

スリット入り鋼板耐震壁に関する研究 (その1) 構造性能と評価式

吉田 直 弘*¹ 吉 野 茂*¹
今 村 輝 武*¹ 東 間 敬 造*¹

要 旨

スリット入り鋼板耐震壁は、靱性に富んだ構造特性を有すると同時に極めて単純なディテールで構成される耐震要素である。著者らは、構造実験の結果から、スリット壁の形状が構造性能に与える影響を検討した。検討結果を基に、スリット入り鋼板耐震壁の構造性能評価式を提案し、その適用範囲を示した。更に、スリット入り鋼板耐震壁を用いた架構のモデル化手法を示し、解析結果と実験結果を比較検討した。検討の結果、以下の知見を得た。

- 1) スリット入り鋼板耐震壁の剛性及び耐力は、鋼板板厚、鋼板強度の他に、柱状部幅(b)と鋼板板厚(t)の比(b/t)、スリット段数により制御可能である。また、補剛リブは鋼板の曲げねじれ座屈を防止する。
- 2) 提案した剛性及び耐力の評価式は実験結果と概ね一致した。評価式の適用範囲をb/tで与え、その上限値をb/t=15とした。
- 3) 提案した簡易モデル化手法は、実験による弾塑性時の応力変形性状を適切に模擬し、十分実用的である。

キーワード 耐震要素／スリット入り鋼板耐震壁／構造実験／評価式／モデル化

目 次

- | | |
|-------------------|---------------|
| 1. はじめに | 4. 構造性能評価式の提案 |
| 2. スリット入り鋼板耐震壁の概要 | 5. モデル化手法の検討 |
| 3. 構造実験概要 | 6. おわりに |

A STUDY ON STEEL BEARING WALL WITH SLITS (PART 1) THE EVALUATION METHOD AND STRUCTURAL CHARACTERISTICS

Naohiro YOSHIDA Shigeru YOSHINO
Terutake IMAMURA Keizo TOMA

Synopsis:

Steel Bearing Wall with Slits is an earthquake-resisting element with significant ductility and simple shape. By structural tests, authors researched the effects of the shape on the structural characteristics of the wall with slits. The present paper promotes a formulation method to evaluate the earthquake-resisting function and the application region of the Steel Bearing Wall with Slits. Furthermore, the present paper reports the structural analysis, and the below results are obtained by comparing the results of the analysis with that of structural tests:

- 1) The stiffness and the horizontal loading capability of the Steel Bearing Walls with Slits depend on the steel strength, wall thickness t , the ratio between slit-distance b and wall thickness t (b/t), the number of lines and rows of slits. And the stiffening ribs can resist the wall buckling.
- 2) The equations, which are promoted by present paper to evaluate the stiffness and capability of the Steel Bearing Wall with slits, are identical to the model test results. The suitability of the equations is defined by b/t , and its upper boundary is $b/t=15$.
- 3) The modelling and the structural analysis are suitable to simulate the elastic and plastic behavior of the Steel Bearing Wall with Slits.

* 1 本店 建築部建築技術（開発）

部材の塑性変形に期待した設計が適用される建物では、ラーメン架構以外の耐震要素の構造特性として、剛性・耐力の調整が容易であり変形能力が大きく安定した復元力特性を持つことが必要とされる。更に施工性や経済性の観点から、一般的な材料であること、力の流れが明確であること、及び現場での施工性が良いことや設計に高度な技術を必要としないことが要求される。

そこで著者らのグループと九州大学松井千秋教授は、
図-1に示すスリット入り鋼板耐震壁（以下、「スリット
壁」とする。）を共同開発した。

中央配置 片側配置 分割配置

2.1 形 状

スリット部拡大

図-3 スリットのレーザー加工

スリットにより柱列状に分割された鋼板部分を柱状部、スリット壁本体の上下及び中間部にある鋼板部分を上壁部、下壁部及び中間壁部と呼ぶ。ただし、上下壁部及び中間壁部の高さは柱状部の幅よりも大きいものとする。スリット壁本体の左右両端部に溶接された平鋼を補剛リブと呼び、最外端柱状部の曲げねじれ座屈を防止するために設けられている。

