

京都御所参内殿耐震補強工事



図1 参内殿正面



図2 参内殿俯瞰写真

1 はじめに

京都御所^{さんだいでん}参内殿は、京都事務所が所管する伝統的木造建造物のひとつであり、現在でも行事に伴い使用されていることから、その安全性を確認するため、優先的に耐震診断を実施した。

本稿では、参内殿の耐震診断と建具を用いた新しい耐震補強について報告する。

2 建物概要

参内殿は、安政度内裏御造営の一環として、安政2年（1855）に建設された伝統的木造建造物である。京都御所の中心部に位置し、西面して建つ。3棟（参内殿^{ながはしのつばね}・長橋局^{そうじやどころ}・奏者所）から構成されており、総称して参内殿と呼ばれている。

木造、平屋建、入母屋造、屋根桧皮葺及び棧瓦葺（一部柿葺）、延べ床面積は707㎡。参内殿（狭義）のみ屋根に桧皮が葺かれている（図1～4）。

参内殿（狭義）は、上段の間、中段の間、下段の間3室があり、正月の年始参賀の時には、摂家や宮家、大臣などが西面する唐破風の御車寄から昇り、御常御殿へ参入した。東北に位置する長橋局は、奥で奏請、伝宣を掌る^{こうとうのないし}勾当内侍のいる場所であった。南側に上の間、中の間、下の間が並び、上の間には床棚がある。3室の北側に台所があり、^{かまど}竈が設けてある。台所の天井から壁は^{ぬりごめ}塗籠（防火



図3 京都御所総図

のために木部に土壁を塗ること）になっており、屋根には煙出しが設けられている。西北に位置する奏者所は、参内殿に直接昇らない人の控間や奥への進献などの受付場所とされた。

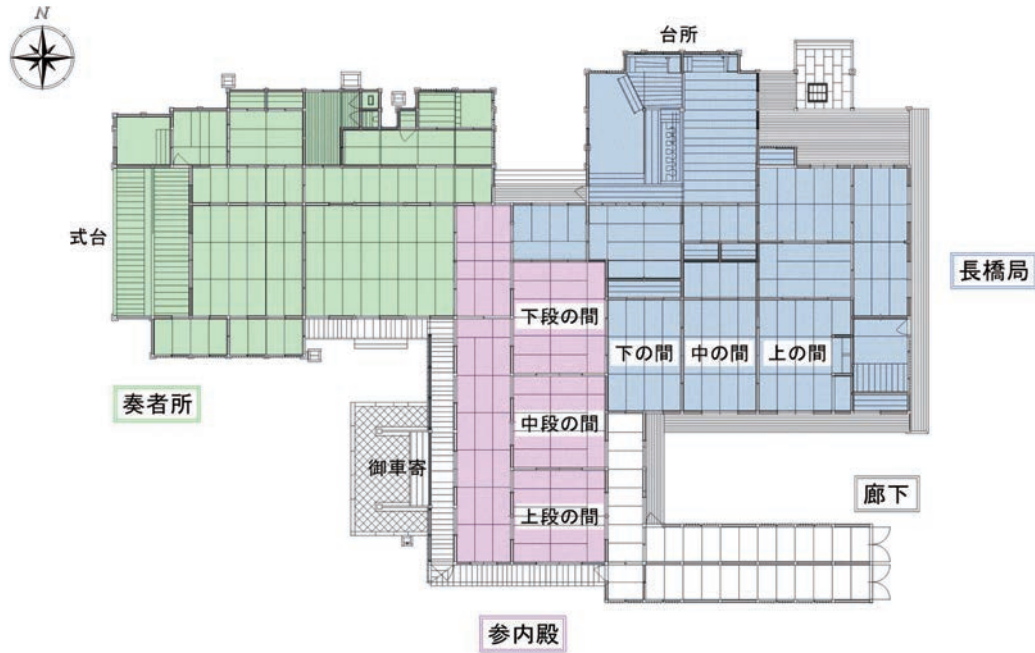


図4 参内殿平面図

3 工事に至る経緯

京都御所にある伝統的木造建造物のほとんどは、安政御造営時に建てられたもので、定期的な屋根の葺替に伴う整備工事に併せて診断し、必要に応じて補強工事を行うこととしている。しかし、参内殿は、毎秋10月下旬から11月下旬にかけて、京都御所内の御文庫（土蔵）に納められた御物の虫干し及び点検を行う曝涼ぼくりょうに使用されている建物であることから、耐震診断基準の改訂に合わせ、優先して耐震診断の見直しを行うこととなった。平成29年度に実施した診断の結果、必要耐震性能が満たされていないことが判明し、平成30年度から令和元年度にかけて耐震補強工事を実施した^(註1)。

4 耐震診断

4-1 耐震補強の方針

耐震補強は、壁の新設や鉄骨を用いて建物を支える等の方法が考えられるが、建物の文化財としての価値を損なうことのないよう、天井裏や床下などの見えない部分での補強を基本とする。また、耐震補強の検討にあたっては、可逆的な補強となるよう配慮し、有識者による技術指導を適宜受けることとする。

4-2 耐震診断概要

平成29年度に（一財）建築研究協会が31,590,000円で受注した。建物調査、周囲の地盤調査などを踏まえて、耐震診断を行い、耐震補強計画を立てた。

4-3 必要耐震性能

耐震診断にあたっては、必要耐震性能目標を定めたうえで現況の性能を把握し、その目標を満足する補強を検討する。目標は、文化庁文化財保護部「重要文化財（建造物）耐震診断指針」（平成24年度改正）に準じ、以下の3つの必要耐震性能が目安となる。

- ① 機能維持水準 大地震時に建物の機能が維持できる。
- ② 安全確保水準 大地震時に倒壊しない。中にいる人の人命は確保される。
- ③ 復旧可能水準 大地震時に倒壊する危険性があるものの、文化財として復旧できる。

