

鋼製薄板による既存木造住宅の外付耐震補強工法の開発
その 8 動的陽解法による角波鋼板耐震壁の解析的検討

正会員 浅沼愛実*¹
同 高木次郎*²
同 遠藤俊貴*³

木造住宅 耐震補強 角波鋼板
有限要素法解析 動的陽解法

1. はじめに

既存木造住宅の耐震補強促進を目的として、著者らは鋼製薄板を外装兼耐震要素とする工法^{1) - 3)}について、幾何非線形を考慮した静的増分解析により角波鋼板耐震壁の性能を評価した³⁾。ただし、鋼板の局所的な座屈が連続的に発生することにより解を収束させることが困難となった(図 3)。一般的に複雑な座屈などの不安定あるいは不連続な現象の静的な解析は困難である。本報では、動的陽解法を利用して、静的な釣合経路を良好な精度で追跡する。耐震壁の地震水平力作用時の挙動を解析的に評価し、実大耐震壁実験との比較検討を行う。

2. 解析モデル

図 1 に解析モデルを示す。耐震壁実験の試験体は、幅 720mm の鋼板 2 枚で構成されたが²⁾、予備解析で板 2 枚の耐震性能は概ね 1 枚の場合の 2 倍であったことから、壁幅 720 mm (鋼板 1 枚) の解析モデルで挙動を精査する。鋼板は板厚 0.5 mm で、JIS Z2241, 13 号試験片 (13A)⁴⁾ を抽出して確認したヤング係数 171kN/mm² と降伏強度 328.2N/mm² を有する完全弾塑性モデルとした。鋼板は 1 辺およそ 20 mm でメッシュ分割し、4 節点 1 積分点のシェル要素により構成した。なお板厚方向の積分点数は 10 である。材料密度は 7.85 × 10⁻⁹ton/mm³ とした。木架構はすぎ材のヤング係数 7kN/mm²⁵⁾、材料密度 0.3 × 10⁻⁹ton/mm³ を有する断面 90 mm × 90 mm の弾性ワイヤ要素とし、木材間でのモーメント伝達のないピン接合とした。境界条件は下端をピン(図 1 の a 部)及びローラー(同 b 部)支持とし、木材端(a-d 点)で面外方向(図中の y 方向)の並進を拘束した。ビス接合部の木架構と鋼板の木材繊維方向のばねの復元力特性は後報のビス接合部一面せん断試験より、降伏耐力 2.937kN、降伏時変位 1.16 mm の完全弾塑性とした。繊維直交方向の接合部ばね特性は実験的には評価できていないが、繊維直交方向も繊維方向の接合部一面せん断試験での鋼板のめり込み降伏と同じ破壊形で、ビスの繊維直交方向のめり込み変形は相対的に小さいと仮定して、繊維方向と同じとした。また、面外方向の木材と鋼板間の相対変位はゼロと仮定した。また、鋼板と木材のビス接合部位置に接合部ばねを設けた。位置は鋼板の上下端から 25mm、側端から 11.5mm の位置で、側辺は 150mm 間隔、上下辺は 120mm 間隔である。ビス接合部周辺

の鋼板の局所的な変形は、ばねの復元力特性で評価できていることから、解析で接合部ばねが取り合う節点近傍のシェル要素の変形集中を回避する目的で、節点を含む 4 つの要素を弾性高剛性とした。解析時間を t=5 秒とし、幾何非線形を考慮し、梁端部(図 1 の c 点)に壁の面内方向(x 方向)の強制変位を図 1 の時間軸で与えて ABAQUS/Explicit⁶⁾を用いて解析した。

3. 解析結果

3.1 解析結果・考察

実験結果の包絡曲線と解析結果の荷重-変形角関係を図 3 に示す。静的解析が停止した $\theta=0.5\%$ までの結果は一致した。 $\theta=1.1\%$ まで実験結果とよく一致した。 $\theta=1.1\% - 2.2\%$ では、解析では耐力がほぼ一定となったのに対し、実験では 30% ほど耐力が増大した。この差の理由として、ビス接合部の復元力特性やメッキ処理された鋼板の一樣素材としての材料特性の設定、さらには角波の折り曲げ加工による材料特性への影響などが考えられる。解析では $\theta > 2.2\%$ で耐力が再上昇した。変形の増大に伴い、角波鋼板に張力場が形成されたためと考えられる。 $\theta=2.2\%$ から 3% にかけての耐力壁の水平剛性は実験と解析とでそれぞれ 130kN/rad./m 程度で一致した。本解析で耐震壁の挙動は大局的には評価できたと考える。

