

第5章 垂壁一壁接合部の面内曲げ性能の検討

5.1 第5章の概要

第5章では、架構の倒壊限界に及ぼす影響が大きいと考えられる垂壁－壁接合部の面内曲げ性能の特定に向けて、3通りの方法で検討を行う。

5.2 垂壁－壁接合部の水平加力(面内曲げ)実験に基づく性能

垂壁－壁接合部の水平加力(面内曲げ)実験結果に基づいて垂壁－壁接合部のモーメント－回転角関係、および回転角が生じた状態における垂壁端せん断接合部の終局耐力を確認する。

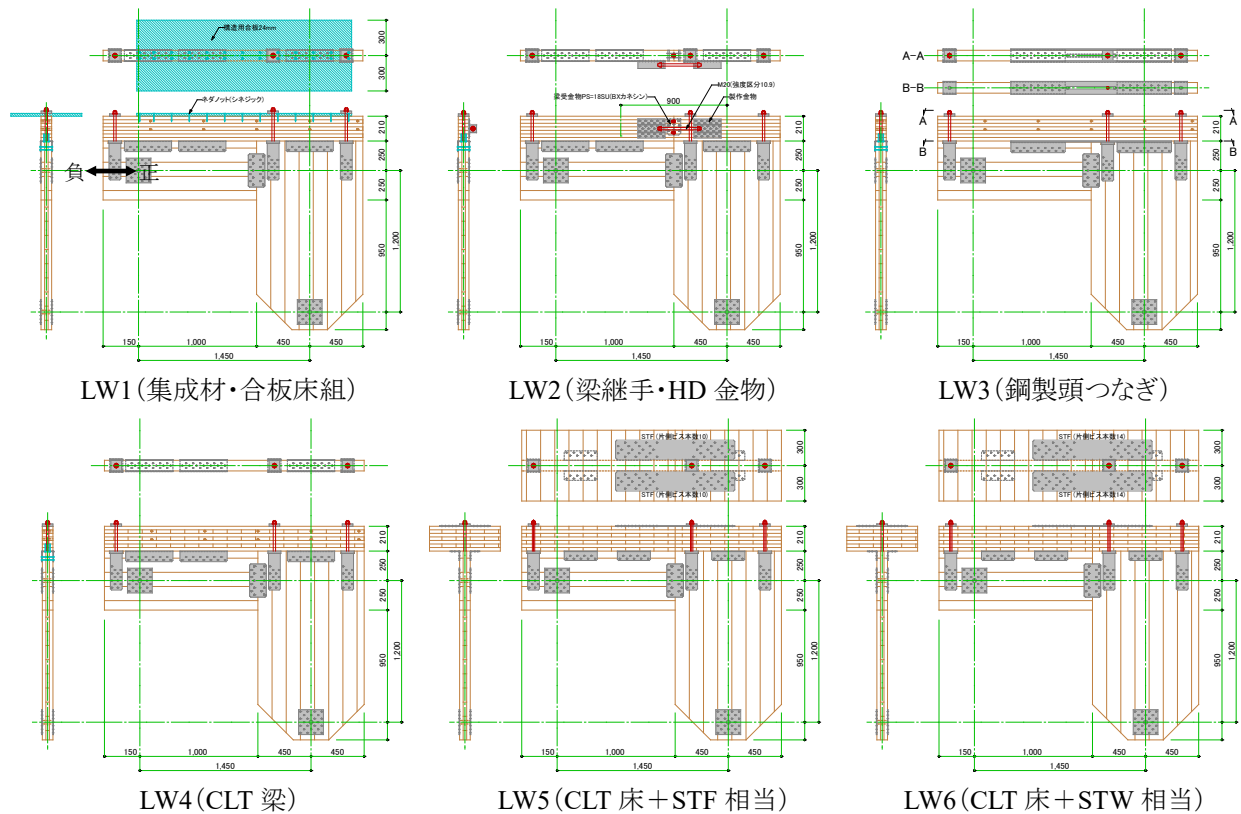


図 5.2.1 垂壁－壁接合部の水平加力(面内曲げ)実験試験体

5.2.1 垂壁－壁接合部の面内曲げ応力・変形

実験による正方向加力包絡線に基づいて垂壁－壁接合部のモーメント M －回転角 θ 関係を確認する。計測データから図5.2.2中の●点の水平・垂直変位を求め、CLTパネルは剛体として壁パネル・垂壁パネルの回転角を算出し、その差を接合部の回転角 θ とする。モーメント M は図5.2.2中に記載のように求める。

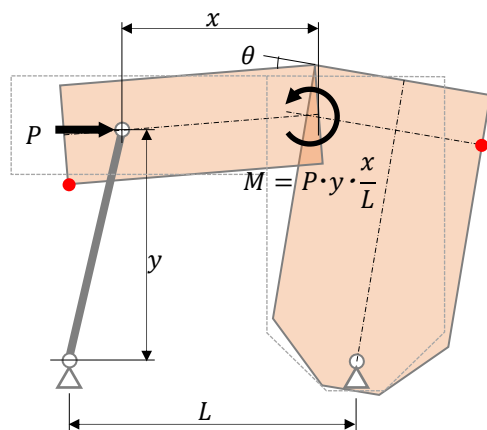


図 5.2.2 垂壁－壁接合部のモーメント・変形角の算出方法

垂壁一壁接合部のM-θ関係、それに基づく解析用性能、設計基準による終局曲げ耐力 M_u および2022年度の推定性能を図5.2.3に示す。 M_u はCLT設計施工マニュアルの記述に従い、垂壁・壁パネルの両方が強軸である場合と両方が弱軸である場合の値を図5.2.4のように求めた。LW2を除き、実験による最大曲げ耐力は強軸と弱軸の M_u の間にある。LW2については、HD金物ビス打ち部部の集合型せん断破壊により最大曲げ耐力が決まっており、接合ボルトM20(強度区分10.9)をM20(ABR490)とすれば、曲げ耐力は1割程度減少するが、ボルトの先行降伏により変形能力が増加する可能性がある。しかしながら、曲げ耐力および終局変形角のいずれも2022年度の水平加力倒壊実験に基づく推定値を下回っている。

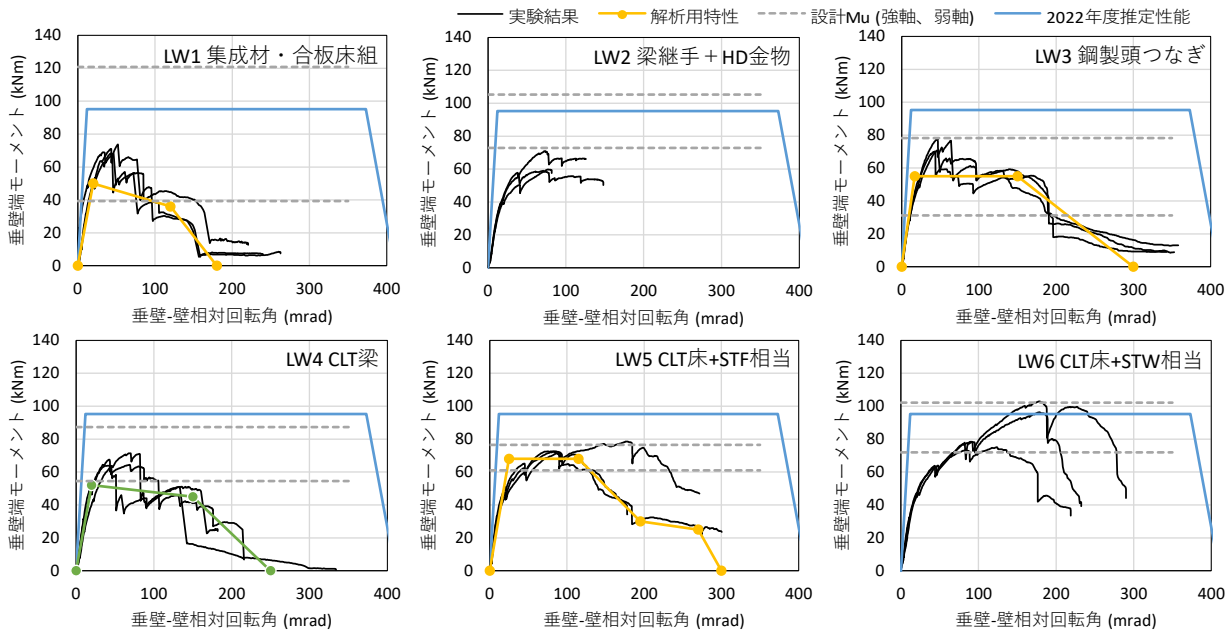


図 5.2.3 垂壁一壁接合部のM-θ関係

このとき、圧縮応力の合力 C は次のように求められる。

$$C = 0.85^2 F_c \cdot t \cdot x_n$$
 軸力 N は次のように表され、

$$N = C - T_y$$
 上式より圧縮縁から中立軸までの距離 x_n が次のように計算される。

$$x_n = \frac{N + T_y}{0.85^2 F_c \cdot t}$$
 この x_n を式(付2-18)に代入して C の値を計算し、曲げ M の値を次のように求める。

$$M = \left(\frac{D}{2} - \frac{0.85x_n}{2} \right) \cdot C + \frac{D - 2d_c}{2} \cdot T_y$$

$$= \frac{(N + T_y) \cdot D}{2} \cdot \left(1 - \frac{N + T_y}{0.85 F_c \cdot t \cdot D} \right) + \frac{D - 2d_c}{2} \cdot T_y$$
 CLT 設計施工マニュアル, 第三部付録 2, (3.2)

