m、本瓦葺屋根)。この周期は法隆寺五重塔の固有周期(1.1 秒)とほぼ同じで、図-2 からわかるように、常時微動の結果を比較すれば、木造社寺建築のなかでも固有周期の長い建物のひとつである。図-3 は、地盤に対する梁上測定点の伝達関数から梁間方向の並進運動の振動形を描いたもので、水平面内の変位分布はほぼ一様で、梁間方向には不規則な動きはみられない。常時微動測定では、建物とともに地盤でも測定している。H/V スペクトル(地盤)の卓越周期は約 0.5 秒で、建物の固有周期に比較して短い。

一般に、常時微動による固有周期は、耐震解析モデルの固有周期より短い。伝統構法木造建築も同様である。伝統構法木造建築の場合、構造解析モデルでは、変形角 1/200 程度の剛性で評価しているのに対し、常時微動や人力加振による自由振動実験では、数万分の一程度の変形角であること、非構造部材の効果により実際には解析モデルに比べて剛性が大きくなることなどによる。3.4 に示すように構造要素を組み合わせる構造解析モデルを作成した場合の総持寺本堂の固有周期は、2.2 秒と計算されており、常時微動による固有周期に比べて約 1/2 で

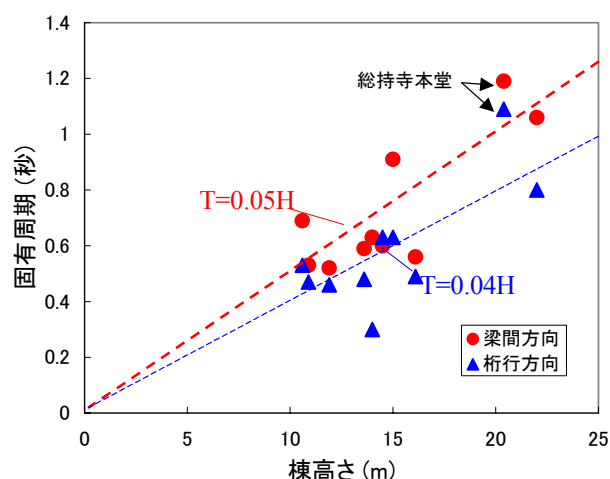


図-2 常時微動測定による社寺建築の固有周期
Natural Period Obtained from Microtremor



写真-1 常時微動測定の対象建築物
Historical Timber Temple (Microtremor Measurement)

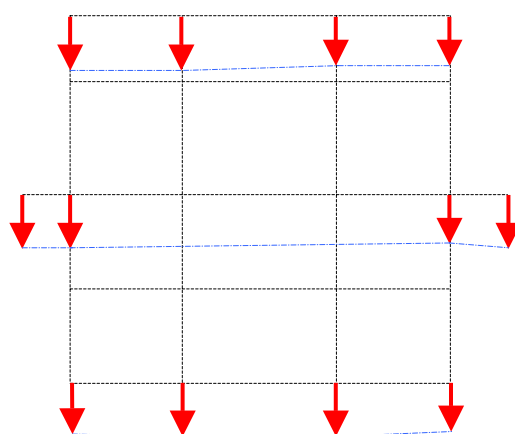


図-3 常時微動測定による梁間方向振動形
Modal Shape from Microtremor Records

あった。同様の傾向は他の構造形式の伝統的木造建築にもみられる。五重塔の構造設計解析²⁾の場合には、常時微動測定による固有周期は、耐震解析モデルの周期の約 1/2 であった³⁾。また、茅葺民家の保存修理工事における耐震診断例でも、約 1/2 であった。構造解析モデルと建物の常時微動測定による固有振動特性を比較したデータベースを構築すれば、構造解析モデルの検証上の有用な技術資料となり得ると期待される。