参内殿ではその使用内容から、必要耐震性能目標を、大地震時に倒壊しない②「安全確保水準」に定めた。この水準では、全体の応答層間変形角が $1/30\text{rad}$ 以下であることを目安とし、曲げ折れする柱がないことが確認できれば、求める耐震性能を満足することとした。

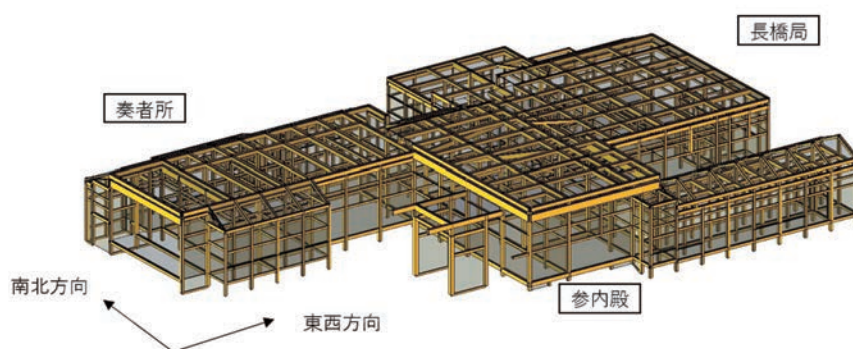


図5 参内殿架構図（立体フレーム）

4-4 耐震診断の方法

任意形状立体フレーム弾塑性解析プログラム^(註2)を用いて、等価線形化法（限界耐力計算法）^(註3)による耐震診断を行った（図5）。

4-5 建物の構造的特徴

参内殿（狭義）は椀皮葺、奏者所と長橋局は瓦葺であるため、3棟が取り合う部分では複雑な屋根形状となり、屋根荷重のバランスが悪くなっている。また、外周及び内部では舞良戸^{まいらど}や襖^{ふすま}などの建具が多用されており、耐震要素となる壁が少なく、壁下地も大部分が木摺下地^{きずり}であるため、竹小舞下地^{たけこまい}に比べて耐震性が劣っている。

4-6 耐震診断の与条件

耐震診断では、地盤が重要な要素となり、より堅固な地盤であれば有利に働くため、地盤性状把握の手法として、参内殿周辺の常時微動測定^(註4)を行い、過去のボーリングデータと合わせて解析を行った。結果、地盤種別は第1種地盤であり固い地盤であると判定された。

また、建物の与条件については、以下のとおりとした（表1）。

仮定条件と解析方針	柱・梁・壁・床	部材は健全と仮定し、劣化を考慮しない
	土壁・木摺漆喰壁・格子壁	せんかべ たれかべ 全壁・垂壁・腰壁を剛性・耐力ともに評価する
	屋根・床	全体非剛床 ^(註5)
架構と部材のモデル化	柱	線材置換 ^(註6) (切り欠きを考慮する)
	貫・床梁	線材置換 (切り欠きを考慮する)
	土壁・木摺漆喰壁・格子壁	ブレース置換 ^(註7) (全壁・垂壁・腰壁)
	屋根・床	面要素に置換する
	柱頭・柱脚	ピン
	貫・足固め材端	材端：半剛節 ^{ほんごうせつ} 左記以外はピン
材端条件 部材剛性・耐力の根拠	土壁	文化庁 重要文化財 (建造物) 耐震診断指針 (平成24年6月21日改正)
	木摺下地漆喰壁	(一財) 日本建築防災協会 木造住宅の耐震診断と補強方法 (2012年改訂版)
	格子壁	(公財) 日本住宅・木材技術センター 土塗壁・面格子壁・落とし込み板壁の壁倍率に係る技術解説書 (平成16年2月)
	屋根・床	日本建築学会学術講演会梗概集 (1999年) ほか

表1 建物の与条件一覧

4-7 現況診断結果

東西方向 (X方向) 及び南北方向 (Y方向) で代表節点の応答層間変形角は $1/30\text{rad}$ 以下であったが、東西方向の垂壁下端で曲げ折れる柱が9か所、床下で曲げ折れる柱が5か所、南北方向は垂壁下端 (一部欄間) で曲げ折れる柱が15か所あることが判明し (表2、図6)、現状では必要耐震性能を満足しない結果となった。

	東西方向(X方向)		南北方向(Y方向)	
	正加力時	負加力時	正加力時	負加力時
代表節点の応答層間変形角	$1/31 < 1/30$	$1/31 < 1/30$	$1/31 < 1/30$	$1/31 < 1/30$
最大応答層間変形角	$1/22 < 1/15$	$1/23 < 1/15$	$1/18 < 1/15$	$1/18 < 1/15$
木造部材の耐力確認	曲げ折れの可能性14か所		曲げ折れの可能性15か所	