付図2-4 接合部の終局時応力分布の仮定

引張材	壁CLT強度	LW1		LW2		LW3		LW4		LW5		LW6		mm
		弱軸	強軸	弱軸	強軸	弱軸	強軸	弱軸	強軸	弱軸	強軸	弱軸	強軸	
全体	D	710	710	710	710	500	500	710	710	710	710	710	710	mm
	dc	105	105	0	0	0	0	105	105	0	0	0	0	mm
	t	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	mm
垂壁CLT	Fc	3.9	10.8	3.9	10.8	3.9	10.8	3.9	10.8	3.9	10.8	3.9	10.8	N/mm ²
	b	90	90	—	—	90	90	90	90	—	—	—	—	mm
	d	210	210	—	—	9	9	210	210	—	—	—	—	mm
引張材	Ft ※	14.6	14.6	—	—	258.5	258.5	9.25	9.25	—	—	—	—	N/mm ²
	Ty=C	275.9	275.9	174.0	174.0	209.4	209.4	174.8	174.8	120.0	120.0	168.0	168.0	kN
	N	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	kN
終局M	xn	1088.1	392.9	686.13	247.8	825.7	298.2	689.38	248.9	473.19	170.9	662.47	239.2	mm
	M	39.3	120.9	72.8	105.2	31.2	78.2	54.5	87.3	61.1	76.5	72.0	102.2	kNm

※ CLT梁はFbを用いる

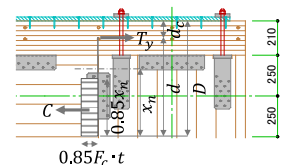


図 5.2.4 垂壁一壁接合部の設計用性能

5.2.2 垂壁－壁接合部の終局時鉛直せん断耐力

正負交番加力終了後に、負側1/7.5radで水平変位を保持した状態で垂壁右端上部に鉛直荷重を載荷し、垂壁－壁接合部の鉛直せん断耐力を確認した。鉛直荷重(鉛直せん断力) Q と垂壁右端の鉛直変位 δ の関係を図5.2.5に示す。同図にはクロスマーク金物SP×2個の短期許容せん断耐力 P_a と終局せん断耐力 P_u を併記した。

試験体LW1～LW4の最大せん断耐力は P_u を下回るものの、ほぼ P_a は越えている。層間変形角が1/7.5radに達した状態状態では鉛直架構の水平耐力は相応に低下することを考慮すれば、垂壁脱落の恐れはないと考えられる。しかし、LW5, LW6のように床目地と壁目地が一致する場合は鉛直せん断耐力が極端に低下しているので、このような大変形時における垂壁脱落防止措置(例えば図5.2.6)が必須といえる。

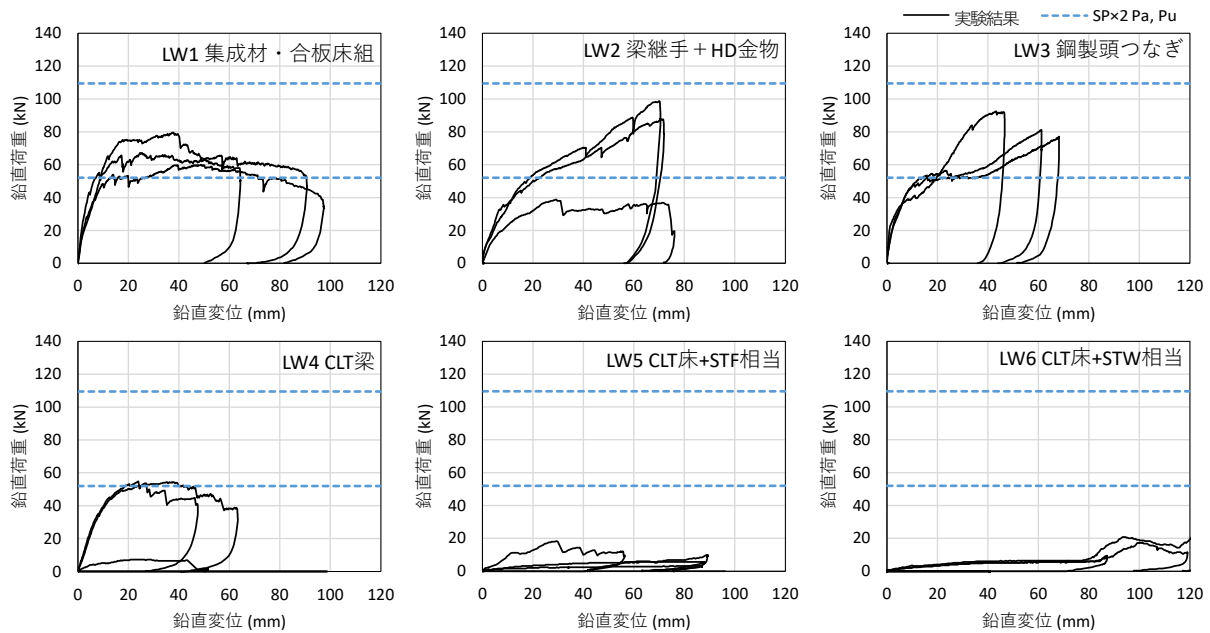


図 5.2.5 垂壁－壁接合部の Q - δ 関係

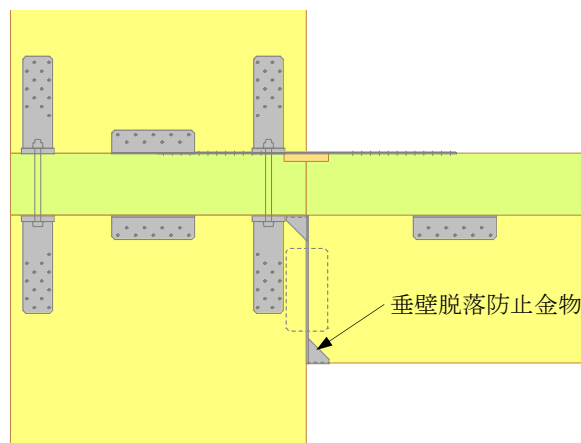


図 5.2.6 大変形時の垂壁脱落防止措置の例

5.3 水平加力倒壊実験における垂壁－壁接合部内曲げ性能の再推定

垂壁－壁接合部の水平加力実験によるモーメント耐力および終局変形角が2022年度の推定値を下回ったことを踏まえて、2022年度の水平加力倒壊実験の倒壊限界状態近傍における残存水平耐力に寄与していた可能性のある垂壁－壁接合部以外の耐力要素を、適切と考えられる範囲で最大限に考慮することとして、垂壁－壁接合部の水平加力実験によるモーメント－変形角関係を再度推定する。

5.3.1 再推定の必要性と方針

昨年度(2022年度)水平加力倒壊実験における最大変形時の試験体写真を改めて確認すると、図5.3.1のように無損傷あるいはそれに近い部位が残されており、それらの曲げ抵抗(青矢印)が最大変形時の水平耐力に寄与していたと考えられる。昨年度の検討では、最大変形時には垂壁右端の曲げ抵抗(赤矢印)のみが有効であるとして、その性能を推定したため、過大評価になっている可能性が高い。本検討では、垂壁右端以外の部位の曲げ抵抗による水平耐力をあり得る最大値として、垂壁右端の曲げ抵抗性能を再度推定する。その際には、せん断接合部の引張抵抗も考慮する。



図 5.3.1 試験体の変形状態と推定残存応力

5.3.2 試験体に対応する構造モデルの再設定 (図5.3.2参照)

✓ 各試験体共通

- 垂壁左端に鉛直せん断金物による曲げ抵抗 $L M_{1a}$, $L M_{2a}$ を考慮する。
- 設計用性能を評価する際には接合部を設計用特性とするとともに、1層壁脚部の水平せん断金物による曲げ抵抗を $B M_a$, $B M_b$ に加算する。
- 左端鉛直荷重に加力梁重量(8kN/本)を加算する。

✓ A10N

- 右端集成材梁の曲げ抵抗 $L M_{1c}$, $L M_{2c}$ を考慮する。

✓ W1, A10K

- 2層部分是一个の四角形せん断要素とする。∵W1にはCLT床版の曲げ抵抗、A10Kには腰壁の曲げ抵抗が含まれるため挙動が複雑。
- 1層壁頭部の曲げ抵抗 $T M_a$, $T M_b$ を考慮する。そのとき水平せん断金物による曲げ抵抗を加算する。
- 1F右端直交壁の引張軸力 N_R を考慮する。

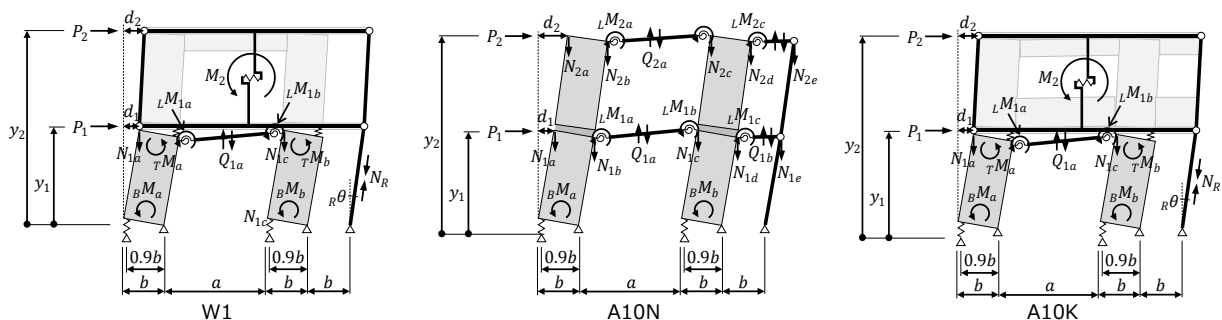
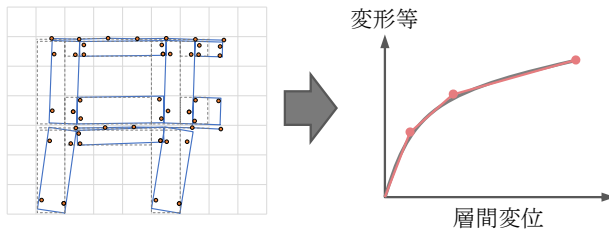


