

大徳寺方丈におけるアングル鋼枠付舞良戸補強の性能試験

- 種別：材料試験 [木材・煉瓦・鉄・コンクリート・その他]、重量測定、
要素試験 [接合部・軸組・壁・水平構面 (床・天井・小屋組・屋根)・非構造部材・その他]、
補強性能試験 [接合部・軸組・壁・水平構面 (床・天井・小屋組・屋根)・非構造部材・その他]

●基本情報

文化財名称：大徳寺方丈及び玄関
文化財種別（指定年月日）：国宝（明治 42 年 4 月 5 日、昭和 32 年 6 月 18 日）
所在地：京都府京都市北区紫野大徳寺町
所有者（管理団体）：宗教法人大本山大徳寺
構造形式：(方丈) 桁行 29.8m、梁間 17.0m、一重、入母屋造、棧瓦葺、背面雲門庵附属
建築年：寛永 12 年（1635）
事業名称：国宝大徳寺方丈及び玄関ほか 3 棟保存修理強化対策事業
事業期間：令和 2 年 11 月 2 日～令和 8 年 10 月 31 日
工事種別：半解体修理
事業者：宗教法人大本山大徳寺
設計監理：京都府教育委員会
実験計画者：株式会社立石構造設計（香川大学創造工学部創造工学科宮本研究室、近畿職業能力開発大学校建築施工システム技術科学都宮研究室）
実験機関：近畿職業能力開発大学校
実験年月日：令和 5 年 3 月 7、8、9 日
引用・参考文献：『重要文化財金剛三昧院客殿及び台所ほか 1 基修理工事報告書』（財団法人高野山文化財保存会、平成 25 年 3 月）
『国宝大徳寺方丈及び庫裏附廊下耐震調査診断業務報告書』（株式会社立石構造設計、令和 4 年 3 月）

●実験に至る経緯と目的

令和 3 年度に実施した耐震調査診断の結果、現況では大地震時の応答層間変形角が建物隅部で 1/11（重心位置で 1/16）、かつ、幾つかの柱で曲げ基準強度に達する事が確認された。曲げ基準強度に達する柱は特に正面入側通の柱に多く、補強案の一つとして、柱際に立つ舞良戸を構造用合板で製作した舞良戸状の壁に置換する案が提示された。一方、解体に伴う調査により、正面側通り及び入側通りには、舞良戸を含む各部材とも特に良材が使用されている事が判明した。そこで外観を出来る限り維持する事を重視し、代替案と

して舞良戸の大きさに合わせたアングル鋼枠を柱際に立て込む案を検討したが、枠のみを耐震要素にすると、部材厚が大きくなり他の建具に干渉する事が懸念された。以上の事から、アングル鋼枠付舞良戸のせん断性能の定量的把握を目的として、実験を実施した。なお、他の建具への干渉が少なくなるよう、アングル鋼枠は最小サイズとした。