解析では、 $\theta=0.22\%$ 付近時から図 2 中の左下から右上への対角部の面外変形が顕著になり、実験で観察された鋼板の全体座屈挙動と解析結果はほぼ一致した。 $\theta=7.1\%$ の解析の面外変形を図 2 に示す。図中に接合部ば

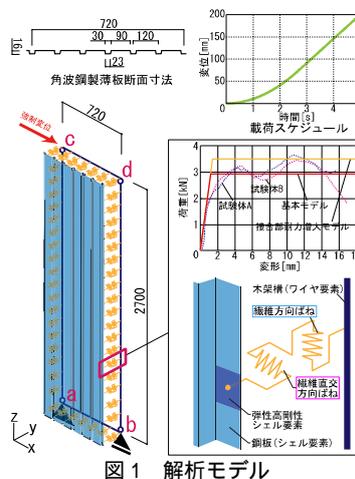


図 1 解析モデル

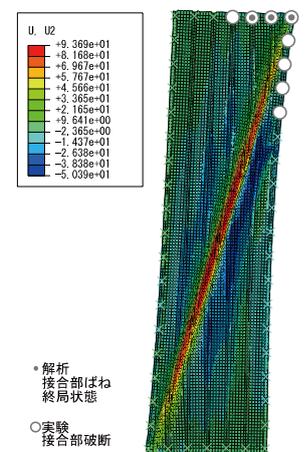


図 2 面外変形図 $\theta=7.1\%$

ねの変形量が 15 mm 以上となった箇所を示す。15 mm は、前述のビス接合部一面せん断試験での終局変位である。また、実験で接合部が破断した箇所も示す。両方で図中右上部に損傷が集中し、左下部では損傷していない状態が確認できる。実験では、 $\gamma = 6.1\%$ 時に図 2 に示すビス接合部の破断によって壁耐力が低下した。解析では接合部ばねを完全弾塑性としたために γ が 5% を超える大変形時の壁の水平耐力低下は確認できていないが、接合部ばねの変形量が限界値を超えることで壁耐力が低下することが推定できる。

3.2 釣合状態追跡の妥当性の検証

動的陽解法による解析の妥当性を解析時間を変数として確認する。変形角 7.4% までの水平強制変位載荷時間を 0.1, 1.0, 5 秒とした場合の荷重-変形角関係を図 3 に示す。なお、耐震壁の載荷方向と鋼板面外方向の固有 1 次周期は略算でそれぞれ 0.016 と 0.09 秒程度であり、載荷時間 5.0 秒の場合は周期よりも十分大きい。そしてその場合は強制変位載荷点の反力が振動しないことが確認できる。また、強制変位載荷点の反力と脚部支持点での水平反力を比較すると、その差は $t = 0.1, 1.0, 5$ 秒のときそれぞれ 200, 5, 1% 程度であった。さらに、運動エネルギーの内部エネルギーに対する割合の最大値はそれぞれ 377, 119, 7.7% であり、載荷時間 5 秒の場合は、概ね静的結果を近似できていると推定できる⁷⁾。

3.3 実験値と解析値の耐力差の考察

ビス接合部の復元力特性及びメッキ処理された折板を一樣材料としてモデル化したことの影響を考える目的で接合部の復元力特性と鋼板の材料特性を変化させた解析を行った。解析結果の荷重-変形角関係を図 4 に示す。整理のため、前述の解析モデルを「基本モデル」と呼ぶ。それに対して、接合部の降伏耐力を接合部一面せん断試験での最大耐力の平均値である 3.5 kN (図 1) に増大させたモデル(「接合部耐力増大モデル」と呼ぶ)を作成した。接合部耐力増大モデルでは、 $\gamma > 1.6\%$ で基本モデルより耐力上昇し、 $\gamma = 7.0\%$ では 8% 大きくなった。実験耐力より小さいが基本モデルより近づいた。また、鋼板のヤング係数を 20% 低減させたモデル(同「鋼板剛性低減モデル」と呼ぶ)と、降伏強度を 20% 増大させたモデル(同「鋼板耐力増大モデル」と呼ぶ)を作成した。剛性の低減と耐力の増大はそれぞれ、メッキ処理により表面の金属のヤング係数が低くなり面外曲げ剛性が低下する可能性と、折り曲げ加工により降伏強度が増大する可能性を想定した。鋼板剛性低減モデルでは、 $\gamma = 1.0\%$ で基本モデルに対して耐力が 10% 程度低くなった。一方、鋼板耐力増大モデルでは、 $\gamma > 0.6\%$ で基本モデルより耐力上昇し、

