

## 犬山城天守における筋違入土壁、筋違入板壁の性能試験

- 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：犬山城天守

文化財種別（指定年月日）：国宝（昭和27年3月29日）

所在地：愛知県犬山市

所有者（管理団体）：公益財団法人 犬山城白帝文庫（犬山市）

構造形式：三重四階、地下二階付、本瓦葺、南面及び西面附櫓、各一重、本瓦葺、

建築年：桃山時代（慶長6年（1601））

事業名称：国宝犬山城天守耐震診断事業

事業期間：平成24年6月1日～平成27年3月31日

工事種別：耐震診断

事業者：犬山市

設計監理：公益財団法人文化財建造物保存技術協会

実験計画者：有限会社安芸構造計画事務所

実験機関：－

実験年月日：－

引用・参考文献：－

### ●実験に至る経緯と目的

犬山城天守は、中古に壁内に筋違が付加されている。耐震診断実施にあたり、筋違が付加された土壁や板壁の構造性能を適切に把握することが、建物の性能を適切に評価し、補強を最小限とするために必要と考えられた。そのため、実大試験体を作成し、実験を行った。

● 姿図・寸法

【使用材料】

木材は含水率と縦弾性係数を測定した。土壁は試験体と同じ土を用いた材料試験用の試験体を製作し、圧縮試験、せん断試験を実施した。

表 1 土壁材料の試験結果

試験	試験体寸法	密度 (g/cm <sup>3</sup> )				強度 (N/mm <sup>2</sup> )			
		①	②	③	平均	①	②	③	平均
圧縮	140x140x190	-	1.464	1.501	1.483	0.559	0.599	0.435	0.544
せん断	45x45x145	1.992	1.411	1.288	1.564	0.457	0.387	0.232	0.359

【試験体寸法】

板壁試験体 1890×4050×200

土壁試験体 1890×3847×240

a 板壁試験体

① 柱・貫の軸組

② 柱・貫の軸組+板壁 (片側のみ)

③ 柱・貫の軸組+筋違

b 土壁試験体

④ 柱・貫の軸組

⑤ 柱・貫の軸組+筋違

⑥ 柱・貫の軸組+土壁 (大壁+真壁)