● 姿図・寸法

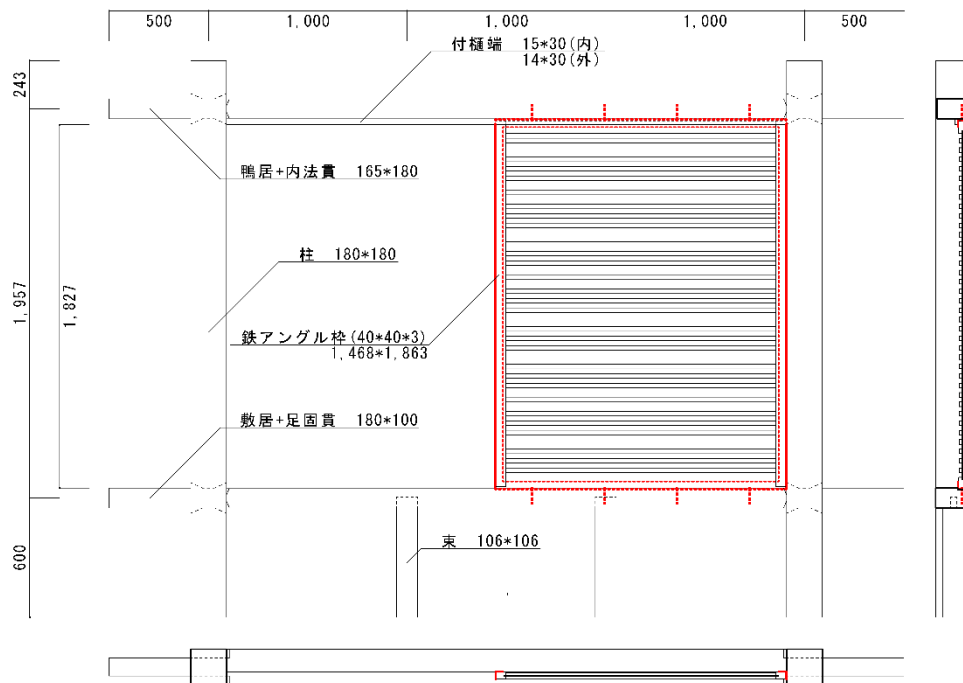
【使用材料】

(軸組) 柱：杉 180*180*2,800 mm、床束：杉 106*106*604 mm、敷居：杉 180*100*4,000 mm (F 試験体・M 試験体溝：36*4 mm、RM 試験体溝：39*7 mm)、鴨居：杉 165*180*4,000 mm、付樋端：杉 15(14)* 30*2,820 mm

(建具) 堅框：桧 52*35*1,837 mm、下棧：桧 58*35*1,461 mm、上棧：桧 61*35*1,436 mm、力子：桧 23*13*1461 mm、舞良子：桧 23*13*1,448 mm、嵌板：桧 4.5*876 mm、堅框と下棧・上棧は鎌ホゾ仕口、嵌板(内側)から舞良子(外側)に向かって N13 釘で 28 箇所、舞良子(内側)から舞良子(外側)に向かって N25 釘で 13 ないし 14 箇所釘止