図 5.3.2 試験体終局時に対応する構造モデル

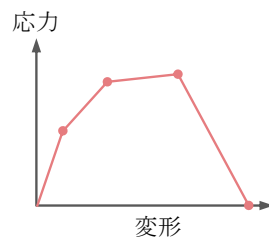
5.3.3 接合部の応力変形関係の妥当性確認方法

① 画像計測データを用いて下記の値と層間変位 δ_s の関係を求め、それらを層間変位 δ_s の関数に近似する。

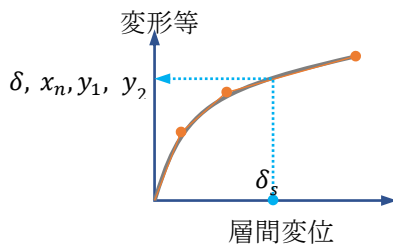
- a. 各接合部(構造モデル中のバネ要素)変形 δ
- b. 壁パネル脚部・頭部の中立軸位置 x_n
- c. 加力点高さ y_1, y_2



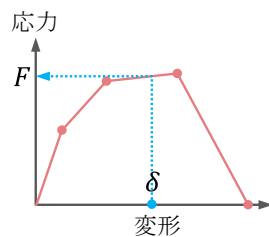
② 各接合部の応力変形関係を設定する。



③ 水平加力倒壊実験の各計測ステップにおける層間変位 δ_s を前記①の関数に代入して δ, x_n, y_1, y_2 を算出する。



④ 前記③による各接合部の変形 δ を前記②による応力変形関係に適用して各接合部の応力 F を算出する。



⑤ 各接合部の応力 F 、中立軸位置 x_n に基づいて構造モデル各部の曲げ応力を算出し、その合計を M_s とする。

⑥ 層間変位 δ_s に応じて壁傾斜復元力によるモーメント M_w を算出する。

⑦ 水平加力倒壊実験の各計測ステップの水平荷重 P_1, P_2 によるモーメント M_p を算出する。

$$M_p = P_1 \cdot y_1 + P_2 \cdot y_2$$

⑧ $M_s + M_w$ が M_p に適合することをもって前記②による各接合部の応力変形関係の妥当性を確認する。

5.3.4 各部応力・水平耐力の算出方法

試験体の終局状態における水平力抵抗要素はアンカーボルト引張力による1階壁脚部モーメント M_{bL}, M_{bR} 、垂壁の壁へのめり込みによる垂壁右端モーメント M_{L1}, M_{L2} 、および壁傾斜復元力によるモーメント M_w のみと仮定し、試験体の終局状態に対応する構造モデルを図 5.3.2 のように設定する。右側壁列の水平変位 d_i および

各床レベル水平力 P_i の比率 φ_i は既知として、 P_i の値を以下のように求める。なお、左側壁列の変位は近似的に右側壁列と等しいとする。鉛直荷重 $N_{ia} \sim N_{ie}$ は表 5.3.1 に示す各層の試験体重量を $N_{ia} \sim N_{ie}$ の負担幅に応じて配分したものとする。負担幅は隣接する鉛直荷重までの距離の 1/2 とし、左右に隣接する鉛直荷重がある場合は左右の合計とする。

表 5.3.1 試験体重量(kN)

試験体	W1	A10N	A10K
2層	100.6	117.3	121.0
1層	75.2	85.9	85.9

それぞれのモーメントは次のように計算できる。

$$\text{水平力 } P_i \text{ によるモーメント} \quad M_P = P_1 \cdot y_1 + P_2 \cdot y_2 \quad (5.3.1)$$

$$\text{架構水平耐力によるモーメント} \quad M_S = n_L \cdot ({}_B M + {}_T M + {}_L M + M_2) \quad (5.3.2)$$

$$\begin{aligned} \text{壁傾斜復元力によるモーメント} \quad M_w &= (N_{1a} + N_{1c}) \cdot (b - d_1) - (N_{1b} + N_{1d} + N_{1e}) \cdot d_1 \\ (\text{垂壁せん断応力の影響を含む}) \quad &+ (N_{2a} + N_{2c}) \cdot (b - d_2) - (N_{2b} + N_{2d} + N_{2e}) \cdot d_2 \end{aligned} \quad (5.3.3)$$

ここで、

n_L : 鉛直構面数 W1: $n_L = 1$ A10N, A10K: $n_L = 2$

${}_B M$: 下記の 1F 壁脚部曲げ応力の合計

$$\begin{aligned} {}_B M_a &= \left(d - \frac{0.85 {}_B x_{na}(\delta_{s1})}{2} \right) \cdot {}_B t \left((d - {}_B x_{na}(\delta_{s1})) \cdot {}_B \theta(\delta_{s1}) \right) \\ &+ \frac{D - 0.85 {}_B x_{na}(\delta_{s1})}{2} \cdot N_{1a} + {}_c M + {}_{BJ} M_a \end{aligned} \quad (5.3.4a)$$

$$\begin{aligned} {}_B M_b &= \left(d - \frac{0.85 {}_B x_{nb}(\delta_{s1})}{2} \right) \cdot {}_B t \left((d - {}_B x_{nb}(\delta_{s1})) \cdot {}_B \theta(\delta_{s1}) \right) \\ &+ \frac{D - 0.85 {}_B x_{nb}(\delta_{s1})}{2} \cdot N_{1b} + {}_{BJ} M_b \end{aligned} \quad (5.3.4b)$$

${}_B x_{na}(\delta_{s1}), {}_B x_{nb}(\delta_{s1})$: 左側・右側壁－基礎引張接合部の 1F 層間変位 δ_{s1} に応じた中立軸位置

${}_B \theta(\delta_{s1})$: 壁－基礎引張接合部の 1F 層間変位 δ_{s1} に応じた変形角

${}_B t(\delta)$: 壁－基礎引張接合部の変形 δ に応じた引張応力

D : 壁パネル幅 (1.0m)

d : 壁パネル圧縮縁から引張接合部までの距離 (0.9m とする)

※ CLT 設計施工マニュアル・第Ⅲ部・付録 2・式(3.2)を変形したもの。

※ 左辺第 2 項は $P \cdot \delta$ 効果分として M_w に含まれているので無視。

${}_{BJ} M_a, {}_{BJ} M_b$: 壁脚部せん断接合部の引張抵抗による曲げ応力 ※試験体では 0

$${}_{BJ} M_a = \left(D/2 - \frac{0.85 {}_B x_{na}(\delta_{s1})}{2} \right) \cdot 2 {}_{BJ} t \left((D/2 - {}_B x_{na}(\delta_{s1})) \cdot {}_B \theta(\delta_{s1}) \right) \quad (5.3.5a)$$

$${}_{BJ} M_b = \left(D/2 - \frac{0.85 {}_B x_{nb}(\delta_{s1})}{2} \right) \cdot 2 {}_{BJ} t \left((D/2 - {}_B x_{nb}(\delta_{s1})) \cdot {}_B \theta(\delta_{s1}) \right) \quad (5.3.5b)$$

${}_B t(\delta)$: 壁脚部せん断接合部の変形 δ に応じた引張応力

${}_c M$: 1F 左端直交壁脚部の引張応力による曲げ応力

$${}_c M = \left(D + 0.045 - \frac{0.85 {}_B x_{na}(\delta_{s1})}{2} \right) \cdot 2 {}_B t({}_c \delta) \quad (5.3.6)$$

ただし、 ${}_c \delta = \varphi \cdot (D + 0.045 - {}_B x_{na}(\delta_{s1})) \cdot {}_B \theta(\delta_{s1})$

φ : 壁左端脚部浮上りに対する直交壁脚部浮上りの比率

${}_T M$: 下記の 1F 壁頭部曲げ応力の合計 ※W1, A10K のみ

$${}_T M_a = \left(d - \frac{0.85{}_T x_{na}(\delta_{s12})}{2} \right) \cdot {}_T t \left((d - {}_T x_{na}(\delta_{s12})) \cdot {}_T \theta(\delta_{s12}) \right) + \frac{D - 0.85{}_T x_{na}(\delta_{s12})}{2} \cdot N_{1a} + {}_T J M_a \quad (5.3.7a)$$

$${}_T M_b = \left(d - \frac{0.85{}_T x_{nb}(\delta_{s12})}{2} \right) \cdot {}_T t \left((d - {}_T x_{nb}(\delta_{s12})) \cdot {}_T \theta(\delta_{s12}) \right) + \frac{D - 0.85{}_T x_{nb}(\delta_{s12})}{2} \cdot N_{1b} + {}_T J M_b \quad (5.3.7b)$$

ただし、 $\delta_{s12} = \delta_{s1} - \delta_{s2}$

${}_T x_{na}(\delta_{s1}), {}_T x_{nb}(\delta_{s1})$: 左側・右側壁頭部引張接合部の 1F, 2F 層間変位差 δ_{s12} に応じた中立軸位置

${}_T \theta(\delta_{s1})$: 壁頭部引張接合部の 1F, 2F 層間変位差 δ_{s12} に応じた変形角

${}_T t(\delta)$: 壁頭部引張接合部の変形 δ に応じた引張応力

${}_T J M_a, {}_T J M_b$: 壁頭部せん断接合部の引張抵抗による曲げ応力 ※W1, A10K のみ

$${}_T J M_a = \left(D/2 - \frac{0.85{}_T x_{na}(\delta_{s12})}{2} \right) \cdot 2{}_T J t \left((D/2 - {}_T x_{na}(\delta_{s12})) \cdot {}_T \theta(\delta_{s12}) \right) \quad (5.3.8a)$$

$${}_T J M_b = \left(D/2 - \frac{0.85{}_T x_{nb}(\delta_{s12})}{2} \right) \cdot 2{}_T J t \left((D/2 - {}_T x_{nb}(\delta_{s12})) \cdot {}_T \theta(\delta_{s12}) \right) \quad (5.3.8b)$$