⑦ 柱・貫の軸組+土壁 (大壁+真壁) +筋違

⑧ 柱・貫の軸組+土壁 (大壁+真壁+開口付き) +筋違

各試験体の寸法を図 1 に示す。

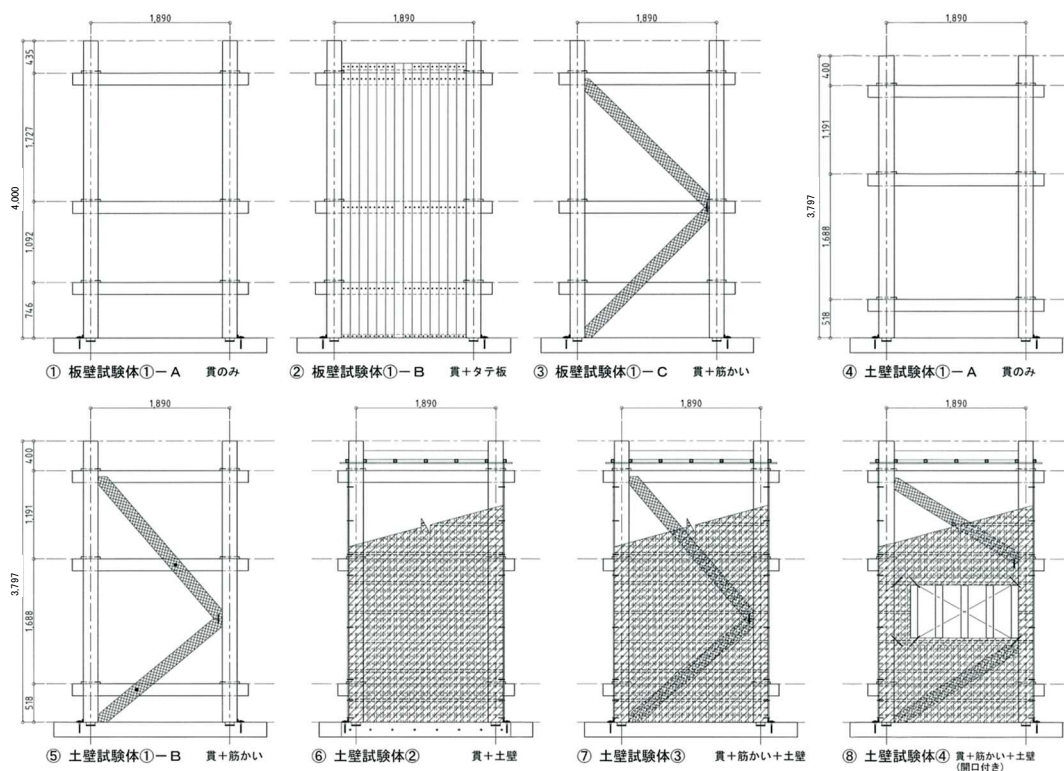


図1 各試験体の寸法

●概要

犬山城天守1、2階の筋違入土壁と、3、4階の筋違入板壁の水平力の負担性能を確認するため、それぞれ試験体を作成し、水平加力試験を行った。試験体は軸組のみ、筋違、板壁、土壁とそれらの組み合わせ、加えて土壁筋違入の開口がある場合について作成した。

●実験方法

水平加力試験を行った(図2)。正負交番繰り返し加力とし、1/500~1/15 radまで11ステップ、各ステップ1サイクルとし、最終的に1/10radまで加力した。浮き上がり拘束はタイロッド式で行った。

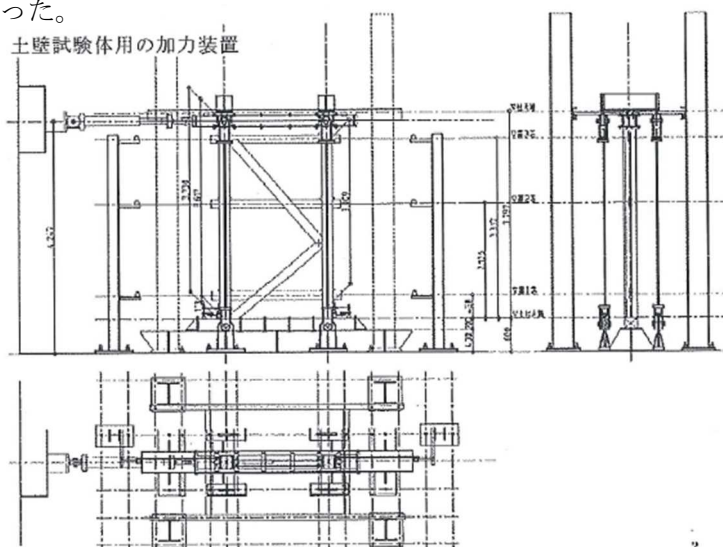


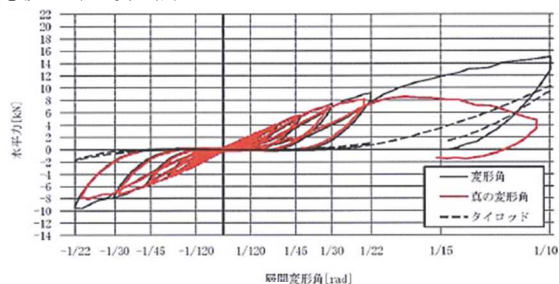
図2 加力試験方法

●特性値

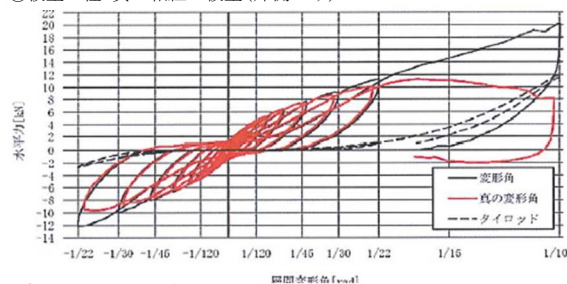
●荷重変形

試験体の水平力からタイロッド負担分を引いたものを“真の変形角”の水平力とし、荷重変形関係を求めた（図 3）。また板壁仕様の試験体、土壁仕様の試験体のそれぞれで実験結果の比較を行った（図 4・図 5）。

