

令和元年度建築基準整備促進事業

(S32)

差し鴨居接合部を有する垂れ壁の軸組の 壁倍率に関する検討

株式会社ドット・コーポレーション
京都大学 生存圏研究所

事業の背景と目的

調査の背景：

伝統的構法による木造建築物については、建築基準法施行令3章3節において規定されている仕様（以下「仕様規定」）に適合しない場合、地震等に対する安全性の確認にあたっては、限界耐力計算等の精緻な構造計算を行わなければならない。このため、伝統的構法による耐力壁、継手・仕口などの耐震要素について、仕様規定の整備が求められている。

目的：

本調査では、伝統的構法による木造建築物に用いられる耐震要素のうち、垂れ壁の軸組に併用される差し鴨居接合部を対象として実験的・解析的検討を行い、仕様規定としての技術基準の提案を行う。

実施体制

検討委員会

委員長	五十田博	京都大学
委員	鈴木祥之	立命館大学
	齋藤幸夫	齋藤建築構造研究室
	後藤正美	金沢工業大学
	大橋好光	東京都市大学
	河合直人	工学院大学
	腰原幹雄	東京大学
	槌本敬大	建築研究所
	秋山信彦	建築研究所
協力委員	荒木康弘	国土交通省国土技術政策総合研究所

ワーキンググループ

主査委員	河合直人	工学院大学
	五十田博	京都大学
	北守顕久	京都大学
	秋山信彦	建築研究所
協力委員	荒木康弘	国総研
オブザーバー	槌本敬大	建築研究所

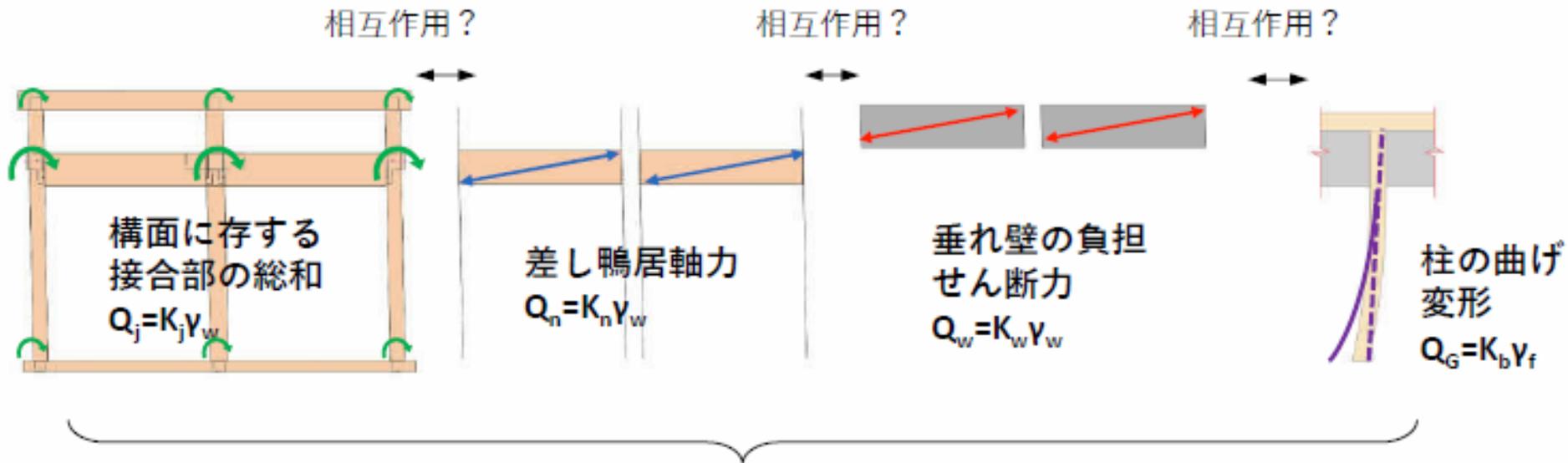
実施内容

差し鴨居接合部を有する垂れ壁の軸組の構造性能を確認するため、以下の内容を実施した。

1. 耐力要素毎の性能、挙動を確認する要素実験を実施
2. 耐力要素の性能の足し合わせが構面実験の結果と合うかどうかの確認

耐力要素/影響要素	差し鴨居のみの構面	土壁 + 差し鴨居の構面
構面に存する接合部の総和	○	○
<u>差し鴨居軸力</u>	○	○
垂れ壁の負担分		○
柱の曲げ変形の影響	○	○

実施内容－全体の流れ 1

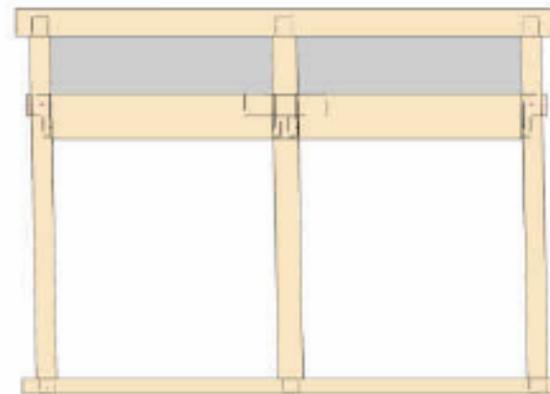


○単純積算式の確認

$$Q_G = K_G \gamma_G = K_G (\gamma_w + \gamma_f)$$

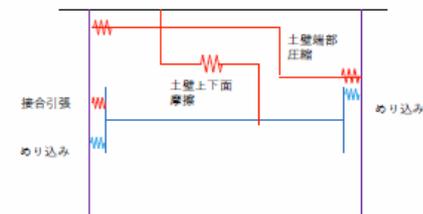
$$K_G = \{1/(K_j + K_n + K_w) + 1/K_b\}^{-1}$$

ただし、各要素の性能に相互作用があるか要素実験及び組み合わせ実験により確認



軸組＋垂れ壁構面

○骨組解析モデルの再現



適切なパネの設定（ばね定数、設置位置）を実験により確認

実施内容－全体の流れ 2

軸組みのみ構面実験(あ)



垂れ部のみ構面実験 (い)



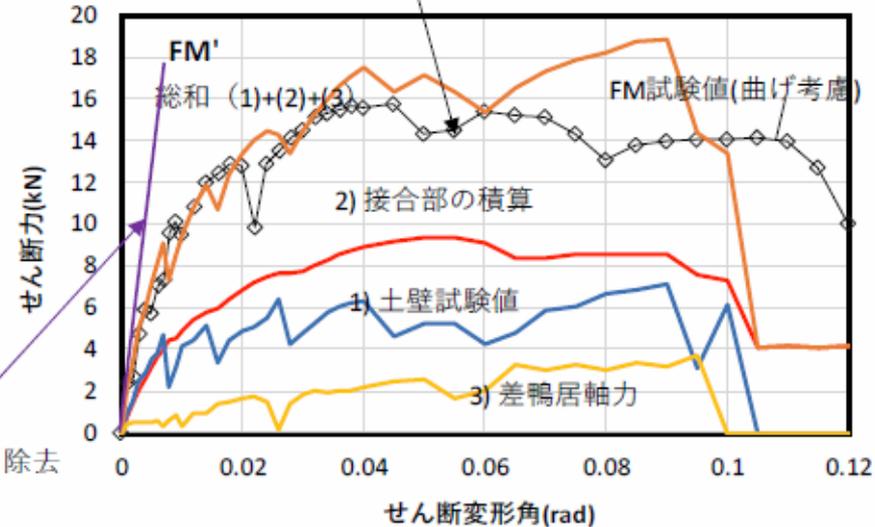
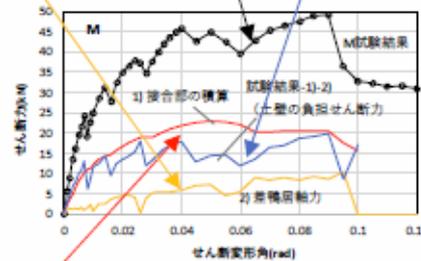
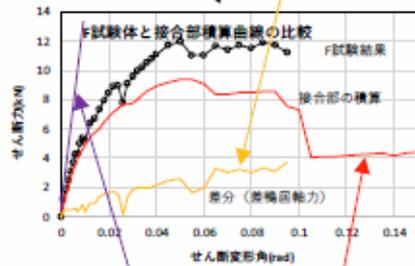
軸組み+垂れ壁構面実験 (き)



②差分を軸抵抗成分と定義

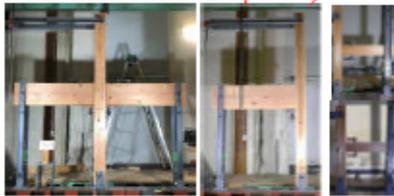
③差分を土壁成分と定義

②で求めた軸抵抗成分



④曲げ変形成分を除去

①接合部実験の総和



接合部実験 (イ・ロ・ハ・ニ)

曲げ変形成分を除去

①+②+③の加算値は構面試験結果と合致
→加算側がおおむね成り立つ?