表2 現況耐震診断結果

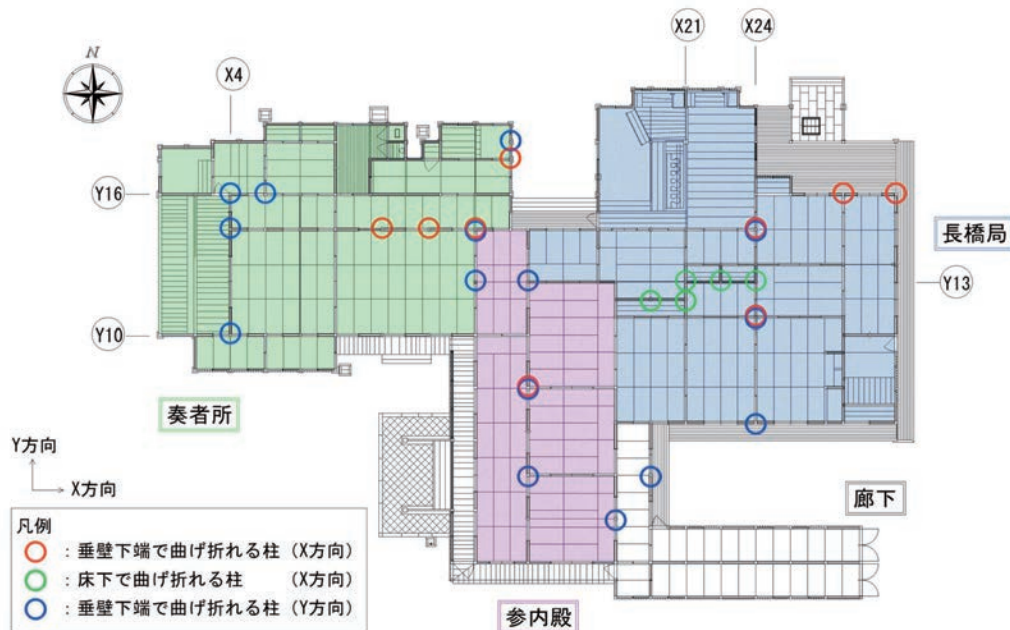


図6 現況耐震診断平面図

4-8 補強方法の検討

柱の曲げ折れを回避するため、まず既存の壁を補強することを検討した。しかし、壁を補強すると、剛性が強くなり隣接する柱に新たな曲げ折れが発生してしまい、壁での補強が困難であることがわかった。また、床下や小屋裏など見えない部分での補強は、柱が受ける力を分散することができず、柱の曲げ折れを回避できない診断結果となった。

今回曲げ折れる柱は、内法長押^{うちのりなげし}(註8)の下端部分が弱点となっていたため、耐震補強建具をはめ込み、柱の曲げ折れを回避することが提案された。

4-9 暫定補強内容

曲げ折れする柱に隣接させて耐震補強建具を配置した。既存の建具に追加して耐震補強建具をはめ込むため、開閉できなくなる襖があったが、使用方法を考慮して位置を決定し(図7)、意匠も襖調等にする配慮をした。

また、耐震補強建具が力を受けると、端部角が鴨居や敷居の中間部分を押し上げたり押し下げたりするため、垂壁に構造用合板を入れ、敷居下には束を新設することで、鴨居と敷居が受ける力を分散させ、その影響を小さくした(図8)。

床下における柱の曲げ折れに対しては、構造用合板張りを行い補強することとした(図9)。

今回診断に用いた耐震補強建具の耐震性能は計算上での想定値であり、実験から導かれたデータではなかった。そこで、確実な耐震補強とするため、力学的特性を確認する実物大実験を整備工事と併せて実施した。

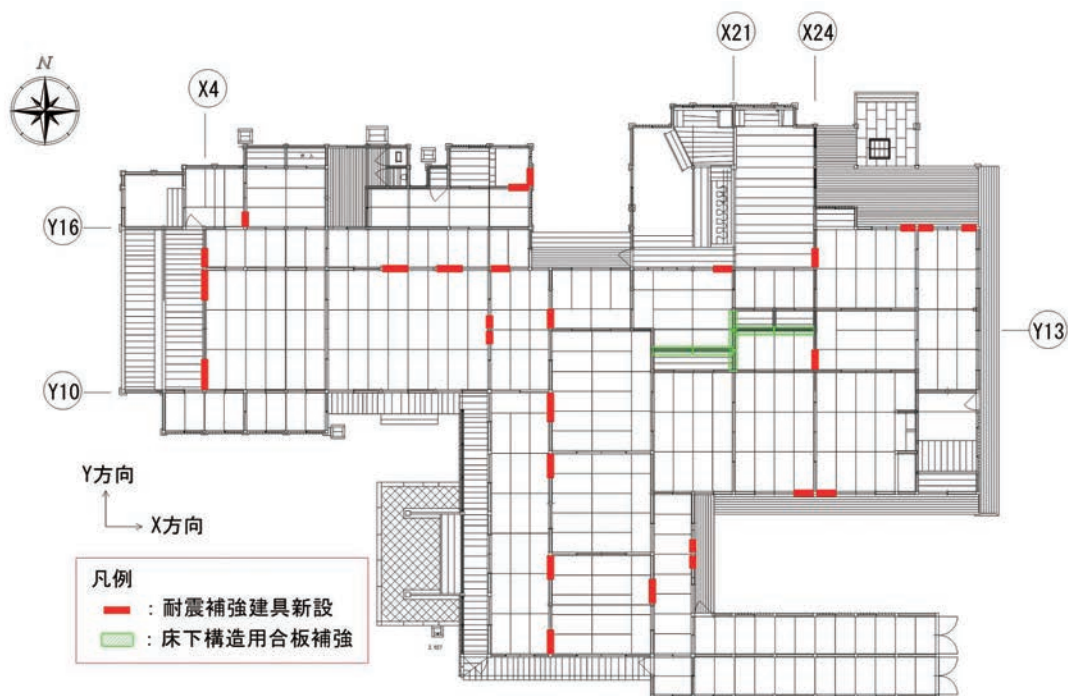


図7 補強計画概要図(暫定)