(補強材) アングル鋼枠：SS400、L3*40*40 mm、敷居・鴨居に M6*75 コーチスクリューで 4 箇所止

【試験体寸法】



● 概要

木造軸組に舞良戸を立てた試験体を新規に製作し、水平加力試験を行った。

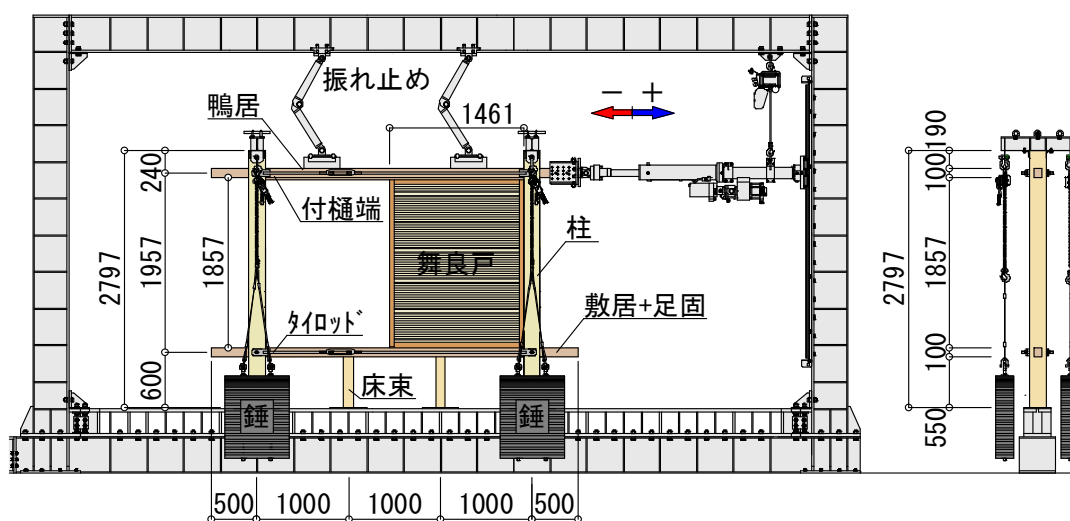
●実験方法

F 試験体：木造軸組のみから成る試験体

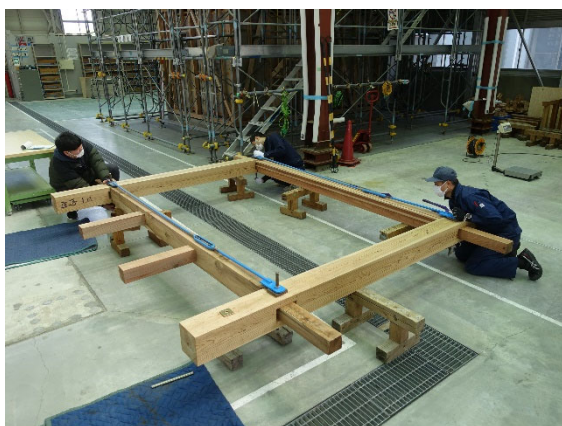
M 試験体：F 試験体に舞良戸を立てた試験体

RM 試験体：F 試験体にアングル鋼枠を取り付け、枠内に舞良戸を組み入れた試験体

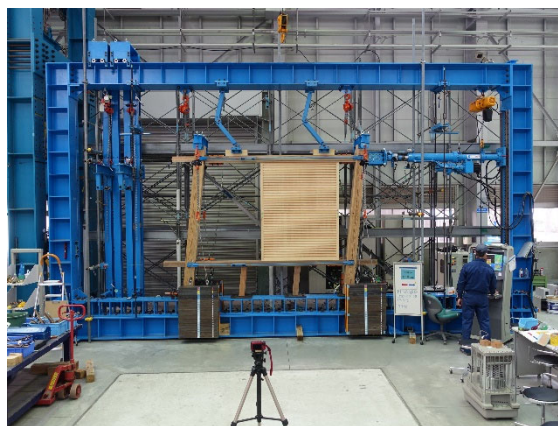
柱と鴨居・敷居の接合部はモーメントが極力生じない形状とした。鋼製ダボ（φ18mm）を取り付けた鉄板を載荷フレームに固定し、柱脚断面中央に設けたダボ穴と接合した。鉛直軸力は柱頭部から鋼製錘を用いて柱1本あたり20kNを与えた。水平荷重はアクチュエーターにより鴨居に与え、タイロッドを介して左右の柱の変形が同一となるように加力