・接合部は2018年度検討により数式評価可能

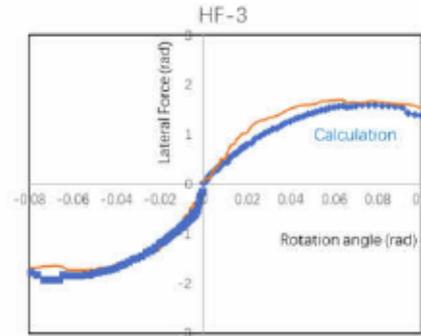
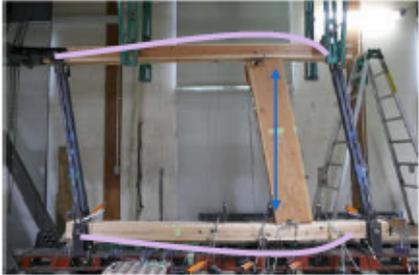
今年度の
検証内容

加算側で計算するには・・・

- ・軸抵抗成分の数式評価
- ・土壁成分の数式評価
- ・相互作用がない(少ない)ことの証明

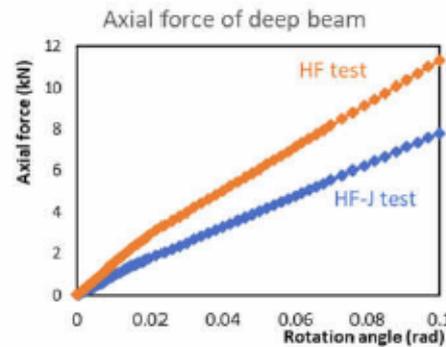
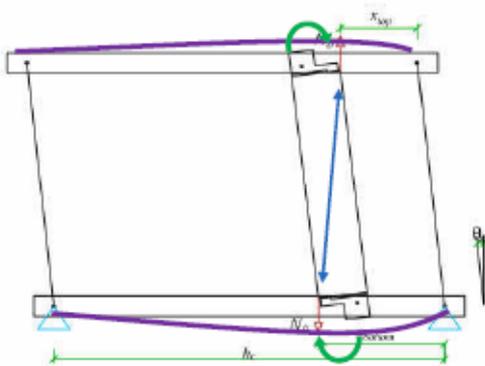
実施内容－軸組抵抗成分の数式評価

単純化H型実験（仕口なし）（ホ）

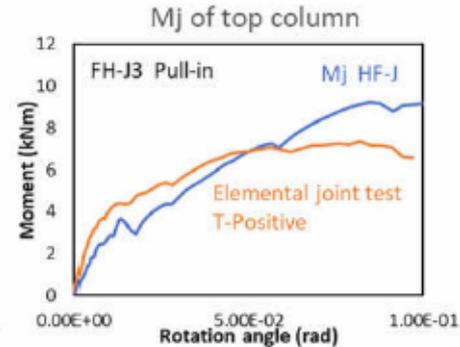


◎：軸力がわかれば
外力を計算可能

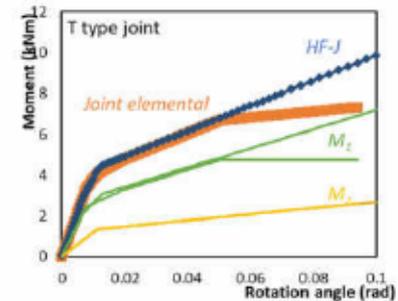
単純化H型実験（仕口あり）（へ）



①：モーメント抵抗による部材曲げ低減効果で、発生軸力減少→水平外力が64%に低減



②：軸力の相互作用で、仕口抵抗力が（大変形時）影響を受ける



③：①②を考慮した数式評価がある程度可能

加算側で計算するには・・・

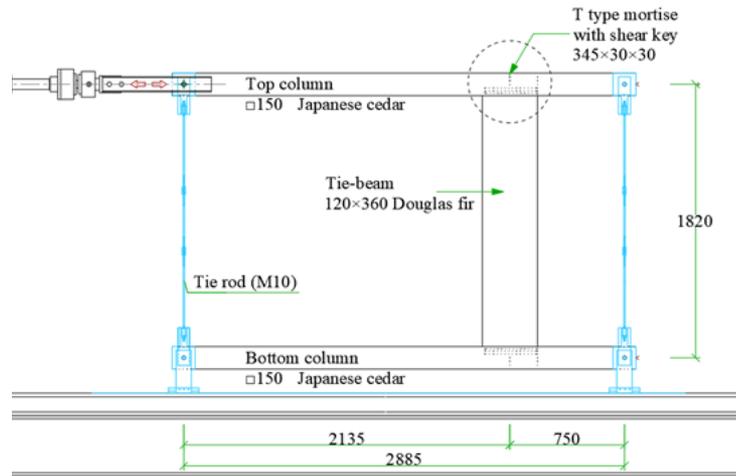
- ・ 軸抵抗成分の数式評価 ○
- ・ 土壁成分の数式評価 ○
- ・ 相互作用がない(少ない)ことの証明 △?

数式モデルのために

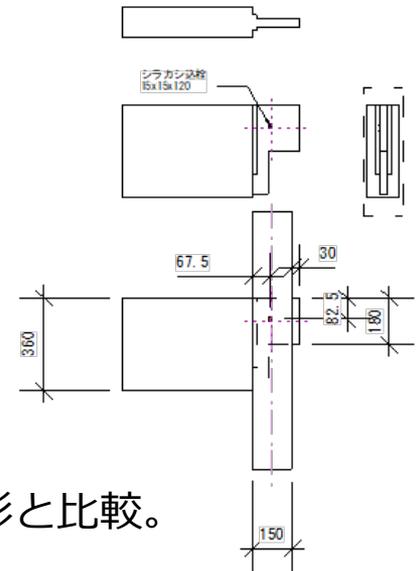
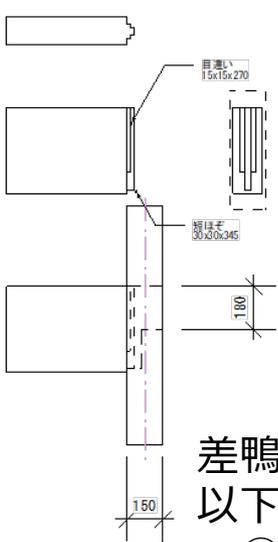
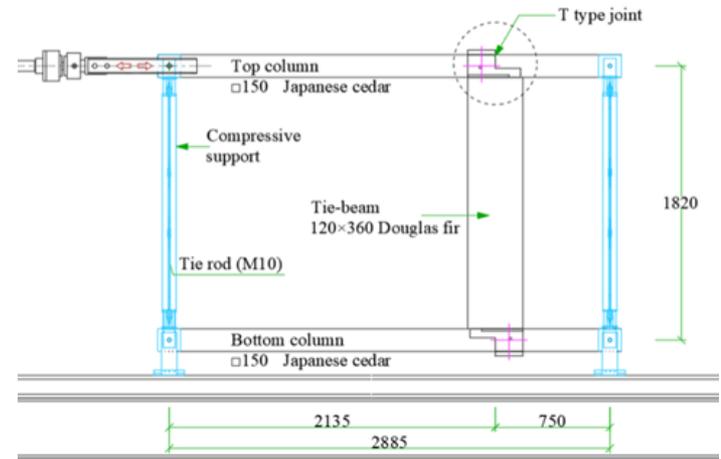
- ・ 接合パネの位置を決定 ○