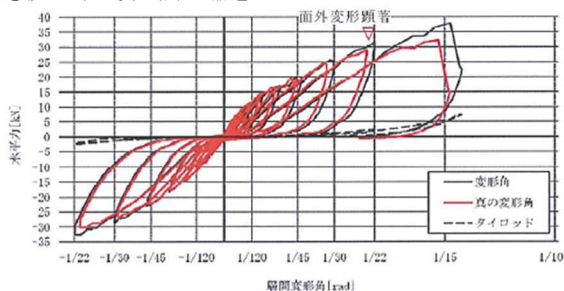
①板壁 柱・貫の軸組



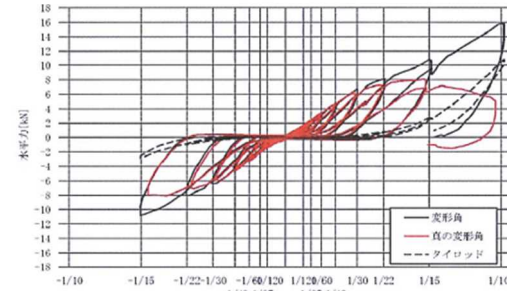
②板壁 柱・貫の軸組+板壁(片側のみ)



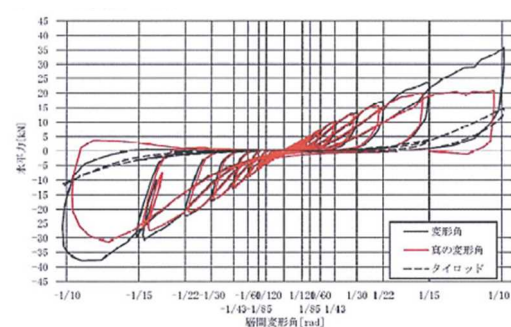
③板壁 柱・貫の軸組+筋違



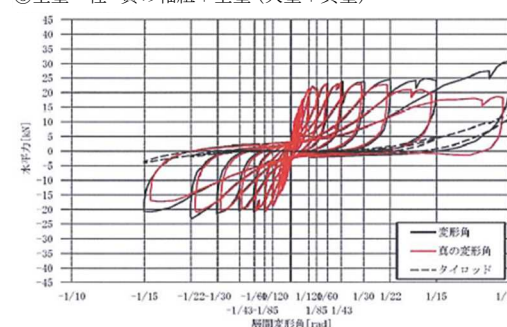
④土壁 柱・貫の軸組



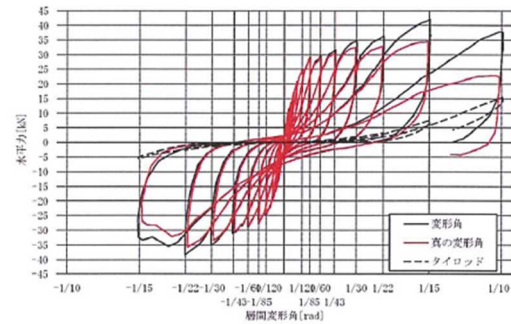
⑤土壁 柱・貫の軸組+筋違



⑥土壁 柱・貫の軸組+土壁(大壁+真壁)