(1) 構造

(2) 施 工

スリット壁の接合方法は、ディテールが単純な高力ボルトによる取付けであり、現場での施工が容易である。梁の加工精度及び建方精度によって生じた上下の梁の位置の誤差はスリット壁接合部のボルト孔クリアランス内で処理できるため、従来の建物と同様の施工精度で施工が可能となる。スリット壁は全体の厚さが薄く従来の間仕切壁の中に挟み込んで使用することが可能なため特別な仕上げが不要である。両側の間仕切壁の厚さを含めた壁厚は250～300mm程度となり、従来の耐震要素を組み込んだ壁に比べ部屋面積を有効に活用できる。

3. 構造実験概要

3.1 実験概要

構造実験^{1),2),3),4)}を3つのシリーズについて行った。各シリーズの実験の目的を以下に示す。

Mシリーズ：補剛リブの効果を検討。

SWシリーズ：スリットの段数及びb/tとスリット壁の剛性及び耐力の関係を検討。

Fシリーズ：スリット壁が架構に設置された場合の性状及び架構による拘束効果の検討。

M, SWシリーズは1/3～1/4の縮小モデルによるスリット壁本体のみの単体実験であり、FシリーズはSWシリーズのスリット壁本体を架構に設置した実験である。

表-1に試験体の一覧を示す。試験体の形状図及び各記号については図-1による。試験体数は単体実験と架構実験の合計31体である。実験変数は、単体実験ではb/t, スリットの段数(m), 及び補剛リブの有無とし、架構実験では上側梁せい(梁の剛性)を実験変数とした。Mシリーズの補剛リブはFB-30×590×4.5mm, SWシリーズの補剛リブはFB-50×790×4.5mmである。Fシリーズの架構は門型とし、芯寸法で1600×850mm, 柱はH-100×100×6×8mm, 基礎梁はH-200×200×8×12, 補剛リブはFB-50×790×4.5mmである。表-1に各シリーズにおける鋼材の機械的性質(スリット壁)を示す。

3.2 実験結果概要

図-4及び図-5に単体実験による水平力(Q)-部材角(R)関係を示す。

図-4はb/t(=10,15,20)を変数として段数m=2, 補剛リブ有りの試験体のスケルトンを比較したものである。b/t=10及びb/t=15では安定したスケルトンを示すが、b/t=20は最大耐力後の劣化が見られる。最大耐力とb/tの関係は概ね比例の関係にあり、初期剛性はb/t=10に対し、b/t=15のとき約4倍、b/t=20のとき約9倍となった。

図-5は段数m(=1,2,3)を変数として幅厚比b/t=10, 補剛リブ有りの試験体の履歴を比較したものである。m=1～3の範囲では段数によらず安定した履歴を示す。最大耐力と段数の関係は概ね比例の関係にあり、初期剛性はm=1に対し、m=2のとき約4倍、m=3のとき約10倍となった。

次に図-6に補剛リブの有無を変数とした水平力(Q)-部材角(R)関係のグラフを示す。同一形状の試験体では補剛リブの有無によって初期剛性は概ね同じ値を示すが、補剛リブのある試験体では最大耐力が高く、最大耐力後の耐力劣化も小さい。

4. 構造性能評価式の提案

4.1 応力性状

スリット壁の応力性状および抵抗機構を把握するために架構付スリット壁の有限要素法による2次元弾性解析

表-1 試験体一覧

Mシリーズ ^{*1}		SWシリーズ			Fシリーズ	
b/t	補剛リブ 有 無	補剛リブ有 段数(m)			補剛リブ 有	
	段数(m)=1	1	2	3	梁断面 (a) ^{*2} (b) ^{*3}	段数(m)
55	○	30	●(335) ^{*4}			
37	○	25	●(373)			
27	○ ○	20	●(424) ●(168)		b/t	2 2
18	●	15	●(469) ●(202)		15	◎(202) ◎ (202)
13	● ○	10	●(512) ●(235) ●(142)		10	◎(235) ◎ (235)