3.2 検討用入力地震動の評価

非線形時刻歴応答解析は、専門診断の精解法として位置付けられる。文化庁文化財部の重要文化財建造物耐震診断指針¹⁾の基礎診断法では、建築基準法施行令・同告示で規定されている地震力が用いられているが、専門診断では、活断層や歴史地震を考慮した入力地震動を策定することが望ましい。入力地震動の策定方法は、確率論的な手法と、断層モデル等による確定論的な手法に分類できる。前者は、歴史地震データベースや活断層データベースを用いて、確率論により評価する手法である。確率論的な手法の利点は、地震荷重だけでなく風荷重も同様に評価できることである。伝統構法木造建築の構造被害を歴史的にみると、地震ではなく、台風で崩壊した例(1934年室戸台風による大阪四天王寺五重塔の倒壊など)も少なくない。風荷重も合わせて評価する場合には、確率論に基づく手法が合理的である。図-4は、国指定重要文化財善光寺三門(長野市)¹³⁾および同平井家住宅(茨城県)¹⁴⁾の耐震検討における工学的解放基盤面での再現期間500年の一様ハザードスペクトルを基準法告示スペクトルと比較して示したものである。善光寺三門の場合には、歴史地震及び活断層データベース、平井家住宅の場合には、歴史地震データベースを用い、応答スペクトルの距離減衰式¹⁵⁾を適用して計算した。両者ともに、この応答スペクトルに適合する模擬地震動を作成している。さらに、地盤の常時微動測定から得られるH/Vスペクトルから表層地盤の速度構造の同定を行い、表層地盤の増幅を考慮して入力地震動を策定している。確率論的なアプローチでは、供用期間を考慮した再現年数の設定が問題となる。数百年の歴史をもつ文化財建築物では、荷

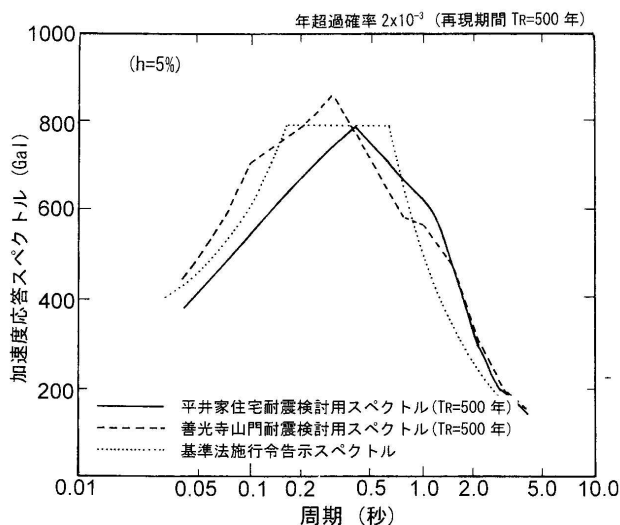


図-3 常時微動測定による梁間方向振動形
Uniform Hazard Spectra Utilized for Seismic Safety
Analysis of Important Cultural Buildings

重評価で再現期間を設定する場合、供用期間は次の構造修復までの期間とみなすのが適切であると考えられる。

もし、サイトに影響する活断層と断層パラメータがわかっているならば、断層モデルによるシナリオ地震を想定して、地震動を策定することもできる。その歴史的建築物がすでに最大級の地震動に相当する地震動を受けていると判断される場合には、その地震動を推定し、地震応答解析を行って、地震被害記録と照らし合わせれば、解析モデルの検証が可能となる。とくに周期性がみられる地震では、その建物が受けた歴史地震の地震動を推定し、被害の有無や程度を構造計算で検証しておけば、構造修復計画上の有用な知見となる。断層モデルによる評価には、翠川ら¹⁶⁾の断層モデルによる応答スペクトルの算定法、当該地点もしくはその近傍で中小規模の地震記録が得られている場合には、経験的グリーン関数法が適用できる。

3.3 構造要素の力学モデル

伝統的木造建築の主要な耐震要素には、柱の傾斜復元力、土壁・板壁、垂壁(小壁)、斗組の水平抵抗、柱・貫仕口のモーメント抵抗が挙げられる。これらのうち、柱の傾斜復元力、土壁、垂壁の剛性・耐力の評価方法は、近年の研究成果に基づいて文化庁文化財部の指針¹⁾に示されている。また、柱・貫仕口の力学モデルは、稲山¹⁷⁾によりめり込み抵抗モデルに基づいた実用的な算定式が示されている。板壁も周辺枠材へのめり込み抵抗で評価可能である²⁾。斗組もだばの主材に対するめり込み抵抗で評価する手法を提案している²⁾。