${}_T J t(\delta)$: 壁頭部せん断接合部の変形 δ に応じた引張応力

${}_L M$: 下記の垂壁端部または梁端部曲げ応力の合計

$${}_L M_{1a} = {}_L m_a({}_L \theta_1(\delta_{s1})) \quad (5.3.9a)$$

$${}_L M_{1b} = {}_L m_b({}_L \theta_1(\delta_{s1})) \quad (5.3.9b)$$

$${}_L M_{1c} = {}_c m({}_c \theta_1(\delta_{s1})) \quad \text{※A10N のみ} \quad (5.3.9c)$$

$${}_L M_{2a} = {}_L m_a({}_L \theta_2(\delta_{s2})) \quad \text{※A10N のみ} \quad (5.3.9d)$$

$${}_L M_{2b} = {}_L m_b({}_L \theta_2(\delta_{s2})) \quad \text{※A10N のみ} \quad (5.3.9e)$$

$${}_L M_{2c} = {}_c m({}_c \theta_2(\delta_{s2})) \quad \text{※A10N のみ} \quad (5.3.9f)$$

${}_L m_a(\theta), {}_L m_b(\theta)$: 垂壁左端・右端の変形角 θ に応じた曲げ応力

${}_c m(\theta)$: 右端梁の変形角 θ に応じた曲げ応力

M_2 : 2F モーメント応力 (= 2F 転倒モーメント) ※W1, A10K のみ

$$M_2 = P_2 \cdot (y_2 - y_1) + W_2 \cdot (d_2 - d_1) \quad (5.3.10)$$

※ 左辺第 2 項は 2F の $P \cdot \delta$ 効果分であり、 P_2 に含まれているので無視。

$N_{1a}, N_{1b}, N_{1c}, N_{1d}, N_{1e}$: 1F 壁頭部鉛直荷重

試験体 W1, A10K

$$N_{1a} = (W_1 + W_2) \cdot \frac{a - b}{2(a + b)} - \frac{M_2}{a + b} + W_b \quad (5.3.11a)$$

$$N_{1c} = (W_1 + W_2) \cdot \frac{a + 3b}{2(a + b)} + \frac{M_2}{a + b} \quad (5.3.11b)$$

試験体 A10N

$$\begin{aligned} N_{1a} &= W_1 \cdot \frac{b/2}{a + 3b} + W_b & N_{1b} &= W_1 \cdot \frac{(a + b)/2}{a + 3b} - {}_L Q_{1a} \\ N_{1c} &= W_1 \cdot \frac{(a + b)/2}{a + 3b} + {}_L Q_{1a} & N_{1d} &= W_1 \cdot \frac{b}{a + 3b} - {}_L Q_{1b} \end{aligned} \quad (5.3.12)$$

$$N_{1e} = W_1 \cdot \frac{b/2}{a+3b} + {}_LQ_{1b}$$

$N_{2a}, N_{2b}, N_{2c}, N_{2d}, N_{2e}$: 2F 壁頭部鉛直荷重

試験体 A10N

$$\begin{aligned} N_{2a} &= W_2 \cdot \frac{b/2}{a+3b} + W_b & N_{2b} &= W_2 \cdot \frac{(a+b)/2}{a+3b} - {}_LQ_{2a} \\ N_{2c} &= W_2 \cdot \frac{(a+b)/2}{a+3b} + {}_LQ_{2a} & N_{2d} &= W_2 \cdot \frac{b}{a+3b} - {}_LQ_{2b} \\ N_{2e} &= W_2 \cdot \frac{b/2}{a+3b} + {}_LQ_{2b} \end{aligned} \quad (5.3.13)$$

W_1, W_2 : 1F および 2F 重量

W1: $W_1 = 100.6\text{kN}$, $W_2 = 75.2\text{kN}$ A10N: $W_1 = 117.3\text{kN}$, $W_2 = 85.9\text{kN}$

A10K: $W_1 = 121.0\text{kN}$, $W_2 = 85.9\text{kN}$

W_b : 加力梁重量

W1: $W_b = 16\text{kN}$ A10N: $W_b = 4\text{kN}$ A10K: $W_b = 8\text{kN}$

${}_LQ_{1a}, {}_LQ_{1b}$: 床レベル垂壁・梁せん断応力

$${}_LQ_{1a} = \frac{{}_LM_{1a} + {}_LM_{1b}}{a} \quad (5.3.14a)$$

$${}_LQ_{1b} = \frac{{}_LM_{1c}}{b} \quad \text{※A10N のみ} \quad (5.3.14b)$$

${}_LQ_{2a}, {}_LQ_{2b}$: 屋根レベル垂壁・梁せん断応力

$${}_LQ_{2a} = \frac{{}_LM_{2a} + {}_LM_{2b}}{a} \quad (5.3.15a)$$

$${}_LQ_{2b} = \frac{{}_LM_{2c}}{b} \quad \text{※A10N のみ} \quad (5.3.15b)$$

以上のほか、試験体 W1、A10K について 1F 右端直交壁の引張軸力 N_R による抵抗モーメントを次のように求める。

$$M_R = {}_RM_h + {}_RM_w \quad (5.3.16)$$

ここで、

${}_RM_h$: N_R の水平成分による抵抗モーメント

$${}_RM_h = N_R \cdot \sin_R\theta(\delta_{s1}) \cdot y_1 \quad (5.3.17)$$

${}_R\theta(\delta_{s1})$: 壁-基礎引張接合部の 1F 層間変位 δ_{s1} に応じた回転角

${}_RM_w$: N_R による 1F 壁傾斜復元力モーメント

$${}_RM_w = ({}_RN_{1a} + {}_RN_{1c}) \cdot (b - d_1) = N_R \cdot \cos_R\theta(\delta_{s1}) \cdot (b - d_1) \quad (5.3.18)$$

${}_RN_{1a}, {}_RN_{1c}$: N_R による 1F 壁頭部鉛直荷重

$${}_RN_{1a} = -\frac{2b}{a+b} \cdot N_R \cdot \cos_R\theta(\delta_{s1}) \quad (5.3.19a)$$

$${}_RN_{1c} = \frac{a+3b}{a+b} \cdot N_R \cdot \cos_R\theta(\delta_{s1}) \quad (5.3.19b)$$

N_R : 1F 右端直交壁の引張軸力

$$N_R = {}_Rt({}_R\delta(\delta_{s1})) \quad (5.3.20)$$

${}_Rt(\delta)$: 1F 右端直交壁の軸変形 δ に応じた引張応力

$R\delta(\delta_{s1})$: 1F 右端直交壁の 1F 層間変位 δ_{s1} に応じた軸変形

本来 $M_p = M_s + M_w + M_r$ であることを条件として、 $M_s + M_w + M_r$ に対応する水平力 aP_1, aP_2 を下記のように求める。

$$aP_1 = \frac{M_s + M_w + M_r}{M_p} \cdot P_1 \quad (5.3.21a)$$

$$aP_2 = \frac{M_s + M_w + M_r}{M_p} \cdot P_2 \quad (5.3.21b)$$

5.3.5 画像計測結果に基づく接合部変形のモデル化

5.3.3①で述べたように、画像計測データを用いて下記の値と層間変位 δ_s の関係を求め、それらを層間変位 δ_s の関数に近似する。結果を図5.3.3～5.3.5に示す。