	Mシリーズ	SWシリーズ	Fシリーズ
試験体形状 (スリット壁)			
W(mm)	500	800	800
H(mm)	800	800	800
t(mm)	4.5	4.5	4.5
鋼材の機械的性質 (スリット壁)			
σ_s (t/cm ²)	3.24	3.03	2.96
σ_u (t/cm ²)	4.56	3.90	4.68

*1 柱状部高 h=360(mm)
 *2 梁: H-100×100×6×8
 *3 梁: H-148×100×6×9
 *4 [記号の意味]
 ○: 単調載荷 ◎: 繰返し載荷
 ●: 単調載荷と繰返し載荷の両方
 () 内の数値は柱状部高 h'を示す

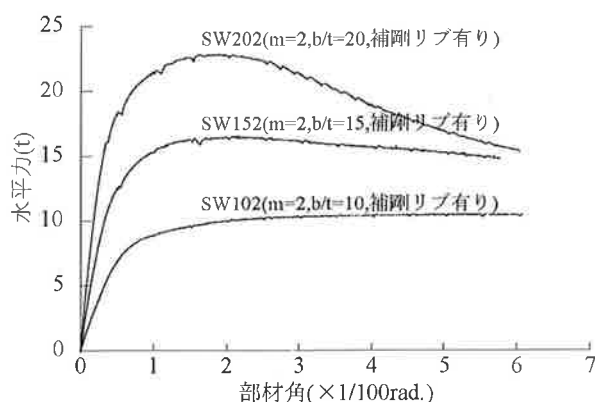


図-4 b/tによる比較

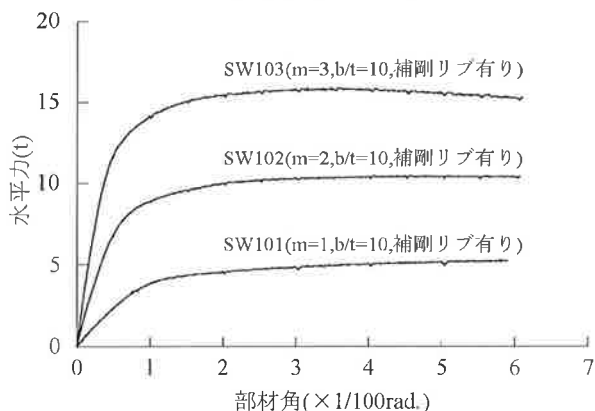


図-5 段数mによる比較

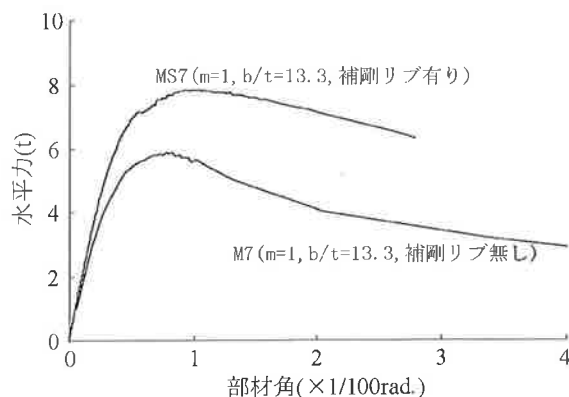


図-6 補剛リブの有無による比較

を行った。解析ではスリット壁を2次元の平面応力要素でモデル化し、上梁芯位置に水平力を作用させた。図-7に解析モデル及び解析結果の応力分布コンタ図（水平方向応力度を色化）を示す。柱状部の両端部には曲げによる抵抗のモードが明確に表れ、水平力は柱状部の曲げ抵抗により負担していることがわかる。それぞれの柱状部が負担する水平力はほぼ等しく、全柱状部が一様に水平力を負担している。スリット壁の両端部では壁部のせん断抵抗による応力が梁下端付近に生じている。従って、スリット壁の水平剛性は柱状部の曲げ剛性の総和により、せん断耐力は柱状部の負担するせん断力の総和により評価可能と考えられる。更に、3.2 実験結果概要を考慮しスリット壁の剛性及び耐力の評価式を以下に提案する。