一方、柱・貫仕口のモーメント抵抗は、半剛接合のラーメン架構を形成するものである。構造的には貫は柱を貫通するのが望ましいが、実際には仕口のなかで継ぐ形式がとられることも多い。このような場合の接合部の力学モデルは研究課題として残されていた。

本稿では、仕口のなかで継ぐ工法の柱・貫接合部(差鴨居接合部)の力学モデルの検討のために行った解析を示す。解析は、加力実験¹⁸⁾を行った竿継ぎ仕口(図-5 参照)を対象とした。

解析手法は、平面応力要素を用いた2次元有限要素法を適用した。木造の仕口の力学挙動で考慮が必要と考えられるのは、(1)材料の異方性、(2)部材間の幾何学的非線形性(剥離と摩擦)である。この条件を評価できる解析ツールとして NASTRAN を適用した。解析では、図-5の a-a'断面と b-b'断面の各々について平面モデルを作成し、同じ部材の部分は節点変位が a-a'断面と b-b'断面で等しくなるように拘束した。

柱と梁に用いた材は米ヒバであり、材料試験¹⁹⁾の結果から、縦圧縮ヤング率 $E_x = 1,500 \text{ N/mm}^2$ 、横圧縮ヤング率 $E_y = 71.9 \text{ N/mm}^2$ とした。せん断弾性定数は建築学会木質構造設計規準を参照して $G_{xy} = (1/15) \cdot E_x$ とした。ポアソン比は、 $E_x \cdot \nu_{yx} = E_y \cdot \nu_{xy}$ より、 $\nu_{xy} = 0.40$ として、 $\nu_{yx} = 0.0192$ とした。車知(厚さ 6mm)にはケヤキを用いており、車知の圧縮試験と建築学会規準から、 $E_x = 7,500 \text{ N/mm}^2$ 、 $E_y = 750 \text{ N/mm}^2$ 、 $G_{xy} = E_x/15$ 、 $\nu_{xy} = 0.40$ 、 $\nu_{yx} = 0.040$ とした。部材間の接触・非接触を表す要素として、ギャップ要素を用いた。接触面の摩擦係数 μ は、実験結果¹⁹⁾から $\mu = 0.5$ とした。ギャップ要素は節点間のバネ要素として用いるが、接触時と剥離時の剛性を与える必要がある。本解析では、接触時(圧縮)の剛性に $0.2 - 6.0 \times 10^6 \text{ (N/mm)}$ 。剥離時(引張)の剛性は圧縮剛性の $1/10,000$ とした。

図-6 に仕口部のモーメント-回転角に関する実験結果と FEM 解析結果を示す。稲山の算定式¹⁷⁾に基づくめり込みによる降伏(弾性限界)モーメント(図-6 の破線)以下では、解析結果と実験結果はほぼ一致しており、FEM 解析は剛性の評価に有効であることが確かめられる。

図-7 に、FEM 解析による代表的な応力分布を示す。接触している面に作用する応力分布をみると、(竿底面と車知を除いて)柱と梁の接触部では三角形変位めり込みに近似できる応力分布をもつ応力の集中がみられた。したがって、柱と差鴨居(梁)の接触面の応力はほぼ集中力として表すことができる。接触点における集中荷重を仮定して力の釣合いを検討した結果は、文献 20)を参照されたい。本検討により、仕口の弾性限界モーメントの算定には稲山によるめり込み抵抗算定式が適用できること、めり込み降伏までの変形解析には有限要素モデルが適用できることが確かめられた。