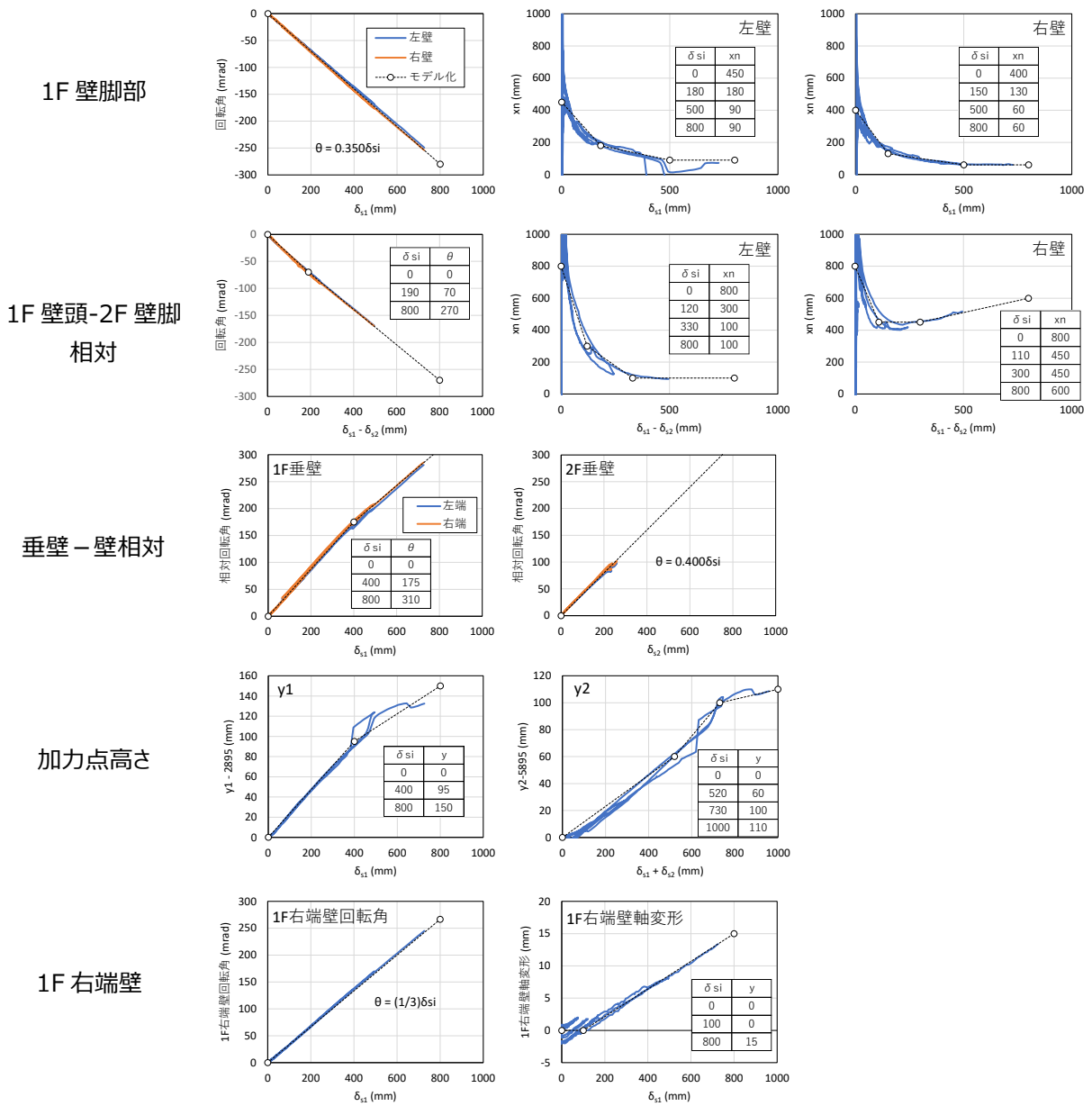


図 5.3.3 接合部変形－層間変位関係の定式化 — 試験体 W1

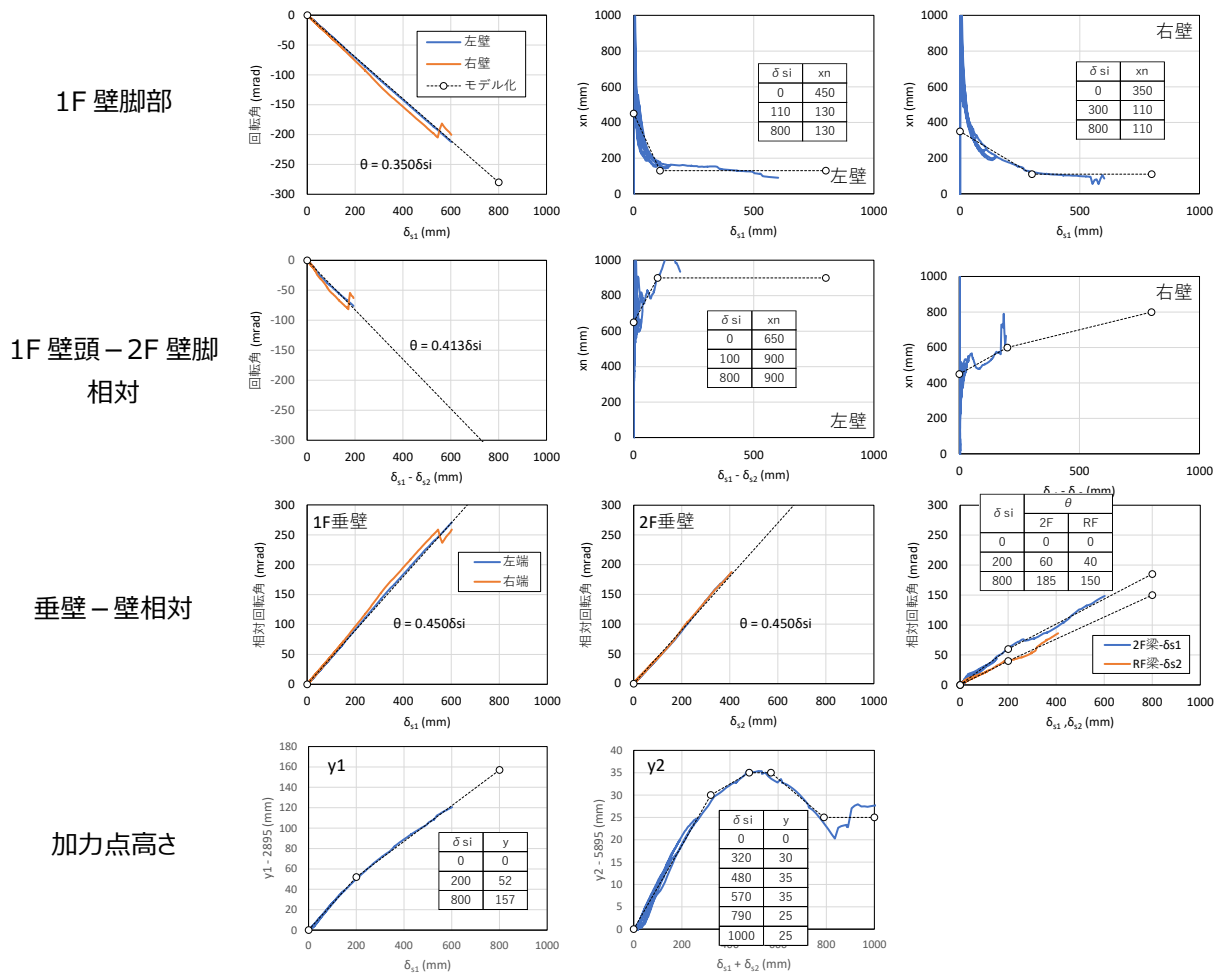


図 5.3.4 接合部変形－層間変位関係の定式化 — 試験体 A10N

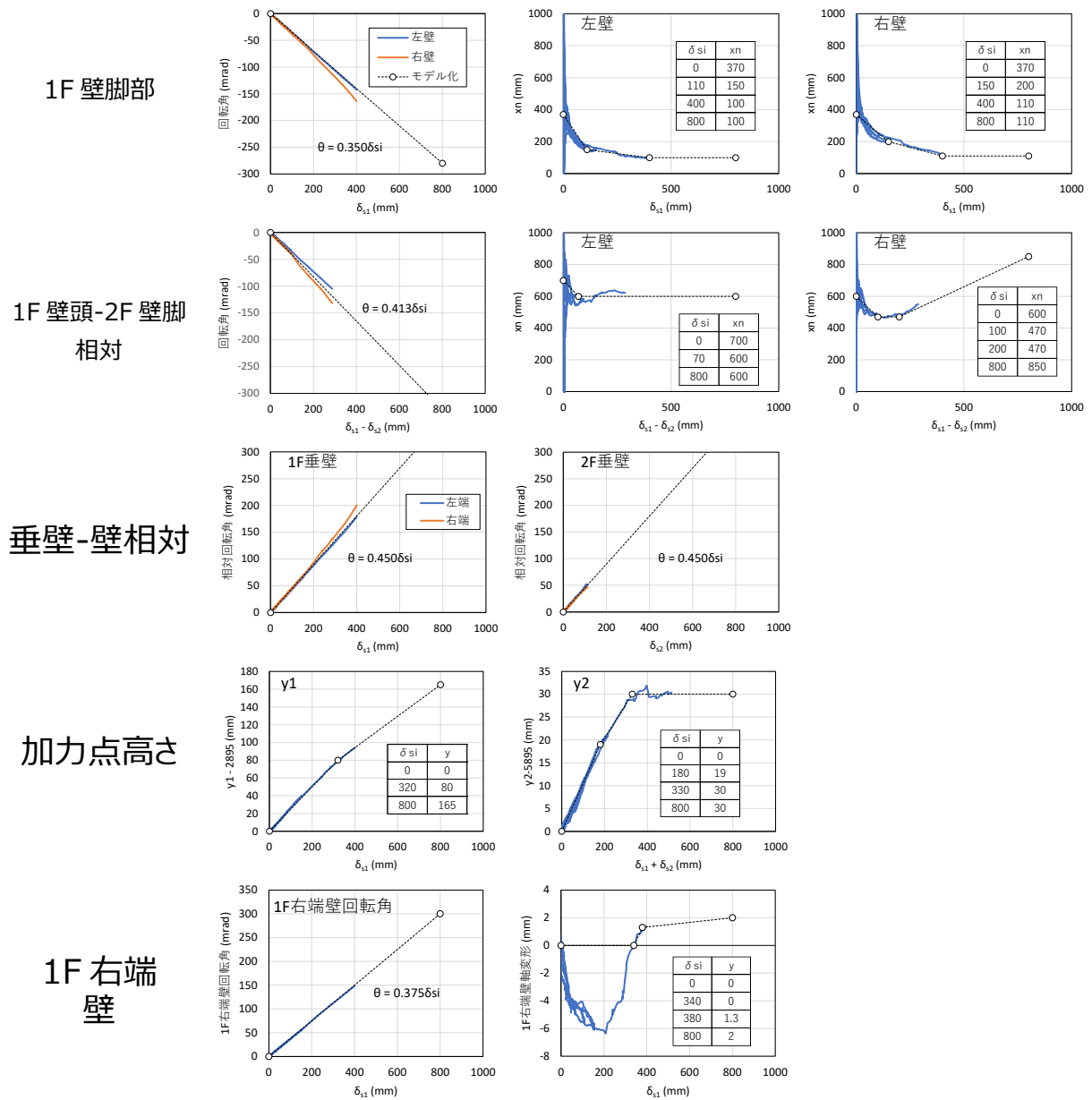


図 5.3.5 接合部変形一層間変位関係の定式化 — 試験体 A10K

5.3.6 接合部のモデル化

5.3.3②で述べたように接合部の応力変形関係を既知情報として次のようにモデル化する。

(1) 引張接合部

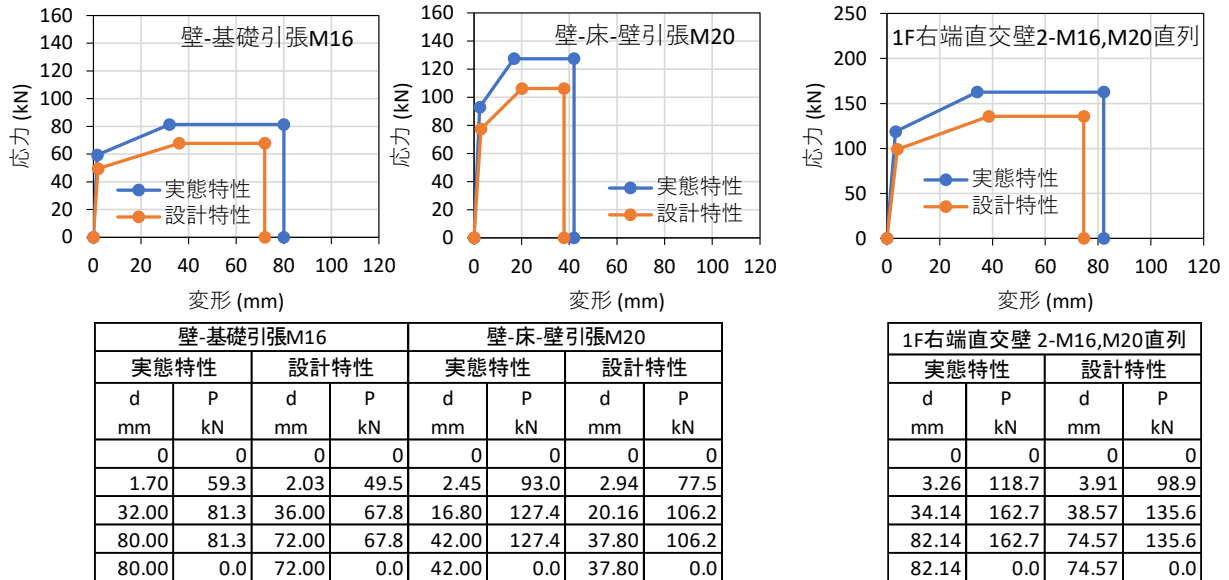


図 5.3.6 引張接合部の応力変形関係

(2) せん断接合部の引張抵抗

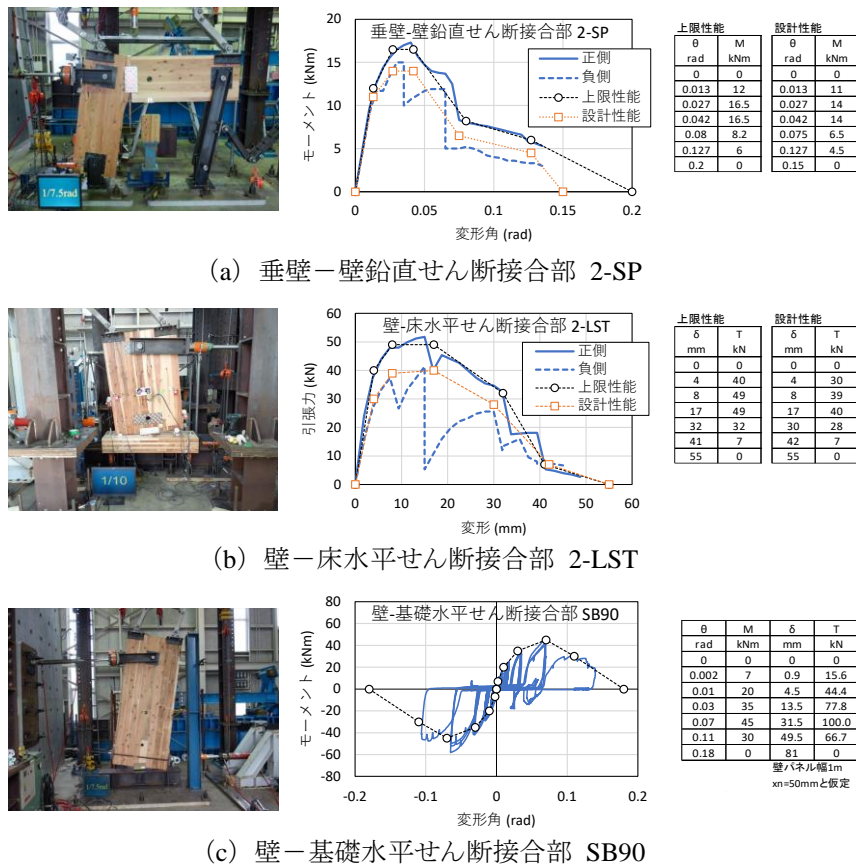