4.2 初期剛性の評価式

スリット壁の初期剛性 K_{sw} を、柱状部の剛性と上下壁部と中間壁部の直列剛性とし、式[1]とした。柱状部の剛性はせん断変形と曲げ変形を考慮し、上下壁部と中間壁部は曲げ変形が極めて小さいため、せん断変形のみ考慮した。補剛リブの剛性は、実験結果からスリット壁の初期剛性に与える影響の小さいことが確認されているので考慮しないこととした。柱状部の曲げ剛性は柱状部端部の局部応力による固定度の低下を評価し $\beta=1.2$ で補正した。

$$K_{sw} = \frac{1}{\frac{1}{K_{s1}} + \frac{m}{K_c} + \frac{(m-1)}{K_{s2}}} \quad \text{-----[1]}$$

K_{s1} : 上下壁部のせん断剛性(t/cm)で式[2]とする
 K_{s2} : 中間壁部のせん断剛性(t/cm)で式[2]とする
 K_c : 柱状部の曲げ剛性(t/cm)で式[3]とする
 m : スリット段数

$$K_{s1}, K_{s2} = \frac{G \cdot t \cdot W}{\kappa_2 \cdot h} \quad \text{-----[2]}$$

G : 鋼材のせん断弾性係数(t/cm²)
 t : スリット壁の鋼板厚さ(cm)
 W : スリット壁長さ(cm)
 κ_2 : 壁部せん断形状係数(=1.2)
 h : 上下壁部または中間壁部の高さの合計(cm)

$$K_c = \frac{n \cdot K_{cb} \cdot K_{cs}}{K_{cb} + K_{cs}} \quad \text{-----[3]}$$

n : 柱状部本数

$$K_{cs} : \text{柱状部1本のせん断剛性(t/cm)} = \frac{G \cdot t \cdot b}{\kappa_1 \cdot h'}$$

h' : 柱状部1段の高さ(cm)
 κ_1 : 柱状部せん断形状係数(=1.2)

$$K_{cb} : \text{柱状部1本の曲げ剛性(t/cm)} = \frac{12 \cdot E \cdot I}{(h' + \beta \cdot b)^3}$$

β : 補正係数($\beta=1.2$)
 I : 柱状部1本の断面二次モーメント(cm⁴)
 E : 鋼材のヤング係数(t/cm²)
 b : 柱状部幅(cm)

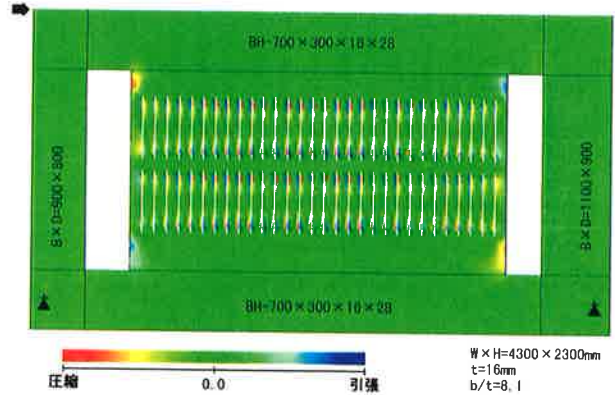


図-7 スリット壁の応力性状

4.3 終局せん断耐力の評価式

スリット壁の終局せん断耐力 ${}_uQ_{sw}$ は、柱状部の終局せん断耐力の総和とし、式[4]とした。柱状部では両端が全塑性曲げ耐力に達するものとし、その時点での負担せん断力の総和をスリット壁の終局せん断耐力としている。

$${}_uQ_{sw} = n \times \frac{2 \times M_u}{h'} \quad \text{-----[4]}$$

M_u : 柱状部1本の終局曲げ耐力(t·cm)= $Z_p \cdot \sigma_y$

Z_p : 柱状部1本の塑性断面係数(cm³)
 σ_y : 鋼材の降伏応力度(t/cm²)