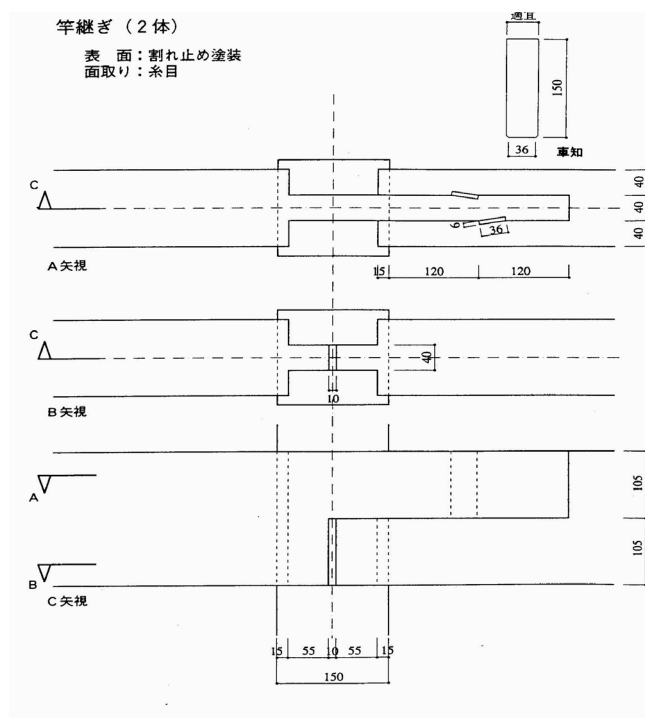


図-5 実験に用いた竿継ぎ仕口
Joint Used in Laboratory Test (Saotsugi)

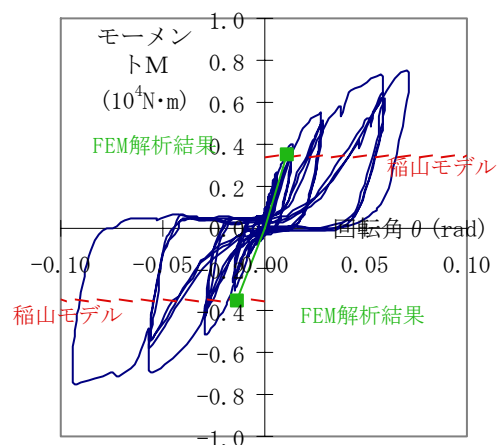
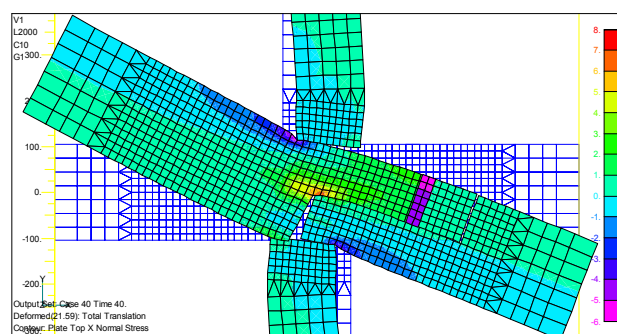
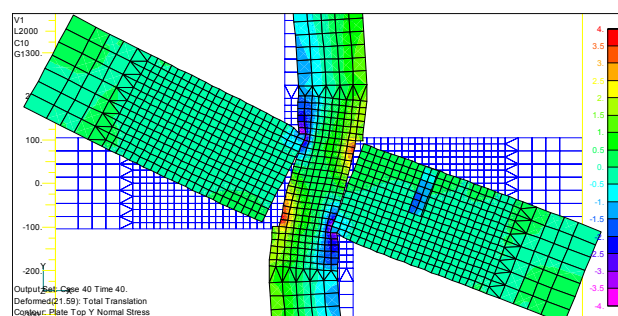


図-6 実験とFEM解析の比較
Moment-Displacement Angle Relation



(a) a-a'断面と車知の x(梁軸)方向の直応力(N/mm²)



(b) b-b'断面と車知の y(柱軸)方向の直応力(N/mm²)

図-7 FEM による変形と応力分布(正加力, M=33.3kNm)
Stress Distribution and Deformation Calculated at Moment of 33.3kNm

また、摩擦係数を繰り返しの効果を考慮し、 $\mu = 0.3$ としても変形に及ぼす影響は4%程度であり、FEM解析により、摩擦係数が接合部の回転抵抗に及ぼす影響は小さいことがわかった。

3.4 構造解析

構造要素の力学モデルを組み合わせ、全体系のモデルを構築して、建築物の耐震解析を行う。この段階では、定量的な構造補強検討も可能である。図-8は、永明院五重塔の構造設計解析²⁾で用いた平面並列モデルであり、図-9に静的増分解析による荷重変形関係を示す。図に示すように、宮大工の原設計に対して、耐震要素を増やすことにより、水平耐力が約2倍になることが確かめられる。専門診断の時刻歴地震応答解析では、上述のような骨組モデルを直接用いる、もしくは、骨組モデルの静的増分解析から得られる荷重変形関係に基づいてばね特性をモデル化した多質点系モデル²⁾を用いればよい。水平面内剛性は小屋組の場合には立体骨組モデル、梁伏せであれば接合部を半剛接合とした平面骨組モデルを用いて検討する。