軸組抵抗成分の検討-実験概要

単純化H型試験体 仕口無 (木)



単純化H型試験体 仕口有 (木)

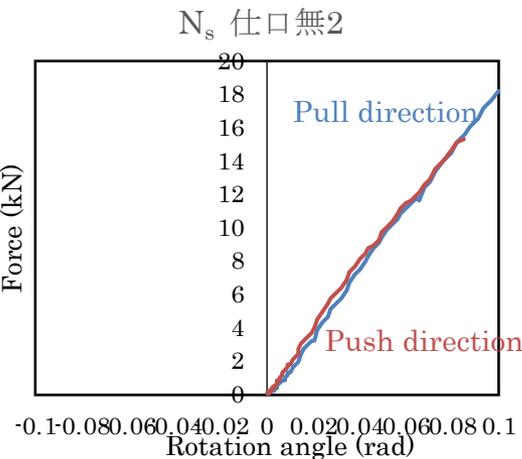
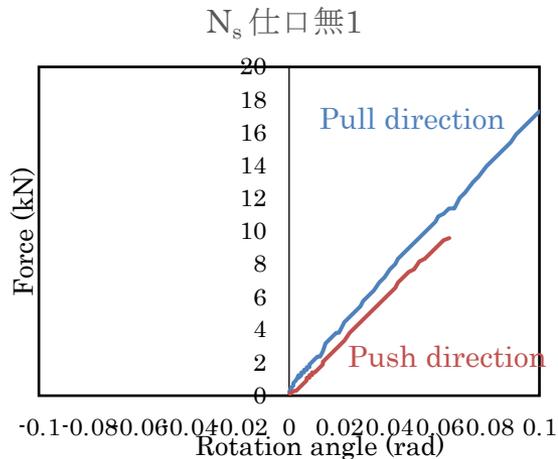
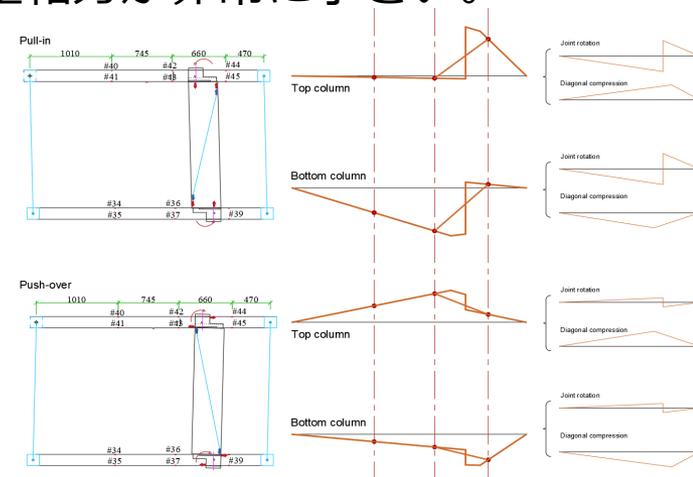
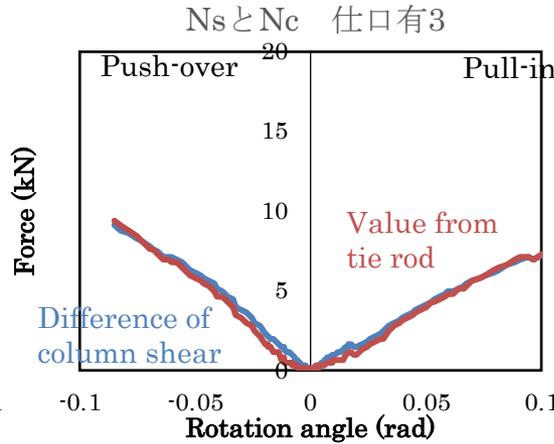
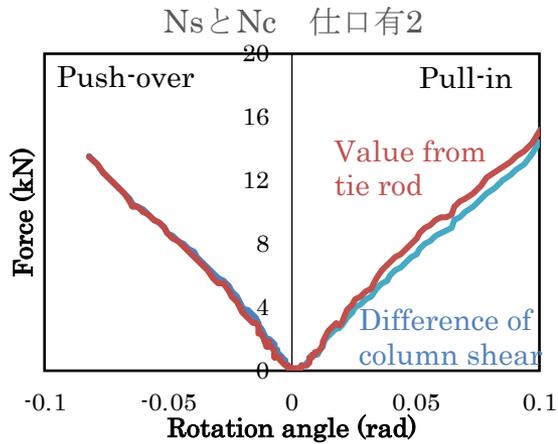


差鴨居に生じる軸力 N は直接計測することができないため、以下の3つの手法で求めた数値同士および見かけのせん断変形と比較。

- ① タイロッドの軸力の総和 (N_s)
- ② 差鴨居に添付したゲージ (N_b)
- ③ 柱の曲げモーメント分布から求まる差し鴨居軸力 (N_c) → 概ね一致した。

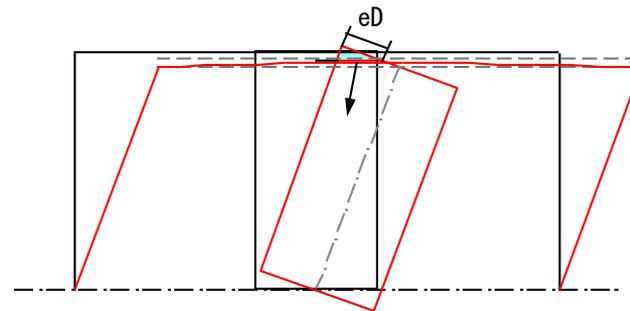
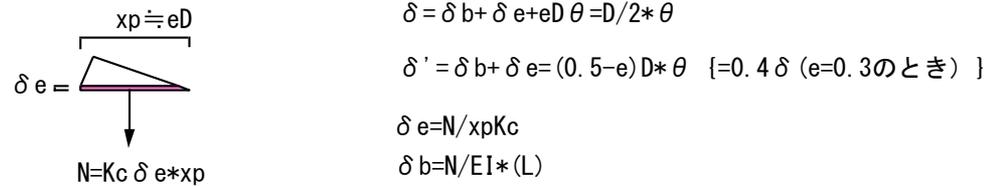
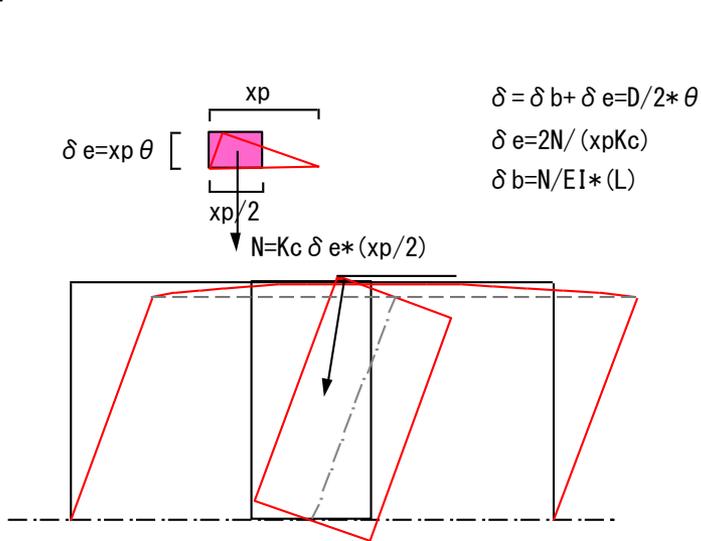
軸組抵抗成分の検討-実験結果概要

- N_s と N_c が一致したことから、「仕口の回転抵抗成分と差鴨居軸抵抗成分を分離する手法」の妥当性が裏付けられた。さらには既往の研究で実施した接合部単位要素の試験結果とも概ね一致したことから、抵抗機構推定の妥当性が確かめられた。
- 差鴨居に発生する軸力値を同一変形角時の押し加力側（接合部弱軸抵抗）と引き加力側（接合部強軸抵抗）とで比較すると、前者の方がより高い値となっている。また、仕口無の発生軸力の値と比べると、仕口有の発生軸力が非常に小さい。