⑦土壁 柱・貫の軸組+土壁(大壁+真壁)+筋違



⑧土壁 柱・貫の軸組+開口付き土壁(大壁+真壁)+筋違

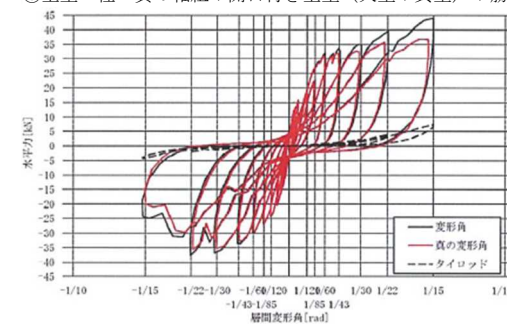


図 3 各試験体の荷重変形

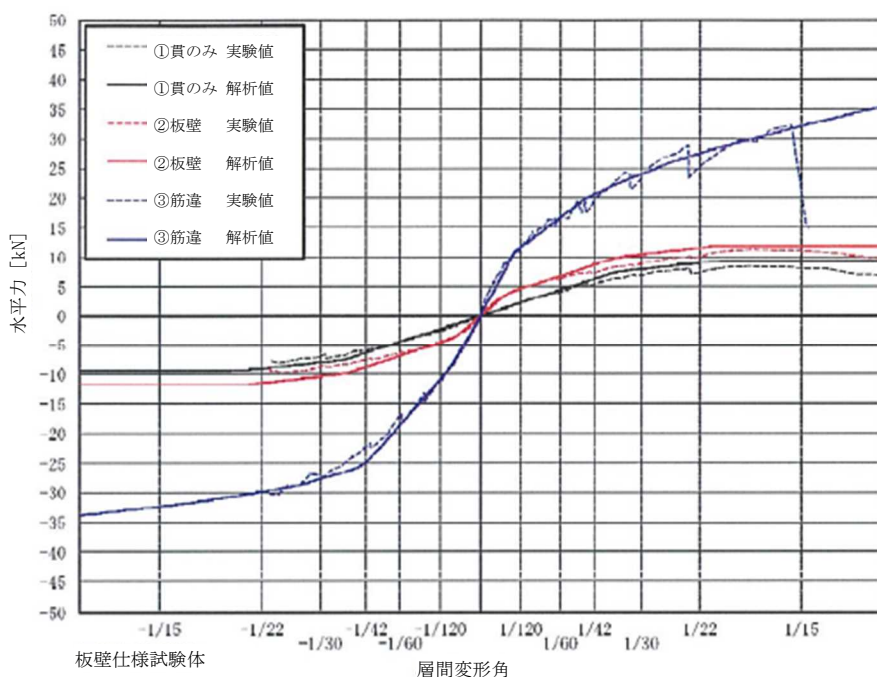


図4 板壁試験体の実験結果

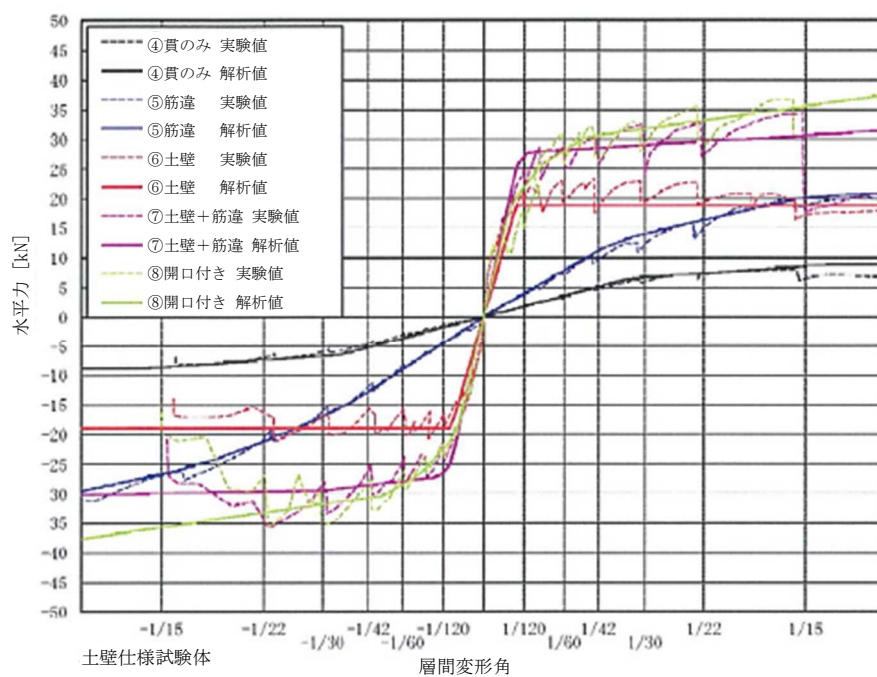


図5 土壁試験体の実験結果



●破壊形状

a 板壁試験体

①柱・貫、②柱・貫+板壁では繋ぎの貫材だけが回転したが、③柱・貫+筋違では上下段の筋違が交互に突っ張り、変形角 1/30 から片側の柱が外側に「く」の字に曲がり、変形角 1/22 から筋違の面外への孕みだしも顕著になった。①柱・貫、②柱・貫+板壁では降伏後の荷重増分が見込めないバイリニア型、③柱・貫+筋違では降伏後の剛性も見込めるバイリニア型やトリリニア型であった。