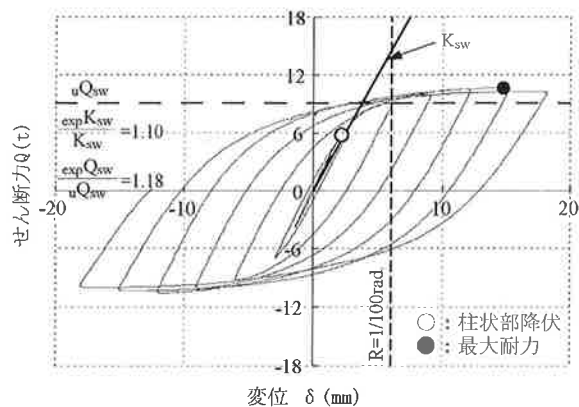
4.4 提案式による算定結果と実験結果の比較

図-8にSWシリーズ及びFシリーズの試験体の荷重－変形関係と評価式による初期剛性及び終局せん断耐力を比較して示す。Fシリーズの荷重－変形関係は、鉄骨架構を含む全体から分離したスリット壁部の負担せん断力を示している。●は実験最大耐力 ${}_{exp}Q_{sw}$ を示し、○は柱状部が最初に降伏歪みに達した耐力 ${}_{exp}Q_c$ を示している。

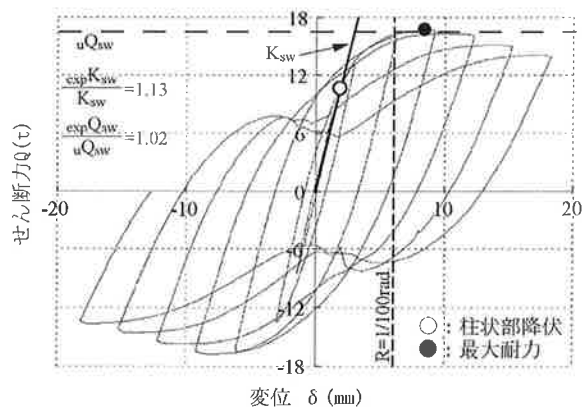
初期剛性については、実験による初期剛性 ${}_{exp}K_{sw}$ （最大耐力の1/3までの等価剛性）と評価式による剛性 K_{sw} の比は ${}_{exp}K_{sw}/K_{sw}=0.94 \sim 1.13$ となり、式[1]によりスリット壁の初期剛性が適切に評価できる。最大耐力について設計上の使用範囲である $R=1/100$ rad.時の耐力で比較すると ${}_{exp}Q_{sw}/{}_uQ_{sw}=1.02 \sim 1.32$ となり、評価式と概ね一致し、式[4]によりスリット壁の終局せん断耐力を適切に評価できると考えられる。

4.5 適用範囲

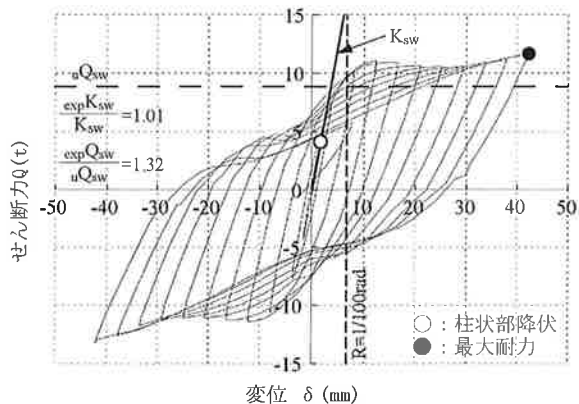
3. 構造実験概要で示した試験体の実験結果を、 b/t と実験による最大せん断耐力 ${}_{exp}Q_{sw}$ と評価式による終局せん断耐力 ${}_uQ_{sw}$ の比 $[{}_{exp}Q_{sw}/{}_uQ_{sw}]$ で整理した結果を図-9に示す。また、 b/t と実験による初期剛性 ${}_{exp}K_{sw}$ と評価式による剛性 K_{sw} との比 $[{}_{exp}K_{sw}/K_{sw}]$ で整理した結果を図-10に示す。 $b/t \leq 15$ の範囲では全てのスリット段数で $[{}_{exp}Q_{sw}/{}_uQ_{sw}]$ 及び $[{}_{exp}K_{sw}/K_{sw}]$ の値が1.0を上回ることがわかった。以上の結果からスリット壁の剛性及び耐力評価式の適用範囲を b/t で与えるものとし、その上限値を $b/t=15$ とした。