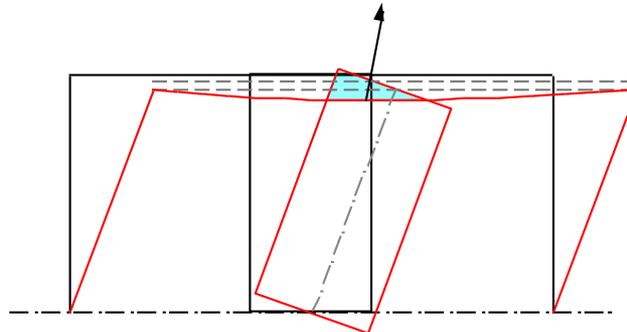


軸組抵抗成分の検討-仕口と差し鴨居軸力の相互作用

- この現象は以下に示す差し鴨居軸力発生メカニズムを裏付けていると考えられる。すなわち、仕口が有る条件では差し鴨居端部仕口の回転抵抗に伴うめり込み変形によって差し鴨居軸力を発生せしめる柱曲げ-端部めり込みの直列バネの変形が幾分消費されており、これにより発生軸力が低下すると考えられる。

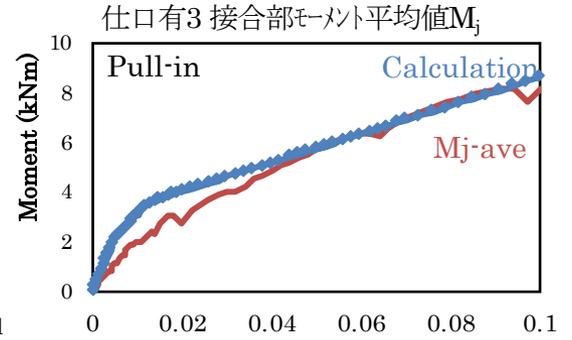
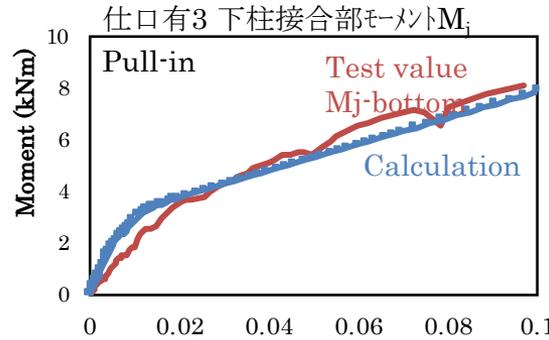
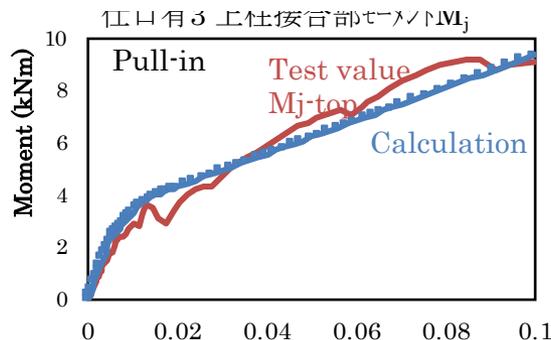
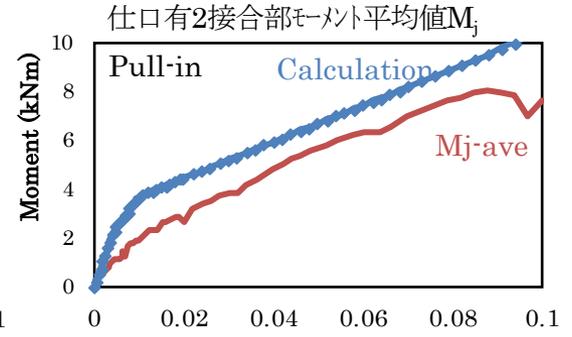
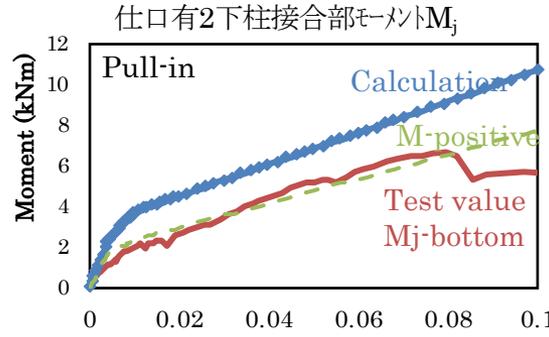
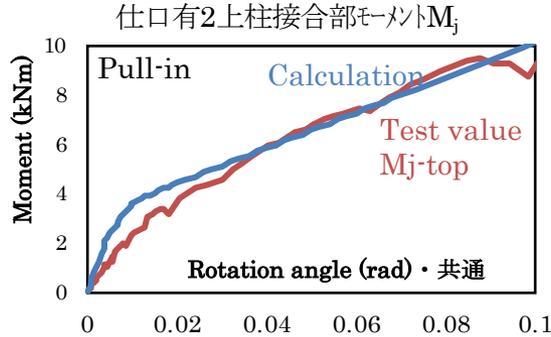
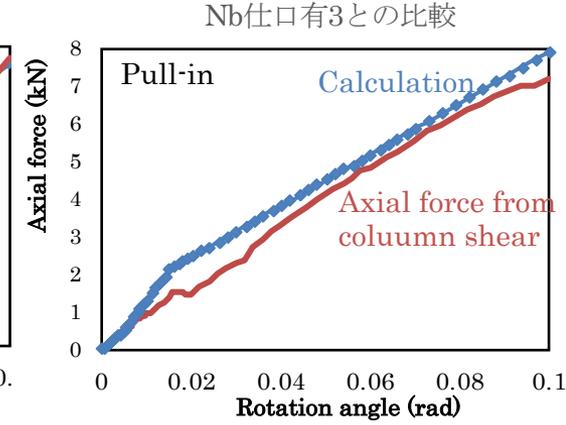
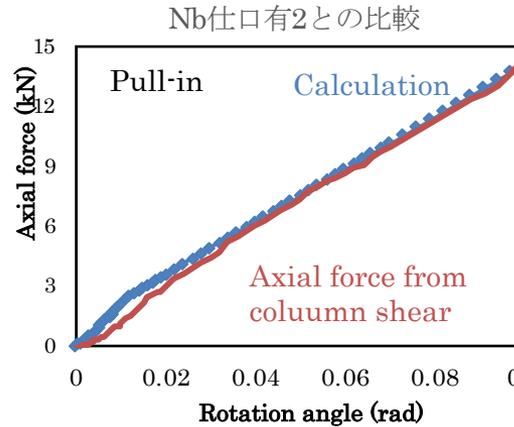


δ_b と δ_e は同符号のため、 $e > 0.5$ のとき δ_b と δ_e 、ひいては N は負を取ることもある。



軸組抵抗成分の検討-実験結果概要

- 力の釣り合い条件、幾何学的変形の釣り合い、構面フレームに対する柱曲げ剛性を考慮した差し鴨居軸力の力学モデルを作成し、実験結果との比較を行った。結果、精度良く推定できることがわかった。
- 仕口有（へ）で得られた接合部モーメントの実測値（柱の曲げモーメント分布から推定）と計算値を比較したところ、精度良く推定していることがわかった。