4. まとめ

わが国では、1995年1月17日兵庫県南部地震以降、歴史的建築物の耐震性に関心が集まるようになり、この10年間、木造伝統構法建築の耐震安全性に関する研究が势力的に行われてきた。とくに、耐震要素の研究は実験あるいは解析的に進められ、現在では詳細解析におけるモデル化もおおむね可能になってきている。また、歴史的建築物の常時微動の測定データも蓄積しつつあり、解析モデルとの比較も行われている。本稿では、この約10年間の研究成果をふまえ、歴史的木造建築物の保存解体修理における耐震評価手法を提示した。一方、検討用入力地震動の評価法の研究も地震工学分野において進められてきており、歴史的建築物の耐震検討における地震動の評価法の考え方を提示した。もともと有する耐震性能を活かし、最小限で可逆的な耐震補強を施すために、合理的な地震動評価と耐震解析技術の一層の高度化が望まれる。

今後は、伝統構法建築物の大変形時の実挙動の把握および大変形領域での解析の検証が課題になると考えられる。その目的で、現在、東京都立大学(藤田香織講師)、東京大学(坂本功教授)と共同で津観音五重塔(三重県)の地震・台風観測を実施している。

善光寺三門及び同平井家住宅の耐震検討に関わる内容は文献21)を参照されたい。

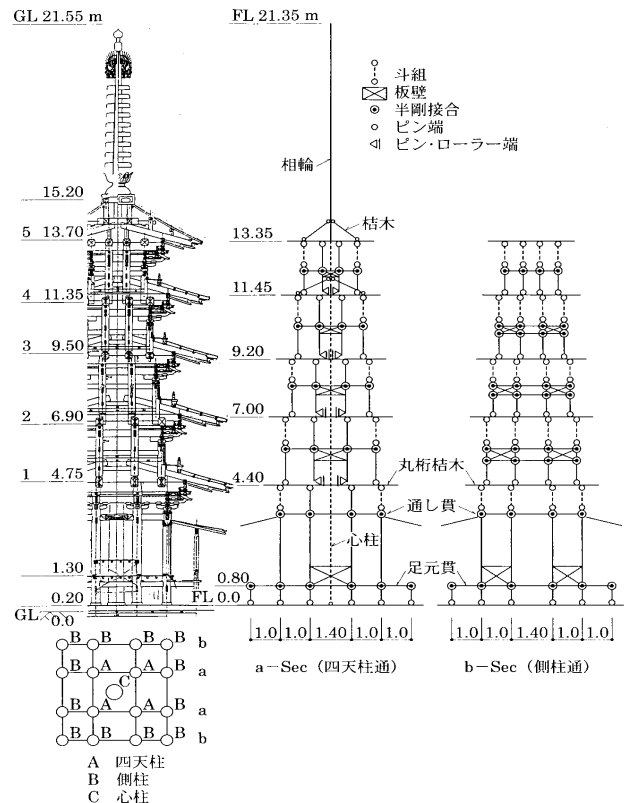


図-8 五重塔の耐震・耐風解析モデル
Analysis Model of Five-Storeyed Pagoda

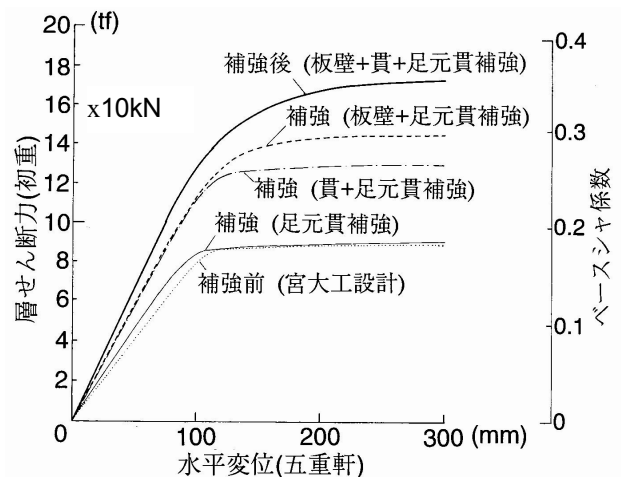


図-9 五重塔の静的増分解析による補強効果の比較
Calculation of Effects of Strengthening of Five-Storeyed Pagoda