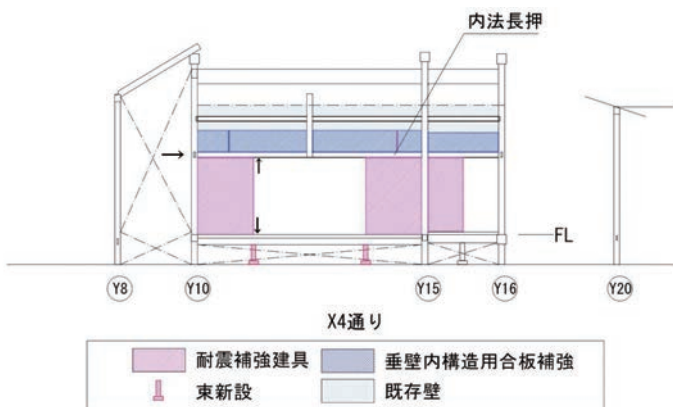


図8 軸組図（新設床束、垂壁内補強合板）（暫定）

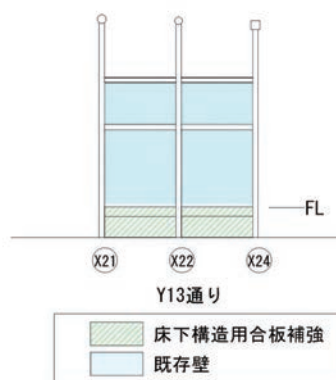


図9 軸組図（床下合板補強）（暫定）

5 整備工事

5-1 整備工事概要

整備工事は、平成30年から令和元年12月までを工期とし、(株)安井杵工務店が125,915,000円で受注した。工事内容は、耐震補強建具の設置とそれに伴う木工事、壁の塗替及び実物大実験、電気設備改修、周辺の長押^{なげしべい}修繕工事である(表3)。耐震診断に伴う実物大実験は、大阪府吹田市にある(一財)日本建築総合試験所にて実施した。

耐震診断に関する工事監理は(一財)建築研究協会が行った。

	平成30年度							平成31年度									
	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
行事			曝涼														曝涼
直接仮設		事務所設置															
木工									調査		床下補強・修繕					設備工事に伴う木工事	
耐震実験			試験体製作			21.24 実験		試験体製作		13.15 実験							
左官												壁塗替					
建具												建具製作		建具建合鳥の子張			
電気設備											火災報知設備	火災報知設備				照明コンセント改修	
技術指導	●		●	●	●	●	●	●		●	●		●	●		●	

表3 実施工程表

5-2 実験目的

耐震補強建具の面内せん断試験を行い、設計で想定した剛性44kN/rad/m以上、最大耐力を8kN/m以上保有しているかを確認する。

5-3 試験体製作

実物大の試験体を製作した(図13)。試験体は、参内殿の材寸、材質、仕口、壁仕様を忠実に再現し、幅2.7m、高さ5.0mのものを4体製作した(図10、表4)。耐震補強建具は、24mmの構造用合板とし、敷居と鴨居にさや管を2か所ずつ埋め込み、ステンレス棒φ6を介して位置がずれないように固定した(図11)。