図6 貫楔のめり込み (①)



図7 試験体③最終状況



図8 柱の曲げ破断 (③)

b 土壁試験体

⑤柱・貫+筋違では③柱・貫+筋違に対して、筋違と柱との交点に繋ぎ材がないことから筋違の交点が上下に滑り、剛性・耐力共に低くなった。⑥柱・貫+土壁は、クラックが生じないまま大壁部分が剥離して回転し、面外に大きく変形した後、下地ごと軸組から剥がれた。⑦柱・貫+土壁+筋違と⑧柱・貫+開口付き土壁+筋違は、どちらも下段の筋違が貫との交差部で折れ土壁を押し出して崩壊した。また、真壁部分にクラックが発生して落下した。土壁試験体 (⑥~⑧) 3体は層間変形角 1/22.5 を超えると、大壁部分の竹下地を含めた面外変形や筋違折損による孕みだしが顕著になった。

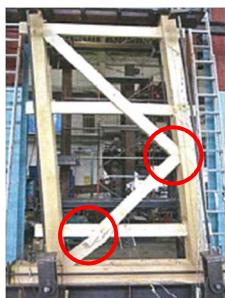


図9 最終状況 (⑤)



←筋違の交点が上に滑っている (⑤)

図10 筋違折損 (⑤)



図11 最終状況 (⑥)



図12 土壁剥離 (⑥)



図13 最終状況 (⑦)



図14 筋違折損 (⑦)



図15 最終状況 (⑧)



図16 土壁剥離 (⑧)

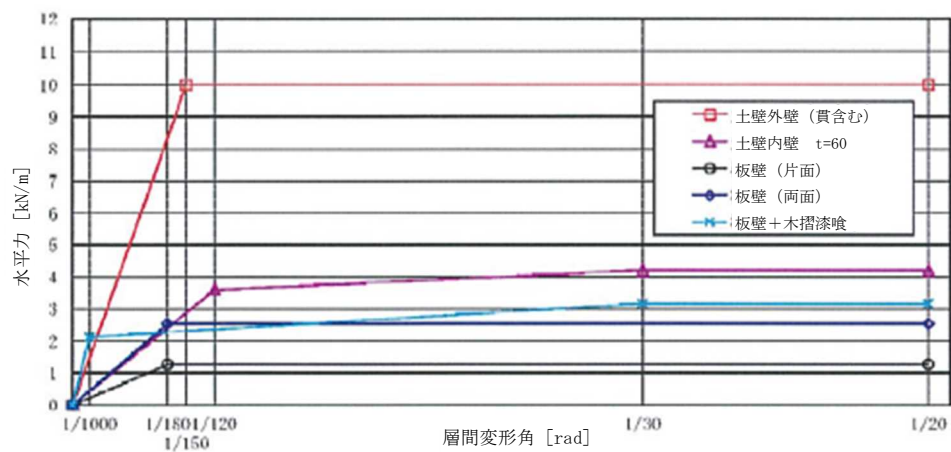
●理論式

—

●モデル化

柱貫接合部の復元力特性については、稲山氏の提案式を使って、降伏モーメントの値を実験結果 (①) と調整し、モデル化した。

壁要素の復元力特性については、実験結果と文献に基づき図 17 のようにモデル化した。



壁要素の復元力特性 (幅あたり [kN/m])