軸組抵抗成分の検討-まとめ

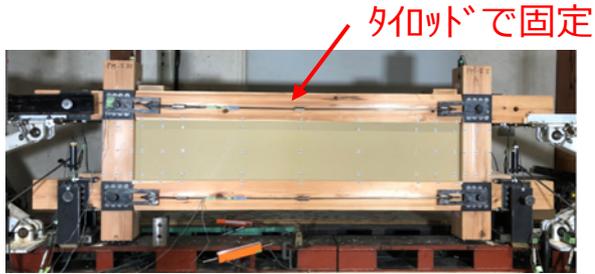
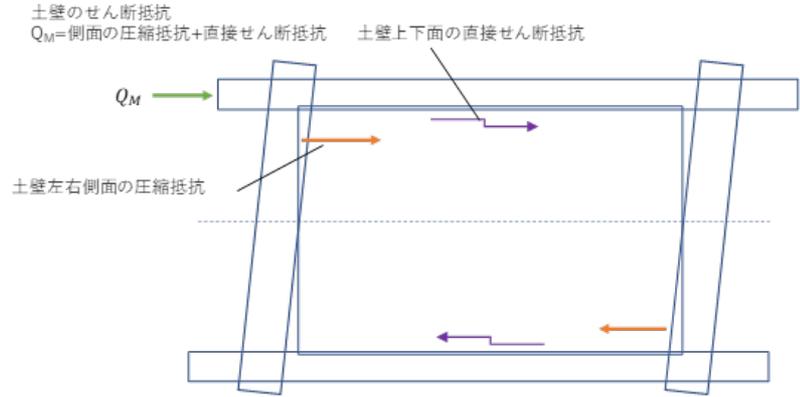
差鴨居の軸抵抗成分に着目し、耐力発現挙動を明らかとする事を目的に、H形状に単純化した試験体の水平せん断実験をおこなった。加えて端部仕口の有無の条件を比較することで、差鴨居に生じる軸力と接合部回転耐力との相互作用についても検討した。その結果、以下が明らかとなった。

- 差鴨居に生じる軸力はせん断に伴う幾何学的な変形量と、柱の曲げ、差鴨居端部のめり込みの直列バネとの関係によって生じる。このため、特に柱の曲げ剛性の大小により大きな影響を受ける。
- 差鴨居端部に仕口を有する場合、仕口の回転抵抗によって生じるめり込みバネの成分が上記の直列バネに加わるため、結果として発生する軸力は小さくなる。
- 差鴨居に軸力が生じている場合、端部接合部の回転抵抗性能も相互作用として影響を受ける。具体的には剛性の低下、降伏耐力の低下、二次剛性の向上、終局モーメントの向上が生じる。
- 部材の寸法、材料定数を用いて、評価式により差鴨居の発生軸力を推定することが可能である。また、込栓接合部の降伏後挙動を仮定することで、軸力と回転抵抗の相互作用も評価することができると考えられる。
- 差鴨居の発生軸力が分かれば、構面全体の水平せん断力を推定可能である。

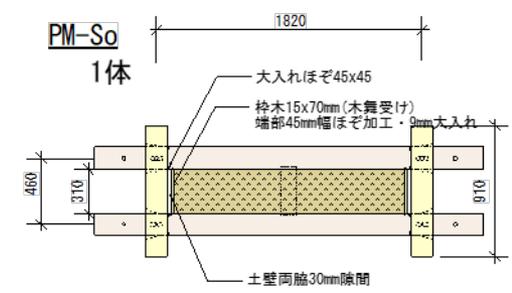
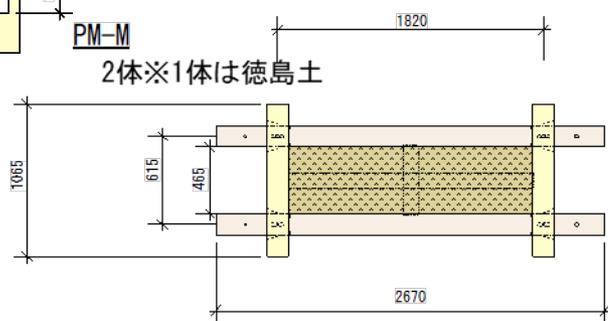
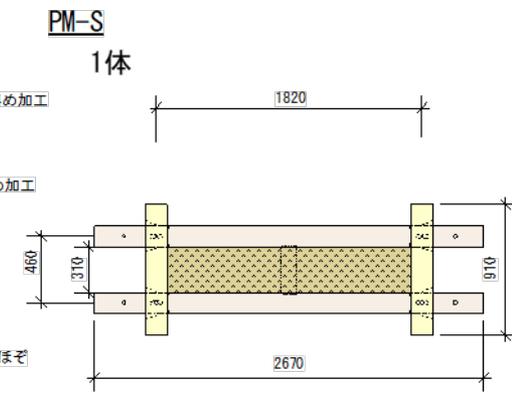
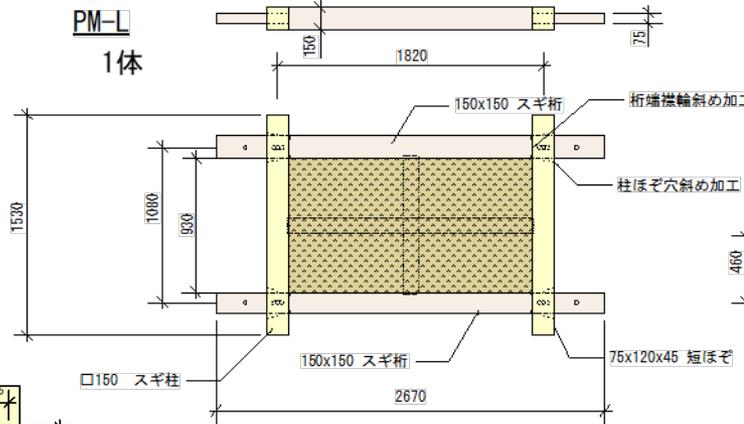
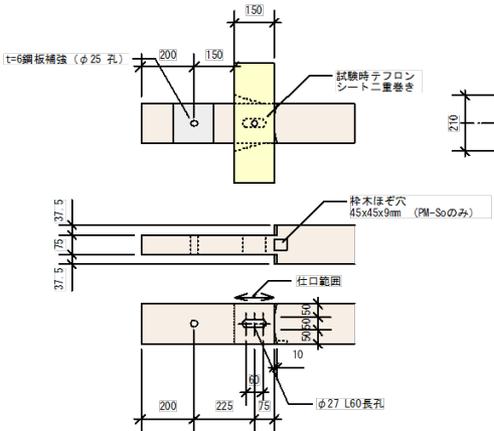
土壁成分の抵抗の検討-実験概要

土壁の水平せん断実験の目的とパラメーター

- 土の種類単位耐力性能の確認
- アスペクト比の効果の検証
- 荷重伝達メカニズムの解明
 - ①土壁の側面圧縮力によるストラット
 - ②土壁の上下面接触による直接せん断