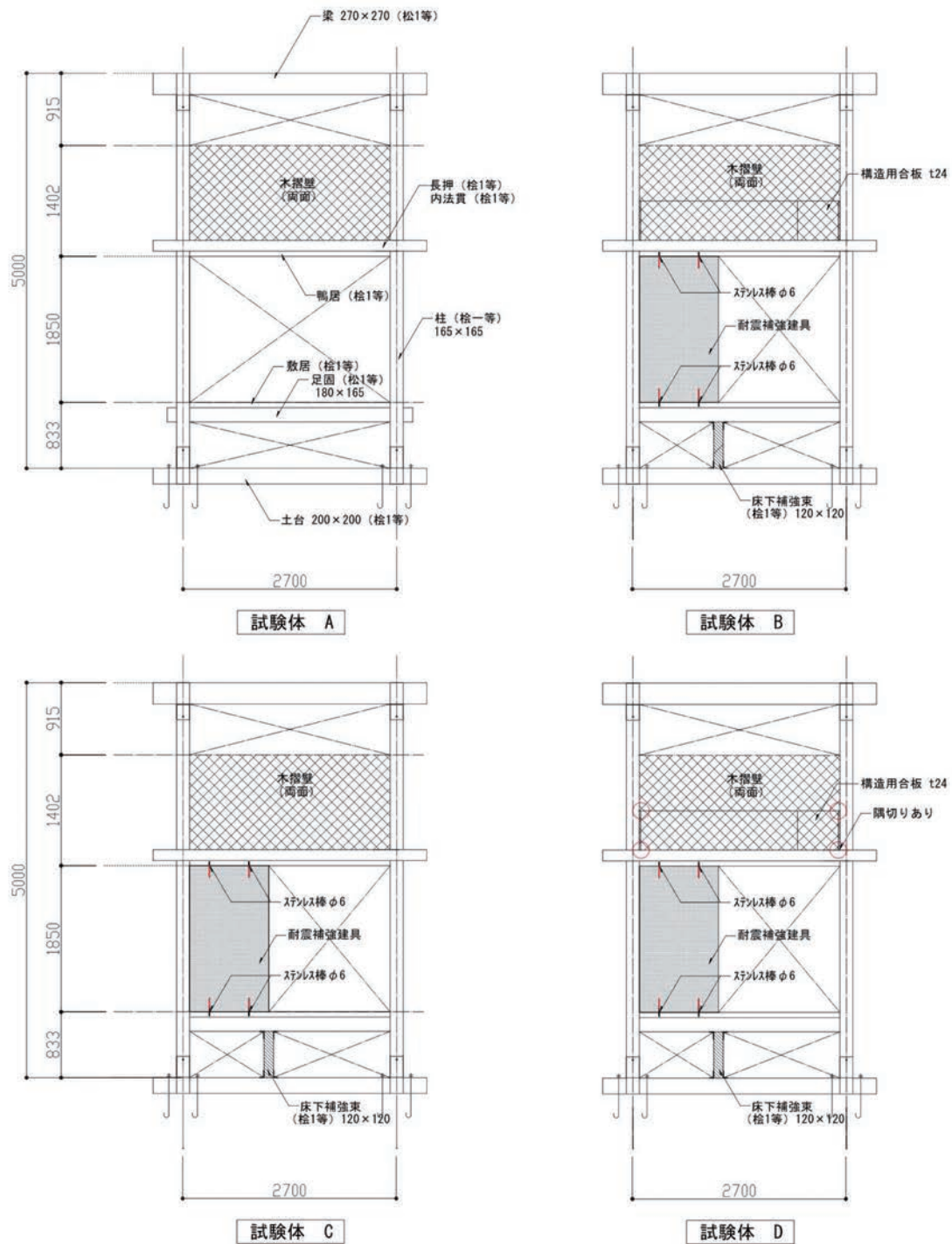


図10 試験体 概要図

	耐震補強建具	垂壁構造用合板補強	目的
試験体 A	なし	なし	現況の耐震性能の把握
試験体 B	あり	あり	計画する耐震補強の性能を把握
試験体 C	あり	なし	耐震補強建具の耐震性能の把握
試験体 D	あり	あり（隅切り）	垂壁合板補強の隅切りの効果の把握

※ 試験体Aと試験体Cの比較を行い、耐震補強建具の性能を測る。

※ 試験体Bは、垂壁の構造用合板補強と耐震補強建具を併用したときの耐震性能を測る。

※ 試験体Dは、試験体Bを改良したものである。

表4 試験体区分表

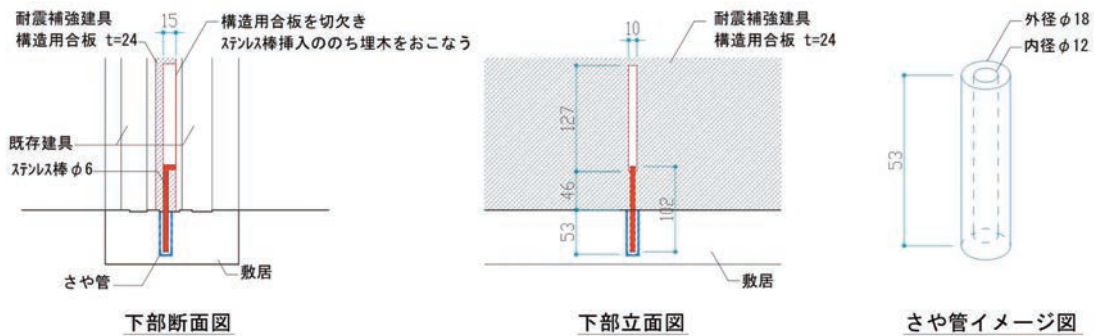


図11 耐震補強建具固定部分詳細図

5-4 実験方法

試験体を固定し（図12、14）、梁部分に水平力をかけ、せん断変形角を $1/300$ 、 $1/200$ 、 $1/150$ 、 $1/100$ 、 $1/50$ 、 $1/30$ 、 $1/15$ 、 $1/10$ （単位：rad）まで正負3回ずつ強制的に変位させ、その時に試験体が受ける力と変位を測定し（図15）、そのデータから剛性と耐力を求めた。

（参考）試験体の柱長さが5mなので、せん断変形角が $1/300$ radでは柱頭の変位は16.6mm、 $1/10$ radでは500mm変位させる。

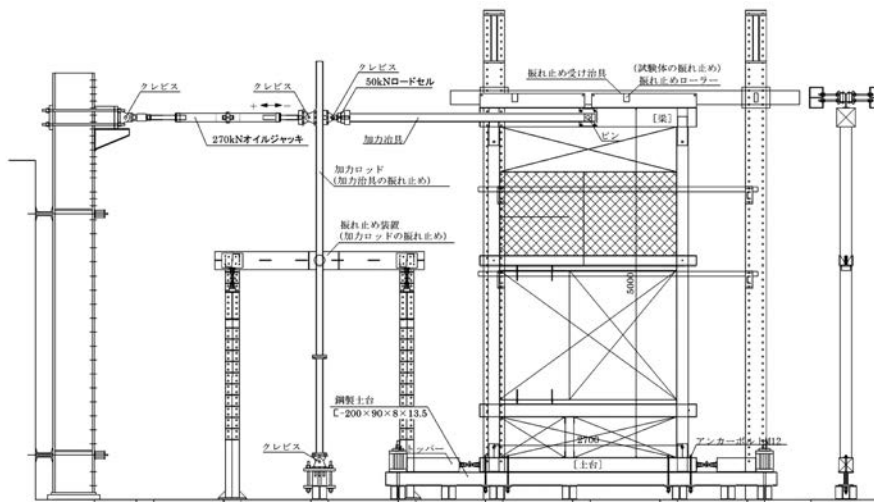


図12 実験装置概要図



図13 試験体製作



図14 実物大実験



図15 計測モニター

5-5 実験結果

実験では、変位が大きくなるにつれ、垂壁が割れはじめ（図16）、耐震補強建具の端部に割れが確認されるようになった（図17）。最終的には、土壁の落下（図18）、柱への長押のめり込み、耐震補強建具固定部分の破断がみられた。

結果としては、試験体A・C（図19）より、耐震補強建具の剛性が660kN/rad/m、最大耐力が8kN/mであることがわかった。また、土壁の剛性が想定したよりも小さいことが判明した。

試験体Bでは、1/30radの変形時に垂壁の剥落が発生した。これには壁内の構造用合板の角が影響すると考え、試験体Dでは構造用合板の角を丸くした。実験の結果、垂壁の構造用合板の有無や隅切りの有無は、耐震性能に大きく影響しないことがわかった。