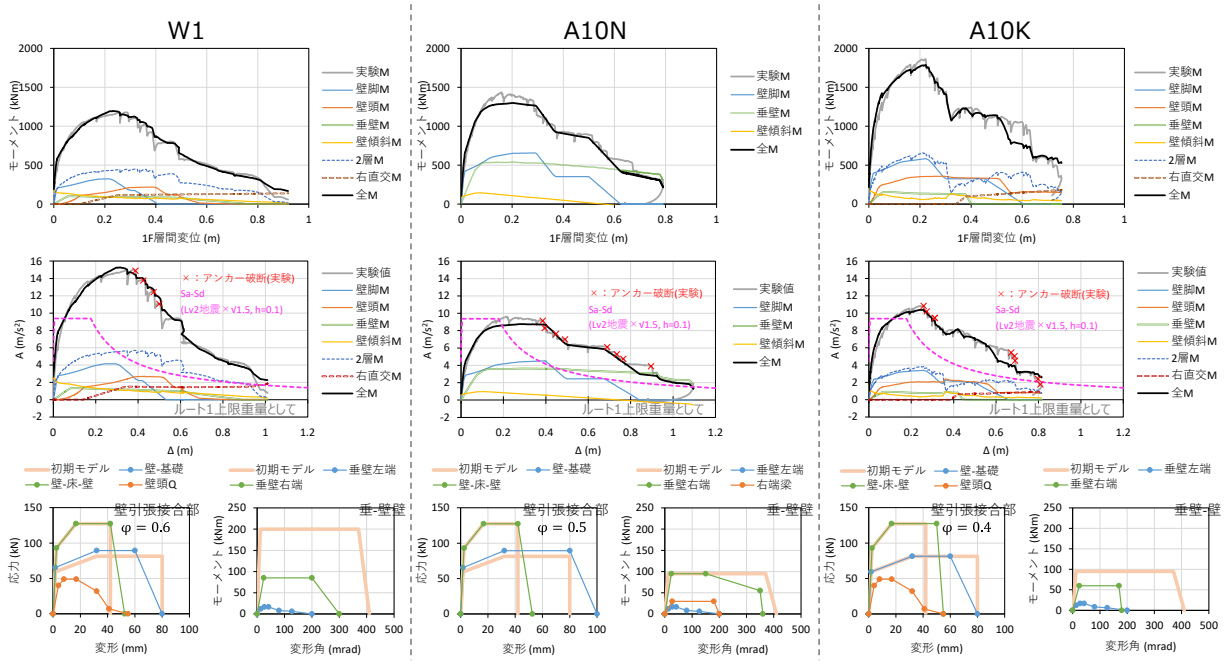


図 5.3.7 せん断接合部の引張抵抗の応力変形関係

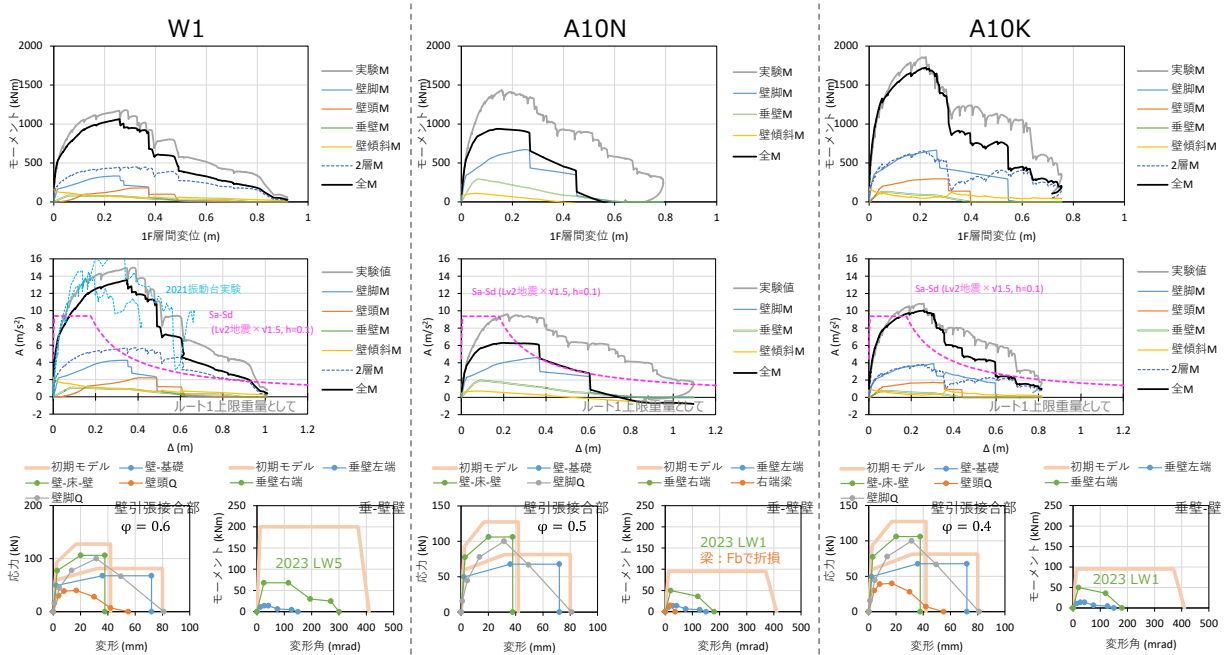
5.3.7 再推定の結果

再推定の結果を図5.3.8に示す。再推定の方法は5.3.3③～⑧に示すとおりであり、水平加力倒壊実験の各計測ステップの水平荷重 P_1 、 P_2 によるモーメント M_p が、各接合部応力によるモーメント M_s と壁傾斜復元力によるモーメント M_w の和に等しいことを条件として、未知情報である垂壁－壁接合部のモーメント M -変形角 θ 関係を求めた。「(a) 実態性能」については、5.3.6に示す引張接合部の応力変形関係のうち実態特性とし、せん断接合部の引張抵抗の応力変形関係は上限性能とした。また、垂壁－壁接合部以外に、既知情報である引張接合部の応力変形関係も妥当と考えられる範囲で調整の対象とした。「(b) 設計性能」は下記の条件下で算出した。