し、柱の見かけのせん断変形角が $1/200 \sim 1/10\text{Rad}$ で正負3回ずつの交番加力とした。



架構組立状況

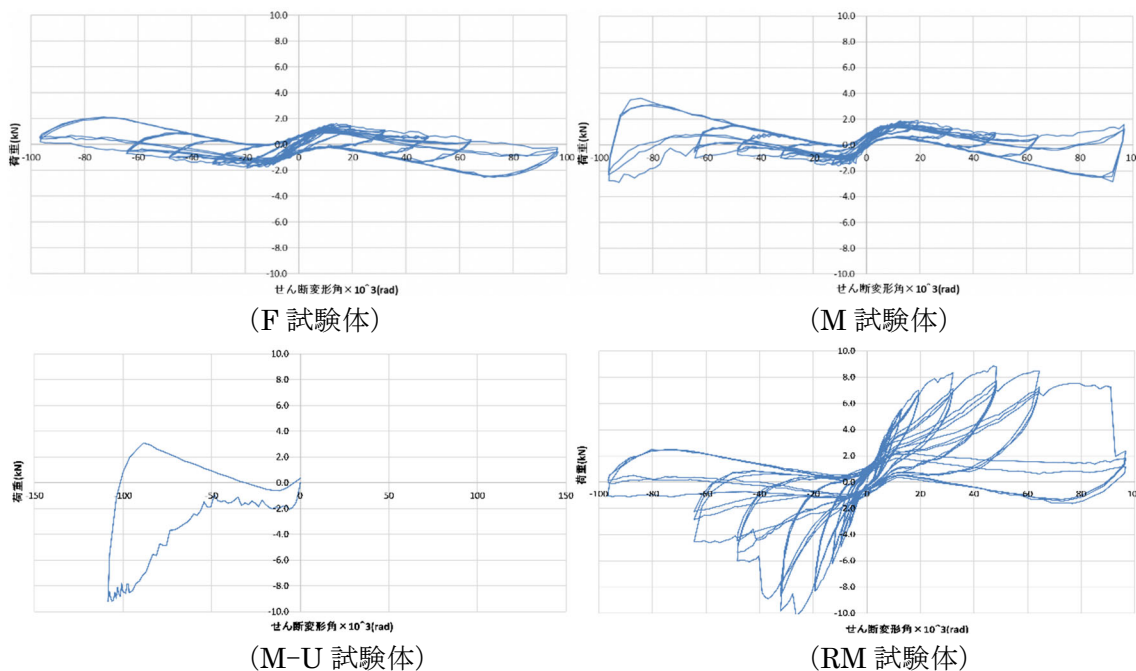


実験状況

●特性値

—

● 荷重変形



F 試験体は約 $1/75 \sim 1/50 \text{Rad}$ で最大荷重(約 1.5kN)に達した後、荷重は低下し続け、約 $1/15 \text{Rad}$ で荷重が 0 を下回った。PA 効果による荷重低下が生じる変形角は柱のアスペクト比から約 $1/15 \text{Rad}$ と想定されるため、柱と鴨居・敷居の接合部のモーメント抵抗は非常に小さく、柱傾斜復元力の影響が大きいと考えられる。

M 試験体は約 $1/15 \text{Rad}$ まで F 試験体と同様の傾向を示したが、それ以降特に負方向で荷重が増加し、 $-1/10 \text{Rad}$ で最大荷重(約 3kN)に達した。 $1/15 \text{Rad}$ は鴨居と舞良戸の初期の隙間から接触すると想定される変形角と概ね一致しており、舞良戸がせん断力を負担したことが影響していると考えられる。そこで載荷終了後に鴨居と舞良戸の隙間に埋木を入れたうえで負方向に再載荷を行った(M-U 試験体)。その結果、約 $-1/20 \text{Rad}$ から荷重が増加し、舞良戸の面外変形や左側の堅框の割裂破壊が確認され、約 $1/9 \text{Rad}$ でジャッキのストロークの容量が限界値に達し、最大荷重(約 9kN)で載荷を終了した。実験後に解体した試験体を観察すると、敷居に対して舞良戸がめり込んだ跡が確認された。

RM 試験体は、 $+1/100 \text{Rad}$ でアングル鋼枠が浮き上がり始め、 $-1/50 \text{Rad}$ で左側の堅框の割裂破壊が確認され、 $+1/30 \text{Rad}$ でコーチボルトが引き抜け始め、 $-1/30 \text{Rad}$ で嵌板の割裂破壊や舞良子の座屈が確認された。その後、負方向では、 $-1/30 \text{Rad}$ で最大荷重(約 10kN)に達した後、 $-1/20 \text{Rad}$ 以降で舞良子および嵌板の面外座屈の進行とともに荷重が大きく低下した。一方、正方向では、 $+1/20 \text{Rad}$ で最大荷重(約 9kN)に達した後、舞良子および嵌板の面外座屈が進行しても荷重は低下せず、 $+1/10 \text{Rad}$ 手前で上側と下側の嵌板が完全に分離して面外座屈したことで荷重が大きく低下した。

●破壊形状



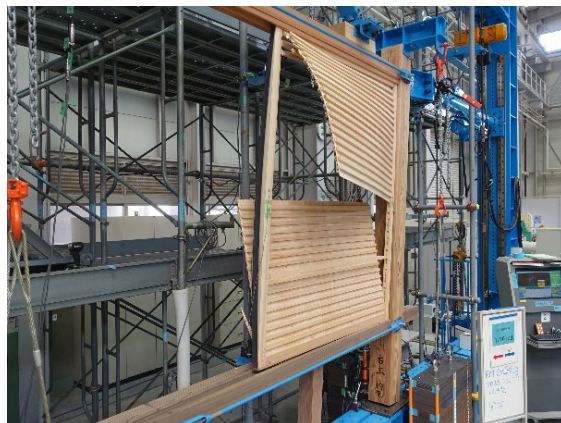
縦框の割裂破壊 (M 試験体)



敷居のめり込み (M 試験体)



アングル鋼枠の浮き上がり (RM 試験体)



舞良戸嵌板の面外座屈 (RM 試験体)