文化庁は、ホームページで「文化財建造物構造実験データ集」を公開しており、今回の実験結果も、そこに公開されているため、詳細はそちらを参照されたい。

〈文化財建造物構造実験データ集〉

<https://www.bunka.go.jp/seisaku/bunkazai/hogofukyu/92048001.html>



図16 垂壁の割れ

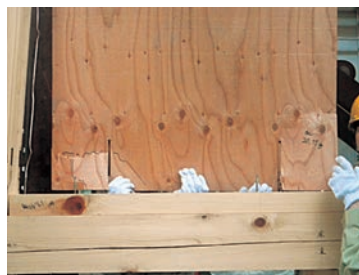


図17 耐震補強建具破損状況



図18 実験後の耐震補強建具と土壁

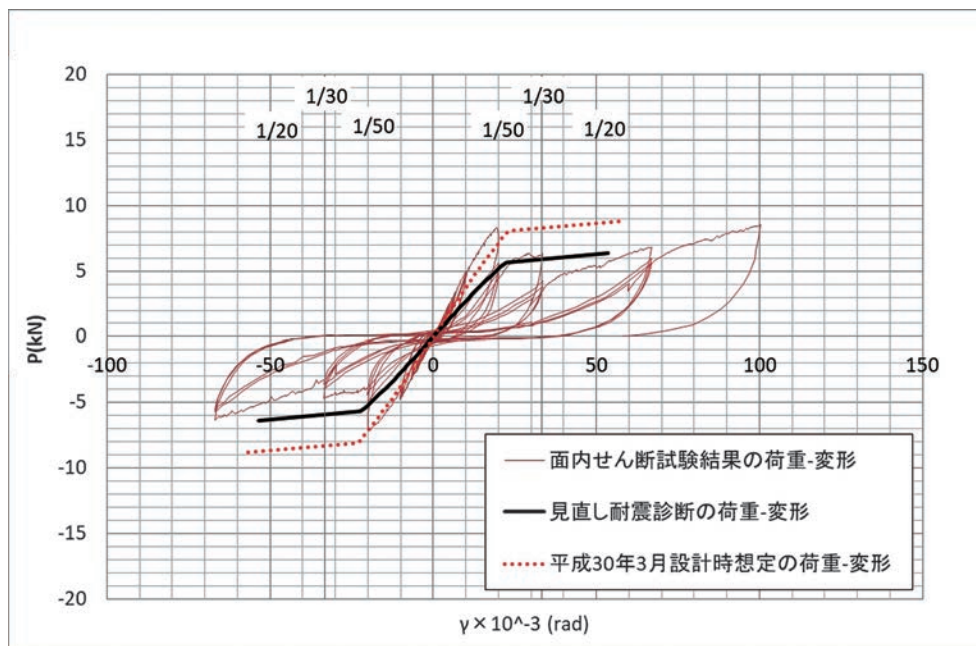


図19 試験体A及び実験結果前後の荷重・変形（例）
※横軸は変位、縦軸は応力を示す。

5-6 補強内容

実験結果を基に現況の耐震診断を見直した。土壁の剛性が当初の想定より小さい結果となったことで、代表節点での応答層間変形角は1/30radを超えた（表5）。しかし、柱にかかる力が小さくなったため、曲げ折れる柱が東西方向で14本から13本、南北方向で15本から12本に減り、建具補強及び床下合板補強の位置が確定した（図20）。また、垂壁の構造用合板による補強は、有効でないことが実験で判明したため取り止めた（図21、22）。

	東西方向(X方向)		南北方向(Y方向)	
	正加力時	負加力時	正加力時	負加力時
代表節点の応答層間変形角	1/29.8 > 1/30	1/29.9 > 1/30	1/27 > 1/30	1/27 > 1/30
最大応答層間変形角	1/21 < 1/15	1/20 < 1/15	1/17 < 1/15	1/17 < 1/15
木造部材の耐力確認	曲げ折れの可能性13か所		曲げ折れの可能性12か所	