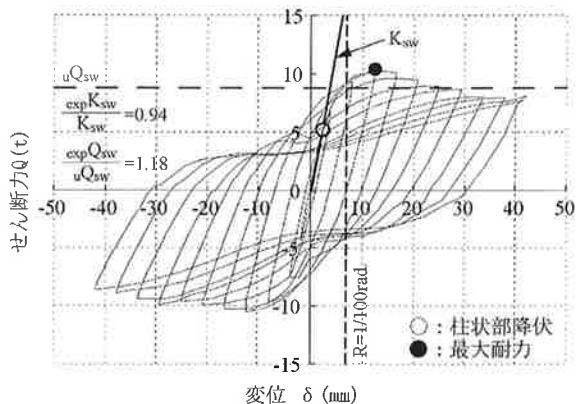
SWシリーズ SWC102 (b/t=10, m=2, 繰返载荷)



SWシリーズ SWC152 (b/t=15, m=2, 繰返载荷)



Fシリーズ F100W102
(b/t=10, m=2, 梁:H-100×100, 繰返载荷)



Fシリーズ F148W102
(b/t=10, m=2, 梁:H-148×100, 繰返载荷)

図-8 実験結果と提案式による初期剛性と終局せん断耐力の比較

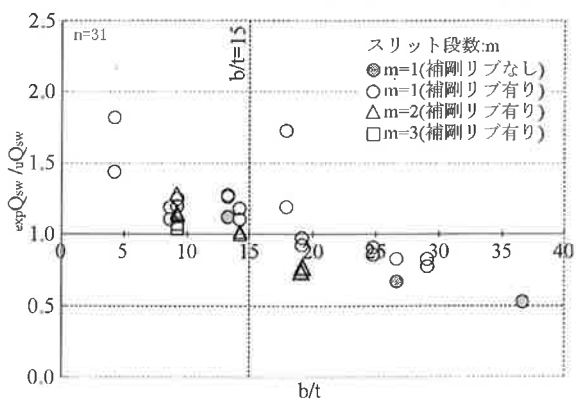


図-9 $[exp Q_{sw} / u Q_{sw}] - [b/t]$ 関係

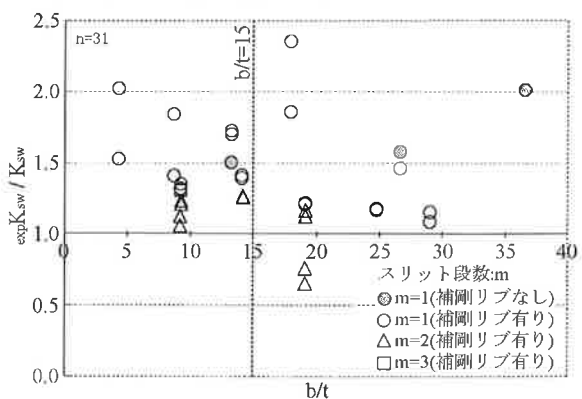


図-10 $[exp K_{sw} / K_{sw}] - [b/t]$ 関係

5. モデル化手法の提案

5.1 概要

スリット壁を簡易にモデル化することは、実務的な構造計算におけるスリット壁の取扱いの自由度を増す。スリット壁を簡易な線材へモデル化する手法を提案し、その結果を架構付きスリット壁の実験結果と比較することでモデル化の妥当性を確認した。