- 壁引張接合部・せん断接合部の引張抵抗は設計性能とする。



(a) 実態性能



(b) 設計性能

図 5.3.8 垂壁－壁接合部の面内曲げ性能の推定結果

- 垂壁一壁接合部は5.2に示す垂壁一壁接合部の水平加力(面内曲げ)実験による応力変形関係とする。
- 加力梁重量・右端直交壁は無視する。
- 集成材梁は基準強度で折損するものとする。

(1) 実態性能について

図5.3.8(a)では各接合部応力と壁傾斜復元力によるモーメント $M_S + M_W$ (図中「全M」)が、水平力による M_P (図中「実験M」)にはほぼ一致しており、推定された垂壁一壁接合部の $M-\theta$ 関係の妥当性を示している。ただし、試験体W1, A10Kについては終端付近で全Mが実験Mに対してやや過大になっている。これは、W1については終局時に1階壁パネル上部に圧壊が生じ、A10Kでは1階垂壁一壁接合部が面外に変形(座屈)が生じたことにより、本推定方法では考慮していない接合部耐力低下が発生した原因と考えられる。

W1, A10Kについて、推定された垂壁一壁接合部の $M-\theta$ 関係は、それぞれ、垂壁一壁接合部の水平加力(面内曲げ)実験試験体LW5, LW1による $M-\theta$ 関係に近づいた(図5.3.9)。LW5, LW1に対してやや高耐力・高靱性であるが、図5.2.3に示す $M-\theta$ 関係のばらつきの範囲内と見ることできる。

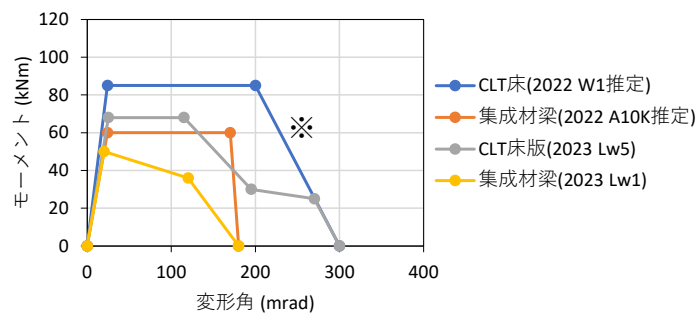


図 5.3.9 垂壁-壁接合部の $M-\theta$ 関係の比較

垂壁一壁接合部の $M-\theta$ 関係を図5.3.9中の※印とし、引張接合部については図5.3.6中の実態性能、せん断接合部の引張抵抗については図5.3.7中の上限性能として、W1と同様の構成である2015年度震動台実験試験体E棟に対する応答解析を実施した。結果は図5.3.10に示すように解析結果は振動台実験結果にはほぼ適合し、この点からも図5.3.9中の※印、すなわちここで推定したW1の垂壁一壁接合部 $M-\theta$ 関係は妥当であること示している。

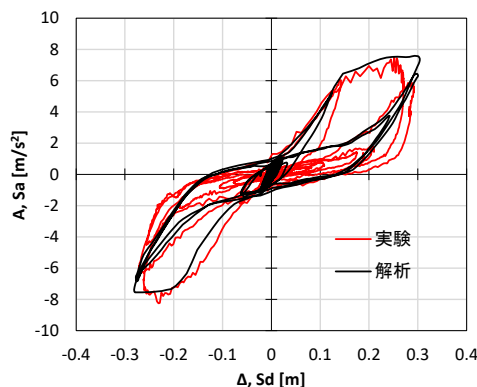


図 5.3.10 推定した垂壁一壁接合部の $M-\theta$ 関係を用いた解析結果と振動台実験結果の比較

A10Nについては、推定された垂壁一壁接合部の $M-\theta$ 関係は2022年度推定値と同等で、A10Kより高耐力・高靱性であり、過大評価である可能性が高い。その原因は現時点では定かでないが、本検討で考慮した以外の曲げ抵抗要素が存在すること、集成材梁と床合板の合成効果により曲げ耐力が増加することなどが考えられる。

(2) 設計性能について

垂壁－壁接合部の $M-\theta$ 関係を垂壁－壁接合部の水平加力(面内曲げ)実験試験体LW5, LW1による結果に合わせ、1F壁脚の水平せん断接合部の引張抵抗を考慮すると、W1では1F層間変位が0.4m程度まで、A10Kでは0.3m程度までは水平耐力の実態性能に対する比率は0.95程度以上。それを超える変形領域では0.5～0.7程度である。ただし、W1, A10Kのいずれも2F部分は実験性能と同じと仮定しており、水平耐力はもう少し減少する可能性がある。同様にA10Nでは0.25m程度までは水平耐力の実態性能に対する比率は0.7程度、0.45m程度までは0.5程度、それを超える変形領域ではほぼ0である。Lv2地震動 $\times\sqrt{1.5}$, $h = 0.1$ の S_a-S_d と、水平耐力低下以前で交点を持ち得ることを条件として、負担可能重量のルート1上限重量に対する倍率 A_w の上限値を評価すれば下記のようなになる。

$$W1: A_w \leq 3.2 \quad A10N: A_w \leq 1.3 \quad A10K: A_w \leq 1.6$$

W1について、図5.3.8(b)中段に2021年度振動台実験による $A-\Delta$ 関係の包絡線を併記した。2021年度振動台実験では $\Delta = 0.55\text{m}$ 程度で水平耐力が激減しており、設計性能に基づく計算結果に符合している。少なくともW1については垂壁－壁接合部の水平加力(面内曲げ)実験試験体LW5による結果が実性能であった可能性が高い。

5.4 垂壁－壁接合部の振動台実験に基づく性能

5.4.1 第1回振動台実験（2022年度）

2022年度に垂壁－壁接合部の動的な面内曲げ性能確認を目的として図5.4.1 (a)に示す試験体を用いた振動台実験（第1回振動台実験）を実施した。その主要な結果として下記が確認された

- 垂壁－壁接合部の面内曲げ耐力は2022年度推定値にはほぼ一致した。
- 1/26rad程度の変形角で集成材梁が破断。しかし、歪みから推定される推定応力度は基準強度に達していない。

上記2点目については、本実験では錘重量が少なかったことにより、破壊に至るまでに1/30rad以上の振幅だけでも120回程度の繰り返し変形が梁に強制され、過大な繰り返し変形が与えられたことが原因と推測された。

この結果を踏まえ、本年度の振動台実験（第2回振動台実験）では図5.4.2のように錘を支持する水平耐力の無い架台を設け、それを試験体と接続することとした。錘による鉛直重量が試験体に作用しないことを考慮して、錘を含めた試験体重量を第1回振動台実験の約2.5倍とした。試験体は水平構面を集成材・合板床組とした「C」とCLT床パネル相互の引張接合にクロスマーク金物STFを用いた「G」の2種類とした。

実験結果として、垂壁端部の曲げモーメント M と層間変形角の関係を図5.4.3に示す。これらの試験体は垂壁－壁接合部の回転変形角 θ と層間変形角が等しくなるように形状が設定されている。試験体GではJMA神戸NS, 100%とし、試験体CではJMA神戸NS, 100%の後にJR鷹取NS, 75%を入力した。図5.4.3には試験体Gにつ