接合部はピン仕様とした。

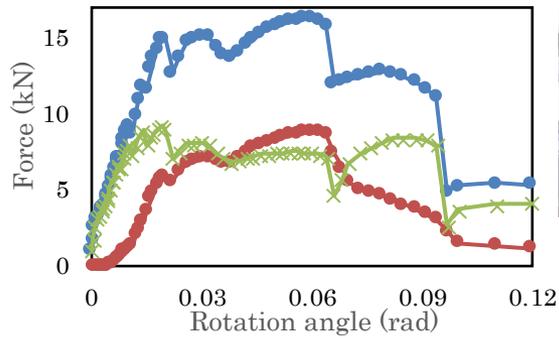


※土壁施工時にスペーサー木片を挟んでおき、試験前に取り外し

各実験の終了後、土を落としたフレームのみの試験体の実験も実施。

土壁成分の抵抗の検討-実験結果概要

PM-L

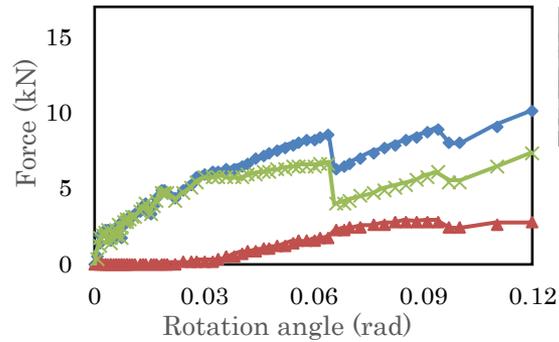


QM : 純土壁試験体

TM : タイト計測軸力 = Qc : 側面の圧縮抵抗成分

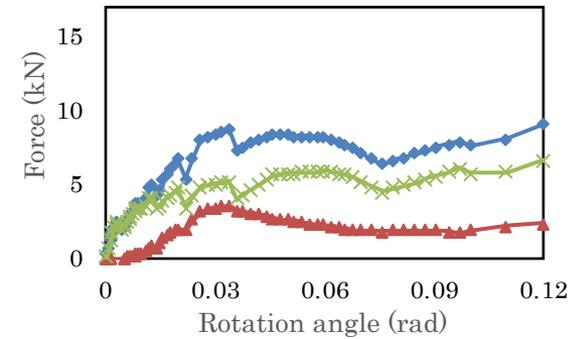
Qf : 上下面のせん断抵抗成分 = QM-TM

PM-So



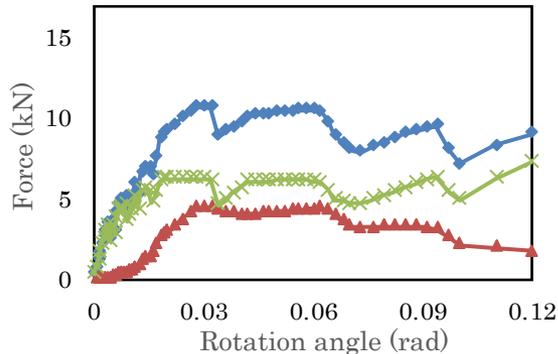
両側隙間有り

PM-S



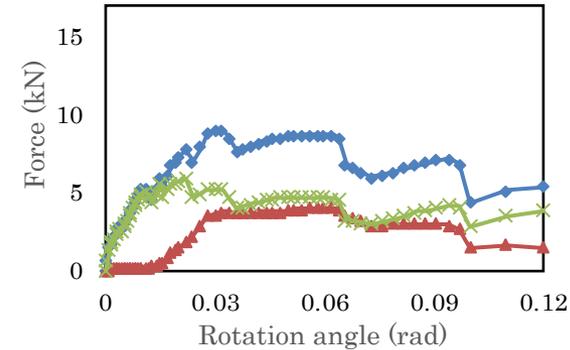
両側隙間無し

PM-M



両側隙間無し
三重県産土

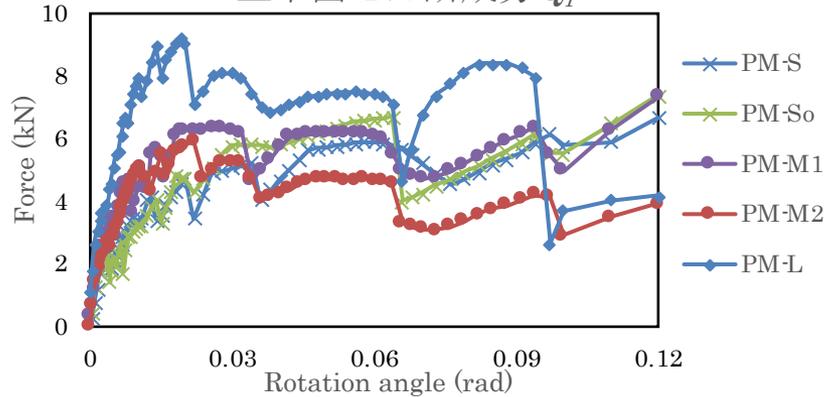
PM-MT



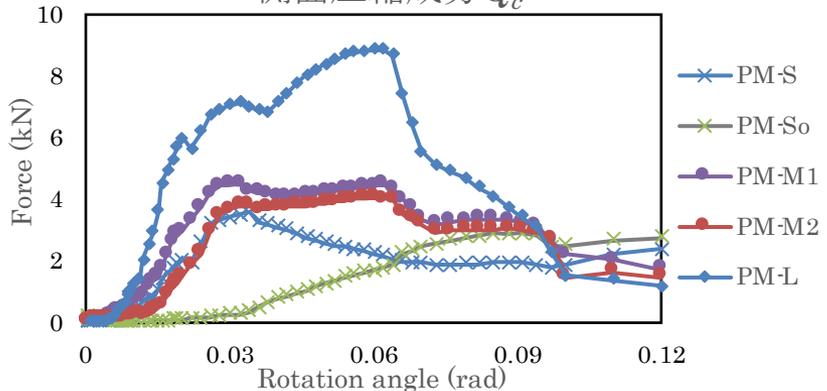
両側隙間無し
徳島県産土

土壁成分の抵抗の検討-実験結果概要

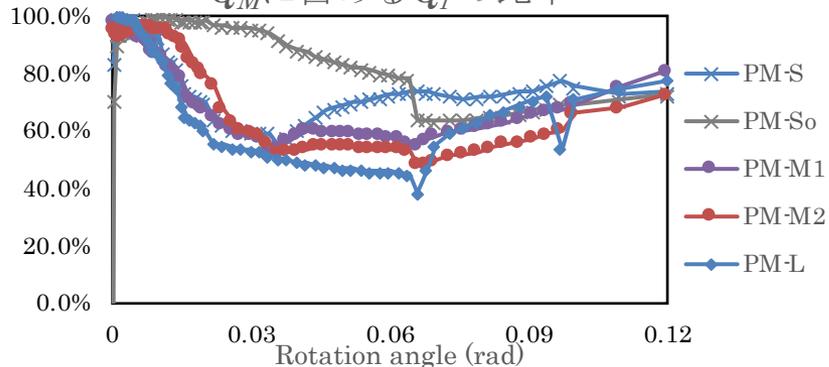
上下面せん断成分 Q_f



側面圧縮成分 Q_c



Q_M に占める Q_f の比率

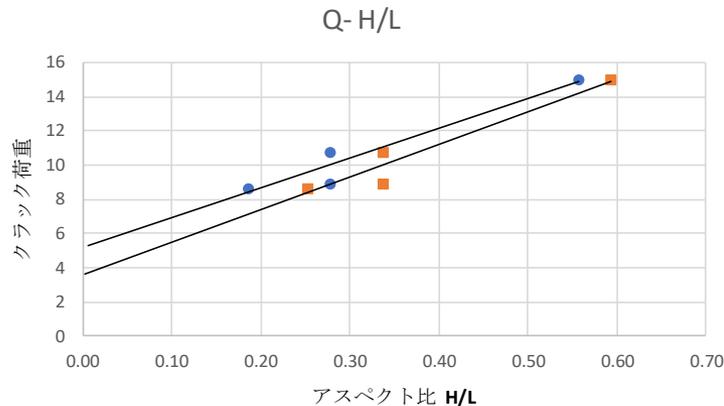


- PM-MとPM-MTではPM-Mがやや高い耐力性能を示し、これは土の材質によるものと考えられる。ただし、この耐力差は主に土壁上下面のせん断成分に対して影響し、側面の圧縮抵抗にはあまり影響しない様子が見られた。
- 壁上下面のせん断抵抗による荷重負担は、高い初期剛性を持ち、また安定した変形性能を有する。その大きさの目安として、今回の条件では最大値で6kN程度と推定された。また、その効果は側面圧縮による抵抗と共働して働くものと考えらる
- 側面圧縮抵抗は、試験体高さが異なると大きく影響を受ける。また、最大値を迎えたあと緩やかに荷重低下を生じる。今回の結果では、初期に1/100rad程度の遊びがある様子が確認された。この遊びの原因は不明だが、タイロッドによる柱の開きの拘束が初期に効きにくい事が影響している可能性が考えられる。

土壁成分の抵抗の検討-実験結果概要

クラックが生じた時の荷重とアスペクト比の関係

	L	L'	H	H'	H/L	H'/L'	P _{crack}
	mm	mm	mm	mm			kN
PM-L	1820	1670	1080	930	0.59	0.56	14.94
PM-M	1820	1670	615	465	0.34	0.28	10.76
PM-MT	1820	1670	615	465	0.34	0.28	8.92
PM-S	1820	1670	460	310	0.25	0.19	8.64
PM-So	1820	1670	460	310	0.25	0.19	