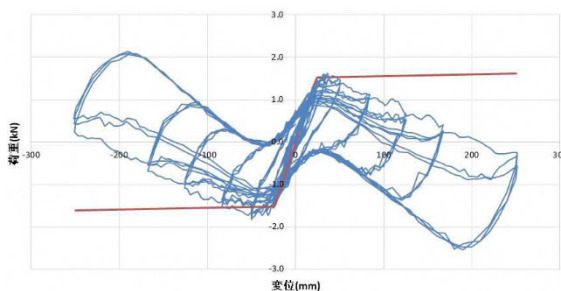
●理論式

—

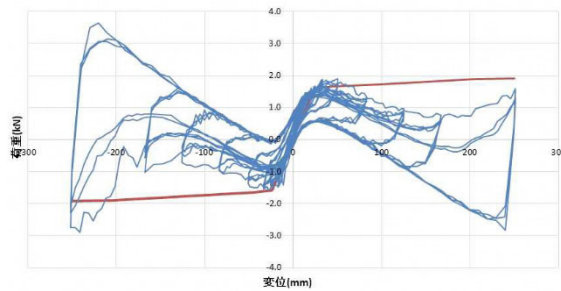
●モデル化

耐震調査診断と同じプログラムを利用して、実験結果を模擬する。その手順は以下の通り。

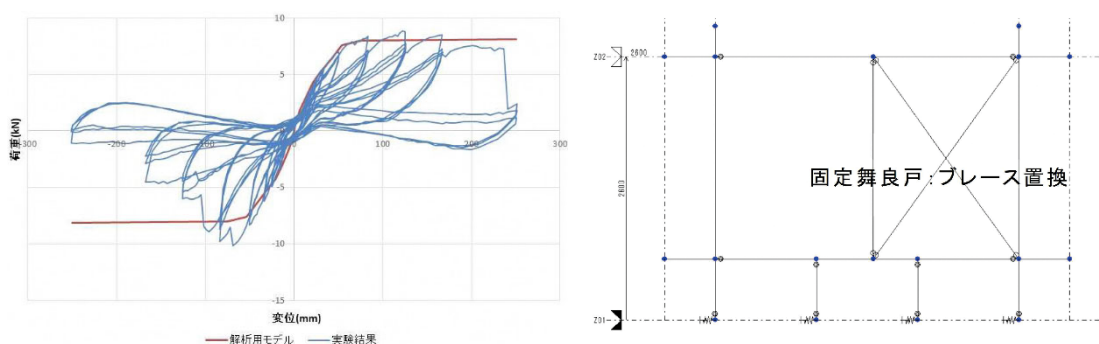
- ・舞良戸及びアングル鋼枠に収めた舞良戸は、ブレースに置換する。
- ・置換ブレースの剛性と耐力の数値を調整し、実験をおおよそ模擬できる数値になるよう静的荷重増分解析を複数回実施して、数値を収れんさせる。



(F 試験体)



(M 試験体)



(RM 試験体)

● 考察

置換ブレースの剛性と耐力の数値は、収れん計算の結果、下表の通りと考える事が出来た。

	初期剛性 (kN/M/Rad)	降伏耐力 (kN/M)	降伏変形角 (Rad)
舞良戸 (非固定)	8.0	0.32	0.04 (1/25)
舞良戸 (アングル鋼枠組入)	3944.2	6.5	0.002 (1/607)
【参考】舞良戸 (固定)	33.0	1.7	0.05 (1/20)

(耐震性能確認用せん断復元力特性)

なお、【参考】の数値について。実験結果を解析で模擬するために用いた F 試験体モデルに、アングル鋼枠とコーチボルトのみを線材に置換して組み込み、静的荷重増分解析を行った。同解析結果による荷重-変位と、RM 試験体モデルの解析結果による荷重-変位の差が、舞良戸を単純に固定した際のせん断復元力特性の近似値と考えられ、その剛性と耐力の推定値を追記した。

このうち、《舞良戸(アングル鋼枠組入)》の数値を採用し、令和 3 年度に実施した耐震調査診断時の耐震性能を再度確認したところ、構造用合板で製作した舞良戸状の壁に置換する補強案に、実験で採用したアングル鋼枠材をもって代替可能であることを確認した。