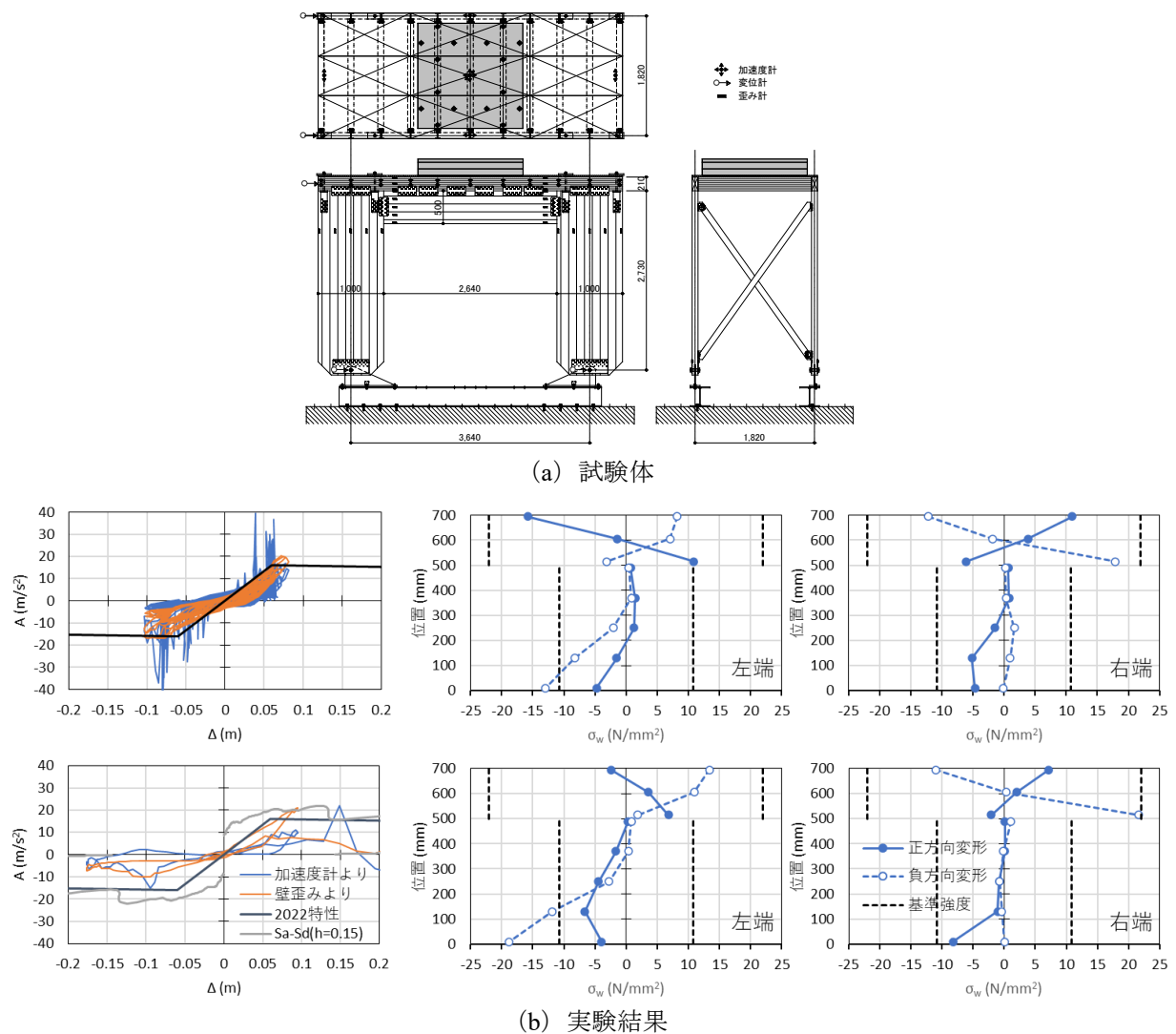


図 5.4.1 第1回振動台実験の概要

いて垂壁－壁接合部の水平加力（面内曲げ）実験試験体LW1のM- θ 関係を併記し、試験体Cについては同じくLW5のM- θ 関係を併記した。

試験体Gでは、LW1と比較して、集成材梁折損前の耐力が大きい、折損後の耐力は概ね適合している。試験体Cでは、1回目（JMA神戸NS100%）加振では耐力がLW5の1.5倍程度であった。2回目（JR鷹取NS75%）加振では試験体右側STFのビス（図5.4.2中a）が引抜けて負側に倒壊し、LW5と比べて靱性が極めて小さい結果となった。これは、正側最大変形時に垂壁右端が跳ね上がった（図5.4.2中b）ことによるビスの損傷が原因と考えられる。このような現象が防止されればLW5と同等の変形性能となったと推測される。防止策として、図5.4.4に示すような床パネル相互間の鉛直せん断接合（ビス斜め打ち、他）、ハーフラップジョイントCLT床パネルあるいは床目地と壁目地を500mm程度以上離すことによる垂壁端部の跳ね上げ拘束などが有効と考えられる。

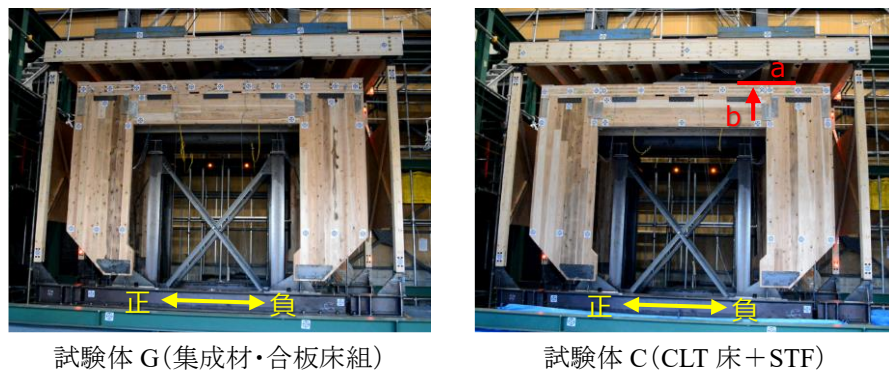
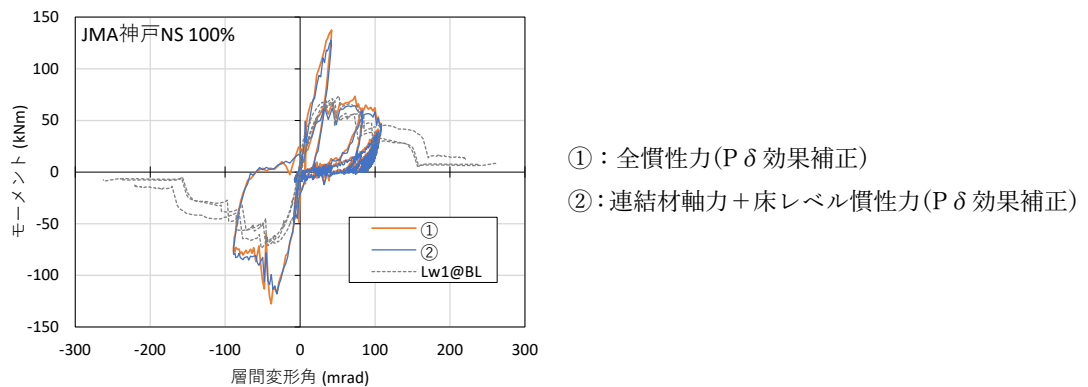
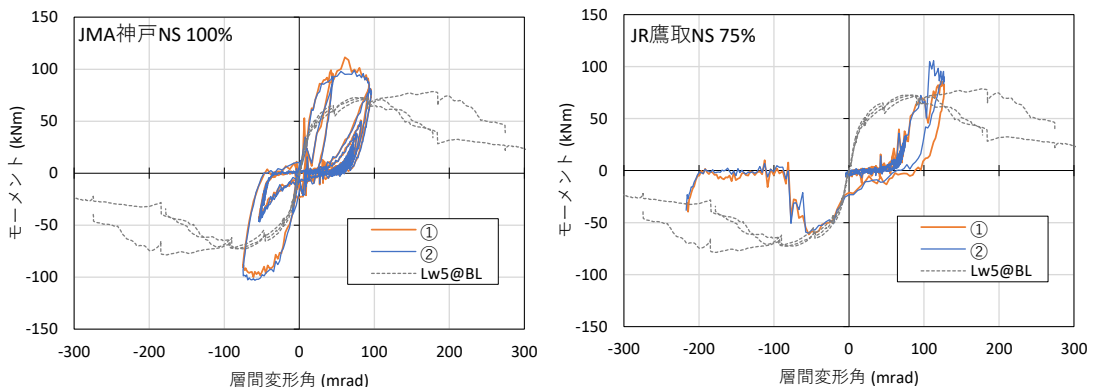


図 5.4.2 第 2 回振動台実験試験体



(a) 試験体 G — 集成材床組



(b) 試験体 C — CLT(弱軸)床版

図 5.4.3 第 2 回振動台実験の結果

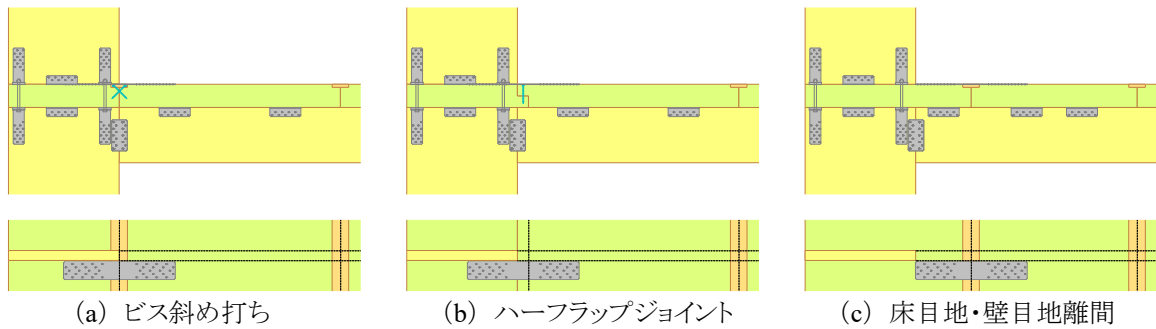


図 5.4.4 垂壁端部の跳ね上げ防止策の例

5.5 まとめ

第5章では垂壁一壁接合部の面内曲げに関して下記の3種類の検討を行った。

- 1) 垂壁一壁接合部の水平加力(面内曲げ)実験に基づく性能
- 2) 水平加力倒壊実験における垂壁一壁接合部面内曲げ性能の再推定
- 3) 垂壁一壁接合部の振動台実験に基づく性能

1)の実験では6種類の試験体それぞれについて3体の加力を行った。特にCLT床の場合にばらつきが大きい、その下限値に相当する「解析用性能」を設定した。2)の推定による面内曲げ性能は耐力・変形能力ともに1)の結果よりやや大きい、その性能を用いた既往の振動台実験に対応する応答解析結果は同振動台実験結果にほぼ適合し、2)による性能が実態に近いと推測された。3)の実験による性能は、集成材・合板床組とした試験体については1)よりやや耐力が大きい、変形能力はほぼ同等であった。CLT床を用いた試験体では、耐力は1)の1.5倍程度であったが、垂壁端部の跳ね上げによる床パネル相互間引張接合部ビスが損傷したことにより変形能力は1)の1/3程度であった。垂壁端部の跳ね上げは比較的簡易な対策で防止でき、その限りにおいて少なくとも1)と同等の変形能力が得られるものと推測された。以上の結果より、以降の検討では安全側の判断として1)による性能を前提とする。