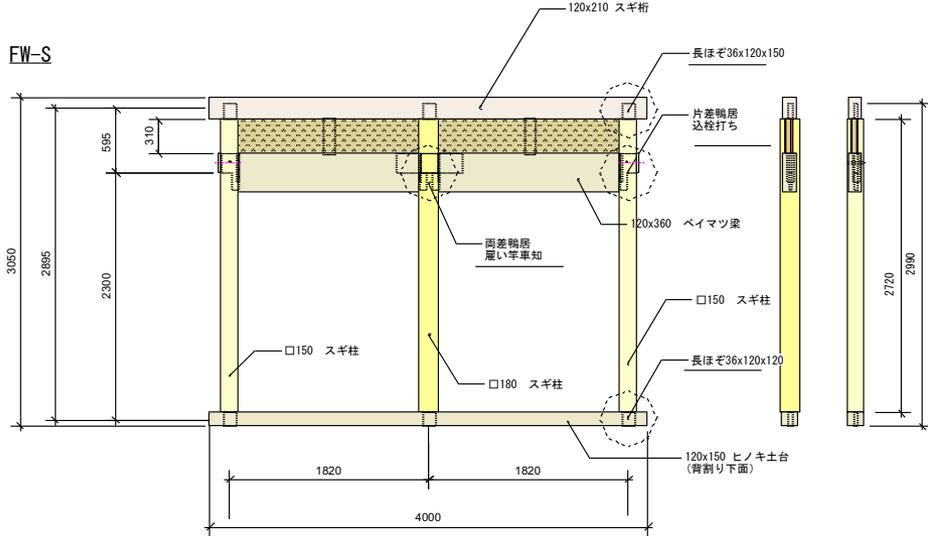
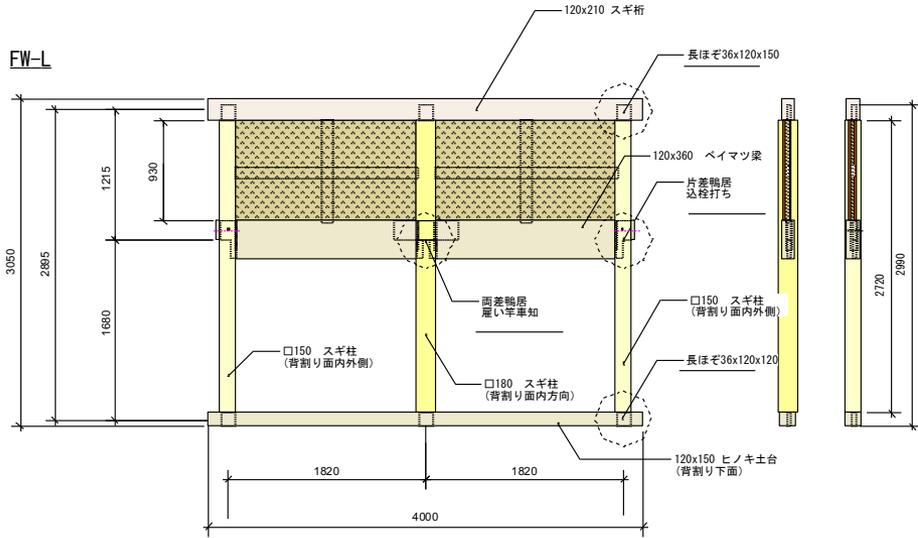


曲げ系：接触面積＝アスペクト比に依存

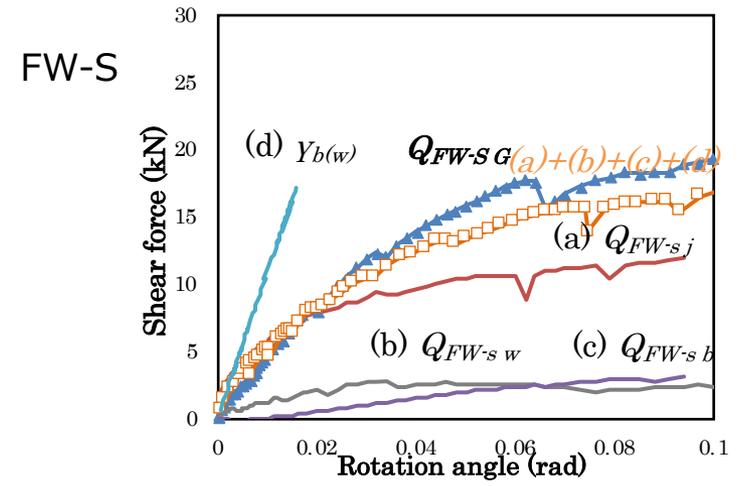
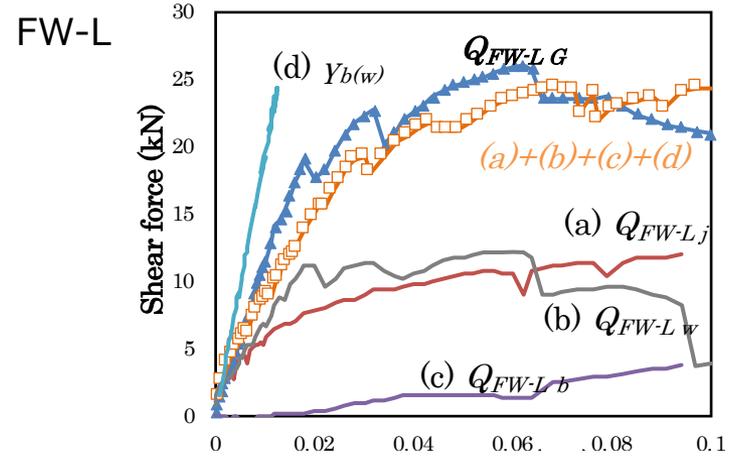
せん断系：アスペクト比に依存しない

- 見かけのアスペクト比 H/L に対する関係（図中橙）は概ね直線関係を示し、その切片は4kN弱である。「伝統的構法のための木造耐震設計法」におけるモデルのように、曲げ系においてアスペクト比に比例して耐力が定まるという条件では切片は0となるため、この切片の値が、土壁上下面のせん断抵抗による耐力負担分による押し上げとみることができる。また、土壁の曲げ系の耐力を決定する実際の寸法比は、軸組を含んだ見かけのアスペクト比 H/L では無く、軸組を除外した土壁自身のアスペクト比 H'/L' に依存すると考えるのが自然である。（図中青）この場合切片はもう少し大きく、6kN程度となり、試験結果と合致する。
- アスペクト比の大きい垂れ壁中の土壁のせん断抵抗を予測する際、アスペクト比に比例する曲げ伝達系のせん断抵抗に加えて、アスペクト比に依存せずに一定の効果を持つ土壁上下面直接伝達系のせん断抵抗を別途考慮することでより正確な推定が可能となる可能性が示唆された。

垂れ壁の土壁負担の検討-実験と重ね合わせの結果



- (a) 接合部回転抵抗成分 Q_{FW-J}
- (b) 土壁せん断抵抗成分 Q_{FW-w}
- (c) 差鴨居軸力成分 Q_{FW-b}
- (d) 柱の曲げ変形成分 $Y_{b(w)}$



垂れ壁の土壁負担の検討-実験と重ね合わせの結果

(a) 接合部回転抵抗成分 Q_{FW-J}

別途実施した軸組のみ構面試験において求めた接合部の回転抵抗成分(Q_{Fj})に、軸組のヤング係数の比率を乗じることで算出した。

(b) 土壁せん断抵抗成分 Q_{FW-w}

土壁成分の抵抗の検討の実験QMの値を用い、これに純土壁試験における上下梁芯々距離と構面試験における構面高さの比率を乗じることで、土壁のせん断抵抗成分とした。

(c) 差鴨居軸抵抗成分 Q_{FW-b}

差鴨居中央部に添付した歪みゲージの計測歪み（平均値）に、差鴨居ヤング係数（11410MPa）と断面積（360×120mm）を乗じて差鴨居軸力を計算した。左右の差鴨居共に圧縮力が作用していた事が分かった。差鴨居端部の回転変位の計測値から接触長さおよび合力作用位置を計算し、差鴨居両梁端での合力作用点間距離を差鴨居軸力に乗じることで、軸抵抗成分負担モーメントを算出した。これを構面試験体高さで除することで、構面せん断力における差鴨居軸抵抗成分を計算した。