表5 実験結果を反映させた現況診断結果

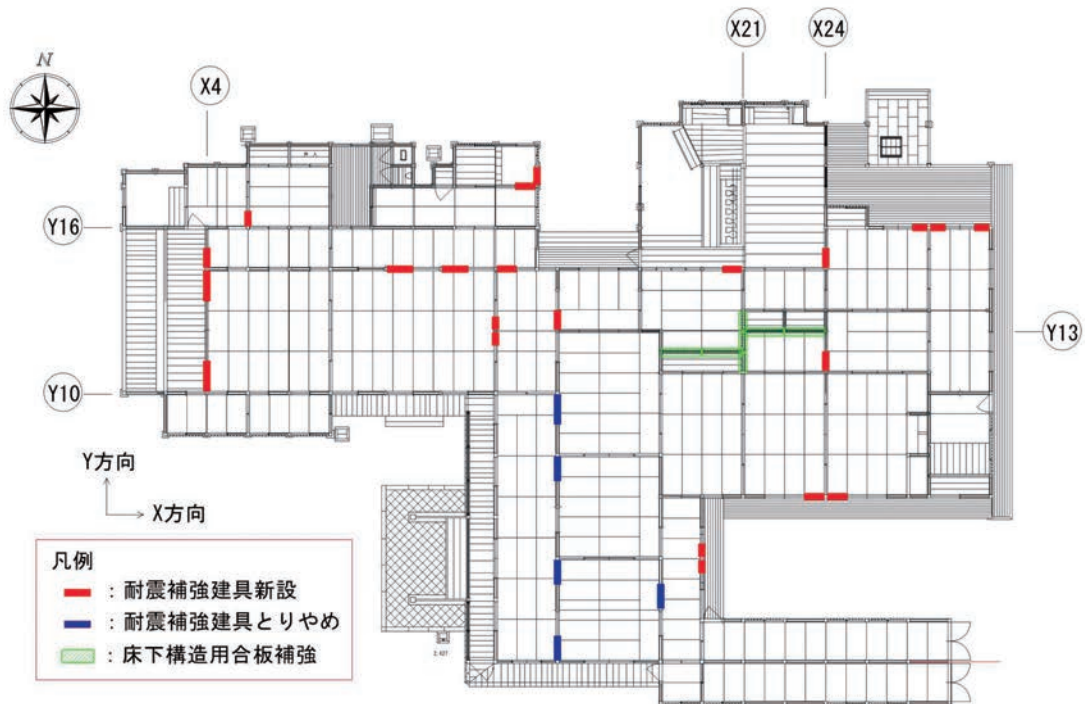


図20 耐震補強概要図

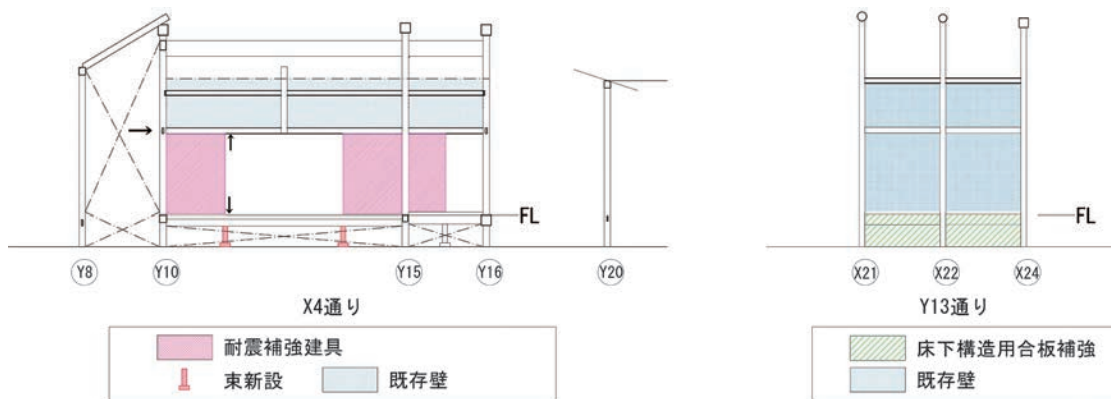


図21 軸組図（新設床束）

図22 軸組図（床下合板補強）

6 耐震補強工事

6-1 耐震補強建具（白貼風）

内部にはめ込む耐震補強建具（図23）は、見え掛かり部分は白貼（鳥の子^{註9}）を貼った襖とし、既存の障子の位置に設置し、障子は格納した。通常襖が取り外されている箇所（図24）は、耐震補強建具の幅を最小限にし、漆塗のかまち框を廻し白貼の襖風とした。



図23 耐震補強建具（白貼風）

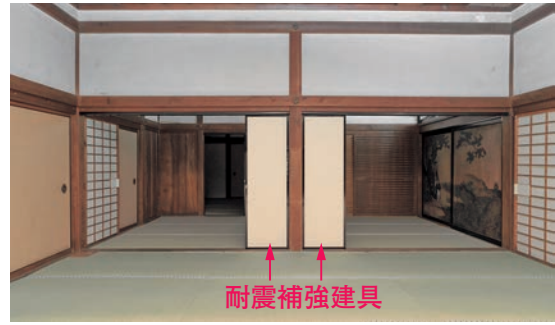


図24 耐震補強建具（白貼風）

6-2 耐震補強建具（板戸風）

戸襖と障子が並ぶ部分では、戸襖の一枚を固定して耐震補強建具をはめ込んだ（図25）。耐震補強建具は、木目調のシートを張り板戸風に見せた。障子を引けば在来どおりの見え方となる（図26）。



図25 耐震補強建具（板戸風）



図26 耐震補強建具（障子を引いた状態）

6-3 耐震補強建具（舞良戸風、障子風）

外部廻りに設置した耐震補強建具は、舞良戸と横並びになるため、^{さん} 棧を構造用合板に取り付け、舞良戸に見えるようにした（図27）。また、^{らんま} 欄間の障子部分にはめこむ耐震補強建具には、外から障子に見えるように白い和紙調のシートを貼った（図28）。



図27 耐震補強建具（舞良戸風）



図28 耐震補強建具（障子風）

6-4 床下補強

床下補強（図29）では構造用合板補強（図30、31）及び床東の新設（図32）をした。床下等の修理に伴い、畳をめくった際、床板が斜めに貼られていることが確認された（図33）。これは能舞台の橋懸り（註10）の部分であり（図34）、孝明天皇紀及び明治天皇紀（ともに文久元年3月24日条）の中に、参内殿で実際に能（能楽）が上演されたという記述がある。