5.2 スリット壁のモデル化

解析モデルを図-11に示す。架構及びスリット壁は図-8に示した実験結果のF100W102と同一の断面とした。スリット壁は図-11に示すように、その設置位置の頂点を結

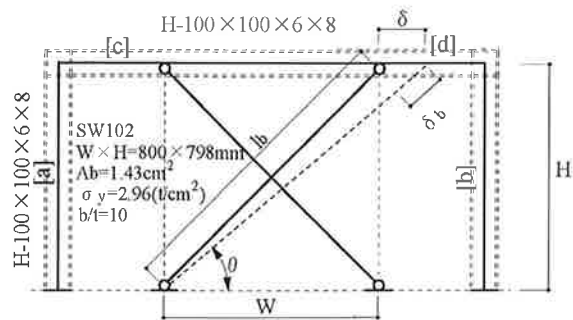


図-11 解析モデル

ぶX型ブレースにモデル化し、梁にピン接合するものとした。スリット壁の水平剛性は式[5]により水平剛性が等価な2本のブレースに置換した。解析は2次元の弾塑性解析で行い、スリット壁の復元力特性は式[1]による剛性 K_{sw} と式[4]による終局せん断耐力 uQ_{sw} によるBi-Linear型とし、この復元力特性をそれぞれのブレース材に与えた。

$$A_b = \frac{K_{sw} \sqrt{(H^2 + W^2)^3}}{2E \cdot W^2} \text{-----[5]}$$

A_b : ブレース 1 本当たりの軸断面積(cm^2)
 K_{sw} : スリット壁の剛性で式[1]による(t/cm)
 E : 鋼材のヤング係数(t/cm^2)
 H : モデル化上の構造階高(cm)
 W : スリット入り鋼板耐震壁の長さ(cm)

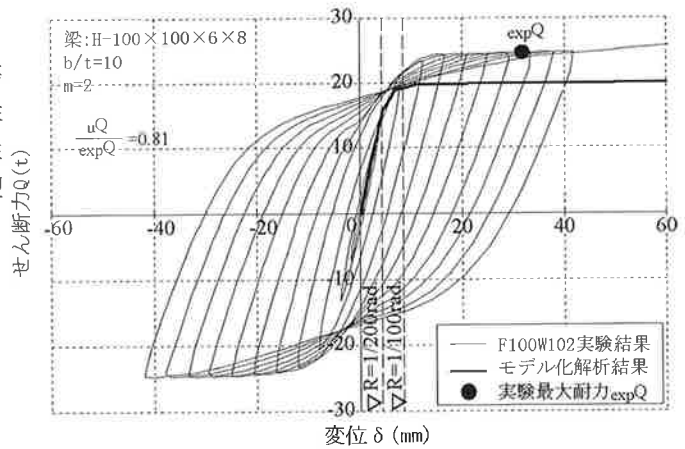


図-12 実験結果と解析結果の比較

5.3 モデル化手法の妥当性の検討

図-12に実験結果(F100W102)と解析結果それぞれのスリット壁を含む架構全体の荷重-変形関係を示した。

解析では層間変形角 $R=0.48/100\text{rad}$ 付近でブレースが降伏した後、柱脚の降伏により層間変形角 $R=1.33/100\text{rad}$ で最大せん断耐力に達している。解析の最大耐力 Q は実験値の最大耐力 $expQ$ の81%になっているが、この差は解析に鋼材の歪み硬化を考慮していないためと考えられる。

表-2に層間変形角 $R=1/200\text{rad}$ (弾性時) 及び $R=1/100\text{rad}$ (設計限界、塑性時)の柱梁部材の応力をまとめた。壁端部位置での梁の曲げモーメントを除けば、部材に発生する応力の解析結果に対する実験結果の比 $[exp/cal]$ は、弾性時及び塑性時で0.88~1.10の範囲にあり両者は、良く一致していることがわかる。壁端部位置での梁の曲げモーメントの $[exp/cal]$ が大きい、他の応力と比べれば相対的に極めて小さい値である。