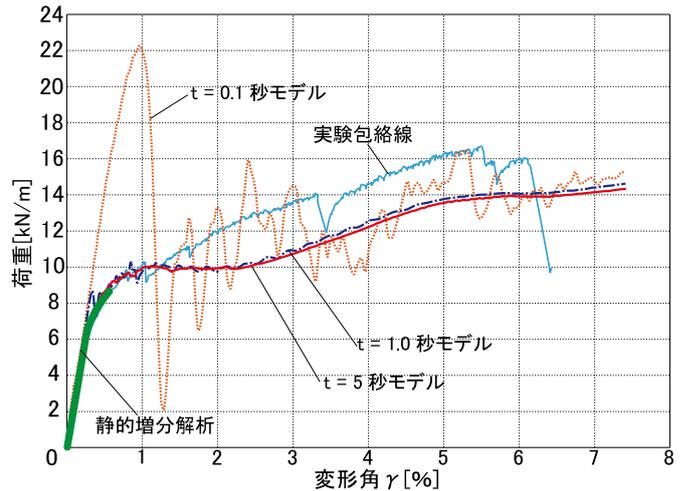


図 3 解析による荷重-変形角関係

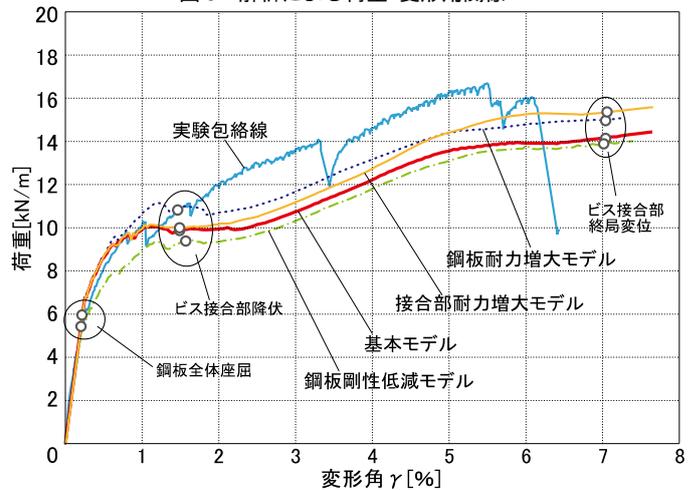


図 4 解析による荷重-変形角関係

$\gamma = 7.0\%$ で 5% 大きくなった。 $\gamma > 2.0\%$ で鋼板耐力増大モデルの方が実験に近くなった。実際の鋼板剛性が基本モデル設定値より高いことは考えにくく、また、別途実施したビス接合部の初期剛性のみを増大させた解析では、基本モデルとほぼ変わらなかったことから、接合部及び鋼板の耐力の設定が実験と基本モデルの差の有力な原因と推察できる。

4. まとめ

既存木造住宅耐震補強工法における角波鋼板耐震壁の性能を動的陽解法により評価した。実験と同様の崩壊形と座屈モードを確認した。 $\gamma < 1\%$ では解析結果の耐力値は実験とよく一致し、 $\gamma = 2\%$ を超える大変形時で、最大 20% 程度低くなった。この差の主要因は接合部と鋼板の耐力の設定と推定した。また、動的陽解法における釣合状態追跡の妥当性を載荷時間を変数として評価した。載荷時間 $t = 5$ 秒のとき、静的解析の近似解が得られたと考えられる。

参考文献は続編にまとめて示す。

*1 日鐵住金建材株式会社 修士(工学)
 *2 首都大学東京都市環境学部建築都市コース 准教授・Ph.D
 *3 EQSD 一級建築士事務所 博士(工学)

*1 Nippon Steel and Sumikin Metal Product Co., Ltd., M.Eng.
 *2 Associate Prof., Div. of Architecture and Urban Studies, Tokyo Metropolitan Univ., Ph.D.
 *3 EQSD Structural Consultants, Dr.Eng.