参考文献

- 1) 文化庁文化財部：重要文化財(建造物)耐震診断指針，2001
- 2) 花里利一，荻原幸夫，三井所清典，大倉靖彦，稲山正弘，坂本功：木造伝統構法五重塔の設計における構造安全性の検討，建築学会技術報告集，第7号，pp33-38，1999
- 3) 花里利一，森田仁彦，柳澤孝次：伝統木造五重塔の動的挙動の調査，大成建設技術センター報，No.35，2002
- 4) 坂静雄：社寺骨組の力学的研究(第1部 柱の安定復元力，第2部 貫の耐力)，建築学会大会論文集，昭和16年4月，pp252-268，1941
- 5) 後藤一雄：貫通仕口による木造ラーメン(大黒柱)構造の研究，その1 仕口の挙動に関する実験的研究，建築学会構造系論文集，第366号，pp119-125，1986
- 6) 坂本功，河合直人，山下伸夫，大橋好光，安達文男：伝統的木造住宅の水平加力ならびに振動実験，建築学会大会学術講演集，構造，pp1227-1228，1985
- 7) 内田昭人，河合直人，前川秀幸：伝統的木造建築物の振動特性，その2 法隆寺五重塔の常時微動測定：建築学会大会学術講演梗概集，pp171-172，1996
- 8) 河合直人，内田昭人，前川秀幸：伝統的木造建築物の振動特性，その3 法隆寺金堂および中門の常時微動測定：建築学会大会学術講演梗概集，pp173-174，1996
- 9) 前川秀幸，内田昭人，河合直人：伝統的木造建築物の振動特性，その7 清水寺仁王門と南禅寺三門の常時微動測定，建築学会大会学術講演梗概集，pp259-260，1998
- 10) 前川秀幸，河合直人，内田昭人：伝統的木造建築物の振動特性，その10 元興寺極楽坊本堂・禅室の常時微動測定，建築学会大会学術講演梗概集，pp，2001
- 11) 長瀬正，佐分利和宏，今西良男，金子隆之：唐招提寺金堂の常時微動測定，建築学会大会学術講演集，構造，pp131-132，2000
- 12) 大場新太郎，木下顕宏：木造多層塔の振動特性，建築学会構造系論文報告集，No.559，pp47-54，2002
- 13) 文化財建造物保存技術協会：重要文化財善光寺山門調査工事報告書，長野県，2002
- 14) 文化財建造物保存技術協会：重要文化財平井家住宅保存修理工事報告書，茨城県，2003
- 15) 安中正ら：気象庁 87 型強震記録を用いた最大地動及び応答スペクトル推定式の提案，第24回地震工学研究発表会講演論文集，pp161-164，1997
- 16) 翠川三郎，小林啓美，地震断層を考慮した地震動スペクトルの推定，建築学会論文報告集，282号，pp71-81，1979
- 17) 稲山正弘：めり込み抵抗接合の設計(貫)，建築技術11月号，pp106-111，1995
- 18) 森田仁彦，柳澤孝次ほか：伝統的木造建築の構造性能評価(その3 柱-差鴨居接合部の実験)，建築学会大会講演集，構造Ⅲ，pp137-138，2000
- 19) 森田仁彦，花里利一，柳澤孝次：伝統的木造建築の構造性能評価(その4 木材の摩擦試験と車知の圧縮試験)，建築学会大会講演梗概集，構造Ⅲ，pp219-220，2002
- 20) 花里利一，森田仁彦，柳澤孝次：伝統的木造建築の構造性能評価(その5 柱差鴨居接合部の力学モデルの検討)，建築学会大会講演梗概集，構造Ⅲ，pp221-222，2002
- 21) 花里利一：伝統構法の荷重・外力 地震力・入力地震動，建築技術，2803June，No.641，pp111-113，2003