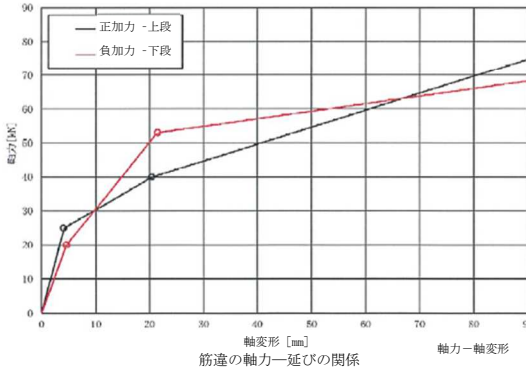
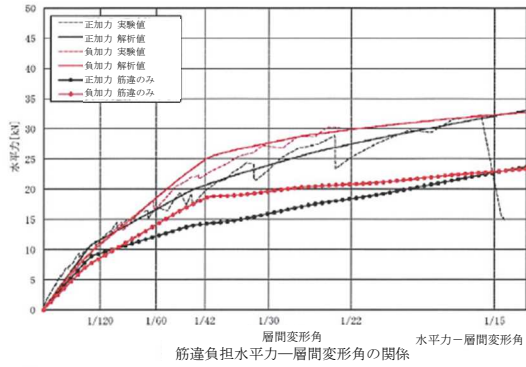
名称	タイプ	$\theta_y$ [rad]	$\theta_u$ [rad]	$Q_y$ [kN/m]	$Q_u$ [kN/m]	$\alpha_1$	$\alpha_2$
土壁外壁 (貫含む)	バイリニア	1/150		10.00		0.000	
土壁内壁 t=60	トリリニア	1/120	1/30	3.60	4.20	0.056	0.000
板壁+木摺漆喰	トリリニア	1/1000	1/30	2.13	3.17	0.015	0.000
板壁 (両面)	バイリニア	1/180		2.54		0.000	
板壁 (片面)	バイリニア	1/180		1.27		0.000	

図 17 壁要素の復元力特性のモデル化

各試験体の筋違の復元力特性については、試験体③⑤⑦⑧の復元力特定から柱貫接合部・壁要素の負担分を引いたものを筋違負担分とし、圧縮筋違のみ有効として、次頁の図 18～21 のようにモデル化した。

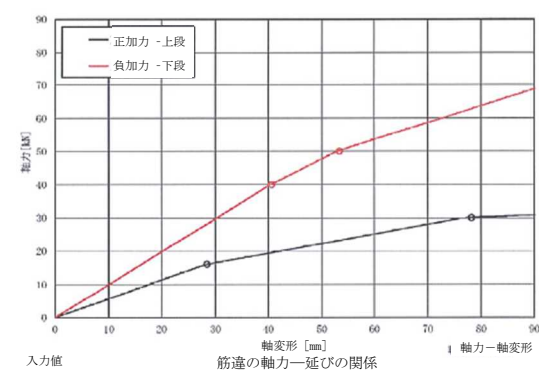
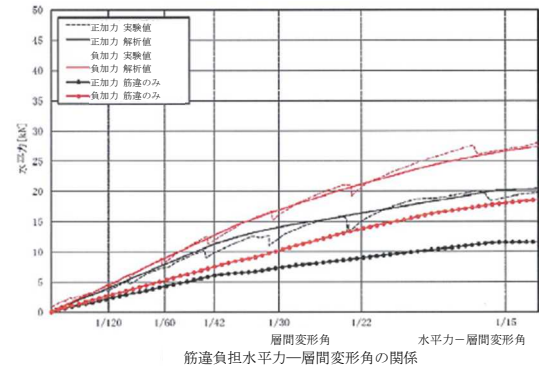
●考察

—



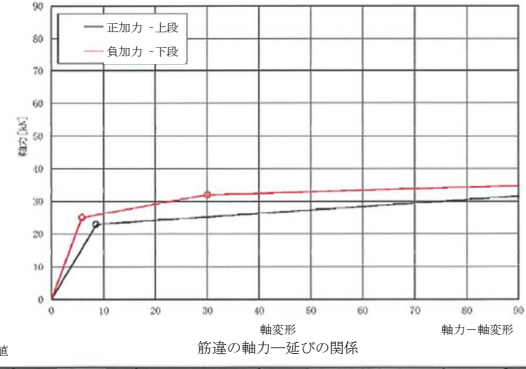
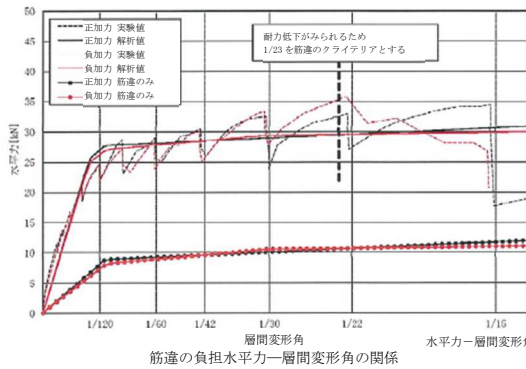
位置	断面		形状		軸力及び軸変形			低減率		備考
	b [mm]	d [mm]	B [mm]	L [mm]	N1 [kN]	$\delta 1$ [mm]	$E_o$ [kN/mm <sup>2</sup> ]	$\alpha 1$	$\alpha 2$	
上段 3202	90	14400	1690	2360	25.0	4.1	1.004	0.150		
	160	14400	1647		40.0	20.4		0.080		
下段 3201	90	14400	1690	2382	20.0	4.6	0.717	0.450		
	160	14400	1678		53.0	21.5		0.050		