以上より、提案したモデル化手法は架構付スリット壁の弾塑性時の応力変形性状を適切に模擬しており、十分に実用的である。

6. おわりに

本報では、初めにスリット壁の概要について述べ、その特徴を説明した。次に、実験結果よりスリット壁の剛性及び耐力と b/t 及び段数との関係、補剛リブの効果について考察を行い、スリット壁の剛性及び耐力の評価式を提案した。評価式と実験による結果は概ね一致し、剛性及び耐力が提案式により評価できることを確認し、その適用範囲の上限値を $b/t=15$ 以下と定めた。更に、スリット壁を簡易にモデル化する手法について、実験結果とモデル化による解析結果を比較し、十分に実用的であることを説明した。

今後、スリット壁の特徴である優れたエネルギー吸収能力と安定した履歴性状を活かし、建物架構内に耐震要素としてスリット壁を組み込み、建物の応答層間変位の抑制と地震入力の低減を目指し検討を行う考えです。

表-2 実験結果と解析結果の発生応力比較

項目	単位	実験 [exp.]	解析 [cal.]	[exp.] [cal.]	実験 [exp.]	解析 [cal.]	[exp.] [cal.]
層間変形角 R	(rad)	弾性時($R=1/200\text{rad}$)			塑性時($R=1/100\text{rad}$)		
変形量 δ	(cm)	0.40	0.41	0.99	0.70	0.68	1.02
載加荷重 P	(t)	15.00	15.00	1.00	19.26	19.00	1.01
全体剛性 ΣK^{-1}	(t/cm)	37.50	37.00	1.01	27.61	27.74	1.00
フレーム負担せん断力 Q_f	(t)	5.82	6.42	0.91	9.88	9.77	1.01
スリット壁負担せん断力 Q_w	(t)	9.18	8.58	1.07	9.38	9.23	1.02
加力側柱 [a]	柱頭曲げモーメント (tm)	1.28	1.22	1.05	1.91	1.80	1.07
	柱脚曲げモーメント (tm)	1.41	1.61	0.88	2.28	2.38	0.96
	せん断 (t)	3.00	3.32	0.90	4.94	4.91	1.01
逆側柱 [b]	柱頭曲げモーメント (tm)	1.17	1.14	1.03	1.80	1.75	1.02
	柱脚曲げモーメント (tm)	1.35	1.50	0.90	2.40	2.38	1.01
	せん断 (t)	2.82	3.11	0.91	4.94	4.86	1.02
加力側梁 [c]	梁端曲げモーメント (tm)	1.25	1.22	1.02	1.85	1.80	1.03
	壁端曲げモーメント (tm)	0.26	0.33	0.77	0.08	0.03	3.25
	せん断 (t)	3.72	3.84	0.97	4.84	4.55	1.06
逆側梁 [d]	梁端曲げモーメント (tm)	1.19	1.14	1.04	1.93	1.75	1.10
	壁端曲げモーメント (tm)	0.21	0.33	0.64	0.04	0.07	0.65
	せん断 (t)	3.50	3.65	0.96	4.92	4.55	1.08

謝辞：本研究は九州大学工学部 松井研究室との共同研究であり、同大学大学院 松井千秋教授ならびに同研究室の方々にも多大なご協力を頂きました。深く感謝致します。

参考文献

- 1) 日高桃子, 松井千秋, 長野卓: スリット入り鋼板耐震壁の開発, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp763-764, 1997.9.
- 2) 日高桃子, 松井千秋, 長野卓: スリット入り鋼板耐震壁の開発 (その1~その2), 日本建築学会九州支部研究報告, 第36号, pp389-396, 1997.3.
- 3) 日高桃子, 松井千秋, 貞包佳秀, 畑戸龍夫, 今村輝武: スリット入り鋼板耐震壁の弾塑性性状について-骨組の中での挙動-, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp865-866, 1998.9.
- 4) 日高桃子, 松井千秋, 今村輝武, 畑戸龍夫: スリット入り鋼板耐震壁の弾塑性性状について, 日本建築学会構造系論文集, 第519号, pp111-117, 1999.5.