(d) 柱の曲げ変形成分 $Y_{b(w)}$

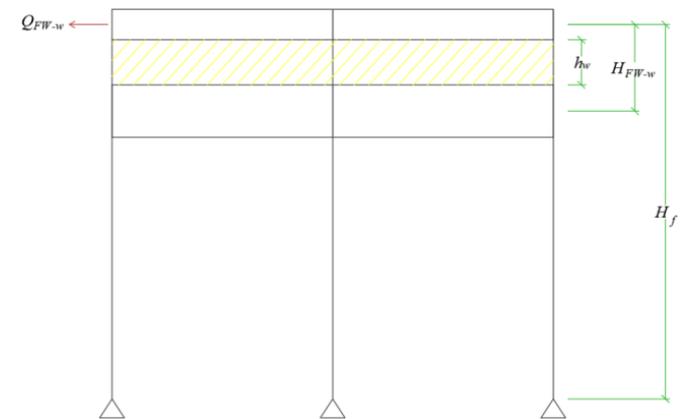
(a) ~ (c) で計算される外力と接合部モーメントから差鴨居位置における水平力と接合モーメントを計算し、これを単純梁モデルにおいて、集中荷重、集中モーメントとしてあてはめることで計算した。

重ね合わせ推定値は、実験結果よりもやや安全側となる結果を示した。特に、土壁高さが小さいFW-S試験体で誤差が大きくなる傾向が見られた。

垂れ壁の土壁負担の検討- Q_{FW-W} の補正

- 重ね合わせ推定値が実験結果を過小評価することとなったのは、土壁抵抗成分におけるせん断力伝達経路が側面圧縮による抵抗成分と、上下面せん断による抵抗成分の2通りに分解されることを考慮していないためと考えられた。
- 土壁成分の抵抗の検討では、軸組断面が小さかったが、構面試験のように大きな断面の軸組を有する場合を想定する（土壁正味高さは同一だが、梁芯々距離が異なる）と、側面圧縮抵抗成分は曲げ抵抗型の挙動であるため梁芯々間距離が大きくなった分、その逆数を乗じて抵抗力を減じる必要がある。
- 一方で上下面せん断抵抗成分は、直接せん断抵抗型の挙動であるため、軸組断面によらず、垂れ壁構面内では抵抗力に変化は無い。（b）では、垂れ壁構面全体を同一のものとして取り扱っていたため、純土壁試験体と垂れ壁付き構面試験体の垂れ壁高さの比率に応じて、純土壁試験結果を全体的に耐力低下させる処理を行っていた。

純土壁試験条件 (PM)	大断面軸組中の土壁
$Q_f = Q_{fp}$ $Q_c = Q_{cp} \frac{h_w}{H_{PM}}$	$Q_f' = Q_f$ $Q_c' = Q_c \frac{H_{PM}}{H_{FW-w}}$



$$Q_{FW-L-w} = (Q_c' + Q_f') \times \frac{H_{FW-w}}{H_f} = (Q_{c-L} \times \frac{H_{PM-L}}{H_f} + Q_{f-L} \times \frac{H_{FW-L-w}}{H_f}) \times 2$$

土壁のみ試験体における軸組断面の違いとせん断力推定

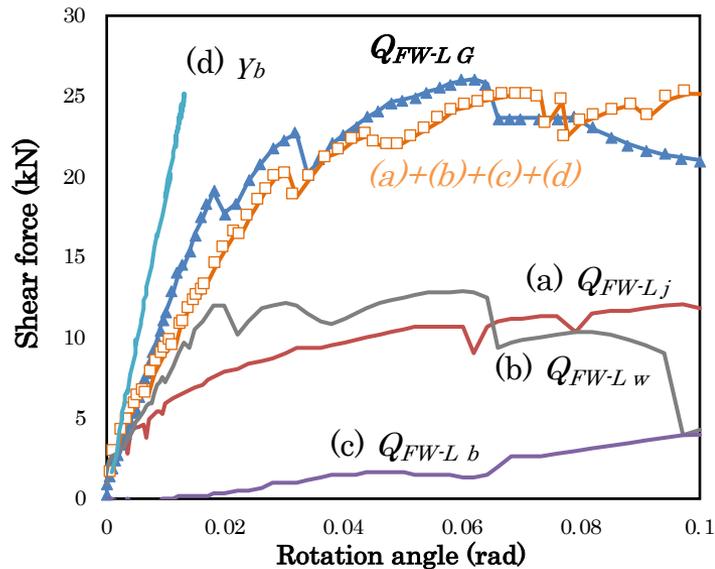
構面試験体における各高さ寸法条件とせん断力推定

垂れ壁の土壁負担の検討- Q_{FW-W} の補正後の結果

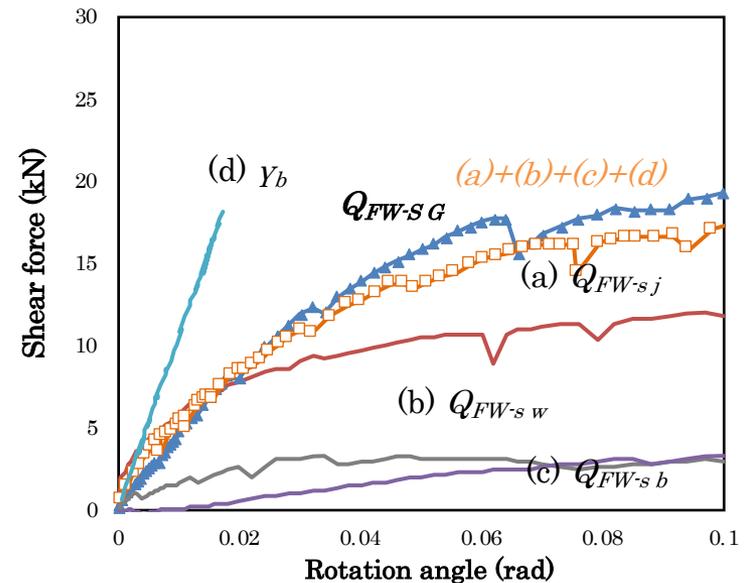
- 垂れ壁部分のせん断抵抗成分を側面圧縮による抵抗成分と、上下面せん断による抵抗成分の2通りに分解し、前者は軸組高さ比に応じた耐力低下を考慮するが、後者はそれを考慮しない事とした。推定結果は実験結果と精度良く一致した。
- 土壁の荷重伝達経路を分離して取り扱うことで、垂れ壁付き構面の試験結果は重ね合わせ法により精度良く推定することが可能であると結論できる。



FW-L



FW-S



まとめ

- 本事業で実験を実施した仕様では、**(a) 接合部曲げ抵抗成分、(b) 土壁せん断抵抗成分、(c) 差鴨居軸力成分、(d) 柱の曲げ変形成分**を重ね合わせが成立することが確認できた。精度よく推定するためには、(b) について、せん断抵抗経路を側面圧縮と上下面せん断の両成分に分離し、それぞれに対して適切な高さ比に応じた低減を乗じる形で取り扱うことが必要となることがわかった。(b) を単一の荷重伝達メカニズム（曲げ系）を持つとして取り扱うと、やや過小評価となる。
- 本事業で実験を実施した仕様の範囲であり、例えば柱の断面大きく異なる場合や断面欠損がある場合や、差し鴨居仕口の納まりのばらつきによって、(c) は異なることも予想される。また、(b) は土の産地により性能が異なるが、今年度の成果では、土壁の産地の差は土壁上下面のせん断成分に対して影響し、側面の圧縮抵抗にはあまり影響しない様子が確認された。
- 伝統木造の仕様におけるばらつきについては注意が必要ではあるが、それぞれの耐力要素は建物全体から見ると寄与率は10%程度以下であり、そのばらつきによって生じる影響はその10%程度と考えられ、建物全体からすると1%程度の寄与となるため、設計上の判断としては現状で十分な精度が得られたと考えられる。