図 18 筋違の復元力特性のモデル化 (③)



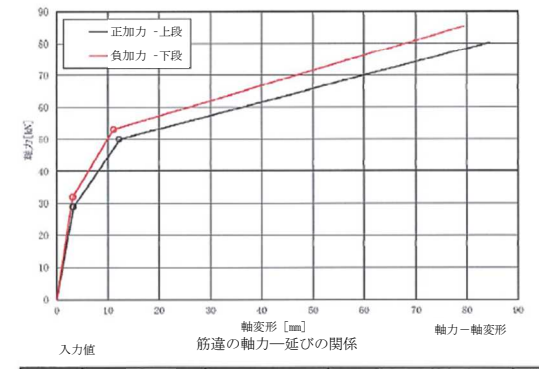
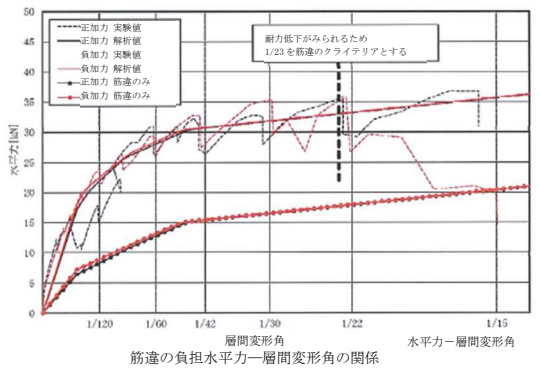
位置	断面		形状		軸力及び軸変形			低減率		備考
	b [mm]	d [mm]	B [mm]	L [mm]	N1 [kN]	$\delta 1$ [mm]	$E_o$ [kN/mm <sup>2</sup> ]	$\alpha 1$	$\alpha 2$	
上段 5202	90	14400	1690	2559	16.0	28.4	0.100	0.500		
	160	14400	1921		30.0	78.2		0.100		
下段 5201	90	14400	1690	2192	40.0	40.6	0.150	0.500		
	160	14400	1396		50.0	53.3		0.500		

図 19 筋違の復元力特性のモデル化 (⑤)



位置	断面		形状		軸力及び軸変形			低減率		備考
	b [mm]	d [mm]	B [mm]	L [mm]	N1 [kN]	$\delta 1$ [mm]	$E_o$ [kN/mm <sup>2</sup> ]	$\alpha 1$	$\alpha 2$	
上段 7202	90	14400	1690	2559	23.0	8.5	0.480	0.038		
	160	14400	1921		38.0	154.6		0.000		
下段 7201	90	14400	1690	2192	25.0	5.9	0.650	0.068		
	160	14400	1396		32.0	30.0		0.010		

図 20 筋違の復元力特性のモデル化 (⑦)



位置	断面		形状		軸力及び軸変形			低減率		備考
	b [mm]	d [mm]	B [mm]	L [mm]	N1 [kN]	$\delta 1$ [mm]	$E_o$ [kN/mm <sup>2</sup> ]	$\alpha 1$	$\alpha 2$	
上段 8202	90	14400	1690	2022	29.0	3.1	1.300	0.250		
	160	14400	1111		50.0	12.2		0.045		
下段 8201	90	14400	1690	1993	32.0	3.1	1.450	0.250		
	160	14400	1057		53.0	11.1		0.045		

図 21 筋違の復元力特性のモデル化 (⑧)