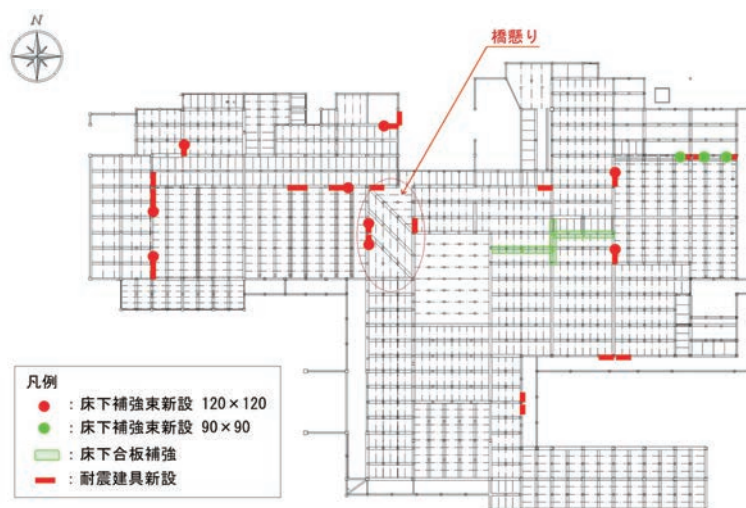


図29 床下耐震補強図



図30 床下補強木下地



図31 床下構造用合板補強



図32 新設床東



図33 橋懸り部床

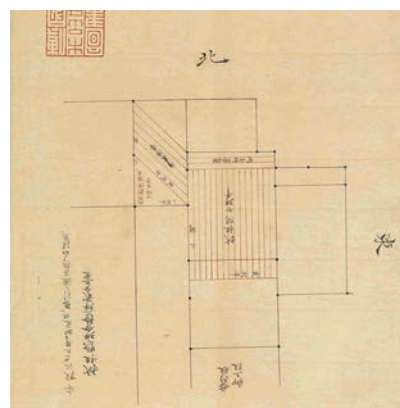


図34 内裏〔安政度〕参内殿拭板間平面図（安政4）（部分）（東京都立図書館所蔵）

6-5 小屋裏補強

小屋裏内の吊束が地震で脱落する可能性があるため、マルチフィラメントロープによって補強を行った(図35~37)。ロープでの補強は京都大宮御所の耐震補強にも使われた方法でもある。

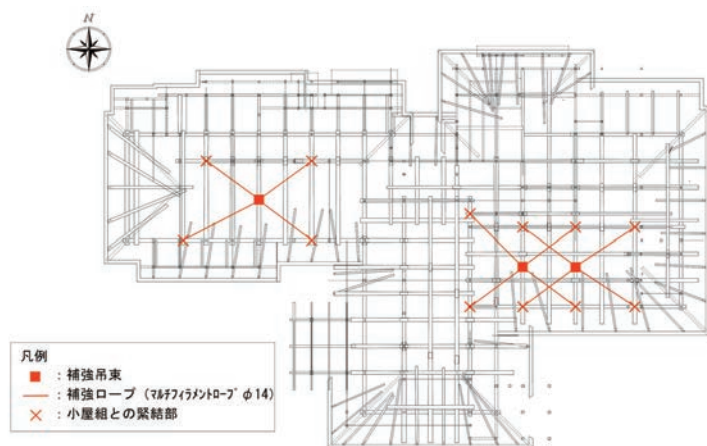


図35 小屋裏補強図



図36 吊束写真



図37 緊結部写真

6-6 耐震補強後の耐震性能

耐震補強を行ったことにより、全体的な応答層間変形角が小さくなり、曲げ折れる柱がなくなった。結果、必要耐震性能目標を満足することができた(表6)。

東西方向(X方向)	現況		耐震補強後	
	正加力時	負加力時	正加力時	負加力時
代表節点の応答層間変形角	1/29.8 > 1/30	1/29.9 > 1/30	1/38 < 1/30	1/38 < 1/30
最大応答層間変形角	1/21 < 1/15	1/20 < 1/15	1/24 < 1/15	1/24 < 1/15
木造部材の耐力確認	曲げ折れの可能性13か所		曲げ折れの可能性なし	

南北方向(Y方向)	現況		耐震補強後	
	正加力時	負加力時	正加力時	負加力時
代表節点の応答層間変形角	1/27 > 1/30	1/27 > 1/30	1/34 < 1/30	1/34 < 1/30
最大応答層間変形角	1/17 < 1/15	1/17 < 1/15	1/18 < 1/15	1/18 < 1/15
木造部材の耐力確認	曲げ折れの可能性12か所		曲げ折れの可能性なし	

表6 耐震補強後の診断結果

7 おわりに

今回のような建具を用いた耐震補強は、日本の伝統的木造建造物に施されたことがなく、前例のない新しい試みであった。構造用合板を建具としてはめ込んだことで、耐震性能が向上し、建物の意匠を損なわない可逆的な補強をすることができた。また、実験を行ったことで、より

正確な耐震診断が可能となり、必要最小限の補強となった。

建具補強は劇的に耐震性能を向上させるものではないが、柱の曲げ折れがなくなることで、必要耐震性能を満足することができるため、他の文化財建造物でも活用に繋がれば幸いである。

建具の設置にあたっては、耐震補強建具を固定するために、鴨居及び敷居へ正確な穴を空ける必要があり、現場での精度を高く求められる施工となり苦勞を要した。また、耐震補強建具に力を伝達させるため、内法貫と鴨居間の隙間は埋木をしたり、建具と既存木部の隙間が少なくなるよう精度を求めたりと、細部まで丁寧に施工をした。

設計・工事に当たり、京都女子大学客員教授 斎藤英俊氏、奈良文化財研究所文化遺産部客員研究員 林良彦氏、京都大学名誉教授 金多潔氏には専門的な助言、指導を頂き、無事完成したことを深く感謝申し上げたい。

(工務課 上田拓也 篠田佳枝)

註

- (1) 文中の耐震診断及び実物大実験結果については、参内殿耐震補強工事に伴う設計業務報告書、参内殿ほか耐震補強その他工事に伴う監理業務報告書(ともに〈一財〉建築研究協会)、木造伝統工法耐力壁の面内せん断試験報告書(〈一財〉日本建築総合試験所)による。
- (2) 3次元の複雑な建物形状の解析に対応可能で、部材の弾性域(線形)から塑性域(非線形)の解析を行うことができるプログラムソフト。
- (3) 耐震診断方法の一つ。建物の固有周期及び地盤特性から、建物にかかる地震力を計算し、建物の復元力特性(耐震要素)と合わせて応答値を求める。他にも時刻歴応答解析などがある。
- (4) 人が感じるできない地盤の僅かな揺れ(常時微動)を計測すること。
- (5) 床面や屋根面が一体となって変形する剛床ではなく、個別に変形すること。
- (6) 部材を単純な線に置き換えてモデル化すること。
- (7) 壁等を四周の枠と交差する線(ブレース)にモデル化すること。
- (8) 鴨居上の長押のこと。
- (9) 今回使用したものは本鳥の子2号であり、^{みつまた}三檜のみの手漉き和紙のことである。
- (10) 能舞台の一部。本舞台と鏡の間との間の通路。