

論文

[2091] 高強度鉄筋コンクリート耐震壁の強度と変形能力に関する
実験的研究

正会員 ○松 本 和 行 (横浜国立大学大学院)

正会員 壁谷澤 寿海 (横浜国立大学工学部)

1. 序論

超高層鉄筋コンクリート(RC)造建物の開発にともなって、高強度材料を使用したRC建物が徐々に建られるようになり、実用化を前提とした高強度RC造の開発研究が建設省総合プロジェクトとして行われている。

本研究は、超高層RC造建物の耐震要素として純フレーム構造に連層耐震壁を組込んだ構造形式(耐震壁フレーム構造)の設計を念頭において、耐震壁下層部分を取り出した試験体での静的加力実験を行ったものである。高強度鉄筋および高強度コンクリートを用いた曲げ降伏型耐震壁の典型的な破壊性状あるいは復元力特性等を明らかにすることが目的である。

2. 実験概要

試験体および使用材料：試験体一覧を表1に、試験体配筋図を図1に示す。試験体は、1/4スケールの1層1スパンの耐震壁2体(NW-1、NW-2)で、水平断面の寸法および配筋は共通で、スパン長150cm、柱寸法20×20cm、壁厚8cmとした。壁内法高さは、300cm(NW-1)、200cm(NW-2)とし、せん断スパン比をパラメータとした。

素材試験結果を表2に、各々の σ - ε 関係を図2に示す。使用材料の強度は、鉄筋は規格降伏強度を8000kg/cm²、コンクリートの設計基準圧縮強度800kg/cm²を基本として、側柱の帯筋(スパイラル)のみ、降伏強度13000kg/cm²とした。実際の材料強度は、コンクリートで目標をやや上回り、また壁筋に用いた鉄筋(SD80)の降伏強度も規格をかなり上回っていた。また、コンクリートの水セメント比は、31%として、混和材として高性能減水剤を使用した。

加力方法：加力は、両端に設置された2台の100tonオイルジャッキにより、6m×6mスパンで40階の建物の1階の鉛直荷重時軸力に相当する一定軸力を与えて、これを維持し、水平方向に50tonアクチュエーターおよび2台の75tonオイルジャッキを制御することにより繰返し加力を行った。ここで、一定軸力(合計N=180ton)は、曲げ終局強度時の圧縮反力を側柱コアコンクリートで負担するとして算定した平均圧縮応力度(= (N + A_w σ_y + A_g σ_y) / A_{core})がF_c(=800kg/cm²)にほぼ等しくなるレベルとした。また、試験体上部梁下位置を水平に加力する

表1 試験体一覧

試験体名	側 柱				壁 板		
	形 状 bxD(mm)	主 筋 SD80 (pg%)	帯 筋 SD130 spiral (pw%)	副帯筋* SD80 閉鎖tie (pw%)	内りの 高さh _w (mm) [M/Q1w]	壁厚t _w 内りの 長さl _w (mm)	壁 筋 SD80 (ps%)
NW-1	200 x	12-D10	Spiral D6 Ø40	2-D6 Ø40	3000[2.0]	80 x	2-D6 Ø150
NW-2	200	(2.14)	(0.70)	(0.70)	2000[1.33]	1300	(0.53)

* 0 ≤ h ≤ 1500 (NW-1), 0 ≤ h ≤ 1000 (NW-2)

片持ち梁型としたので、シアスパン比 ($M/Q\ell_w$, ℓ_w : 柱芯芯) は、NW-1 では、2.0、NW-2 では、1.33 となる。水平加力は、脚部からの変形角が 2.5, 5.0, 7.5, 10.0, 15.0, 20.0 ($\times 10^{-3}$) で各 2 回繰返す変位漸増型の加力とした。

表2 素材試験結果

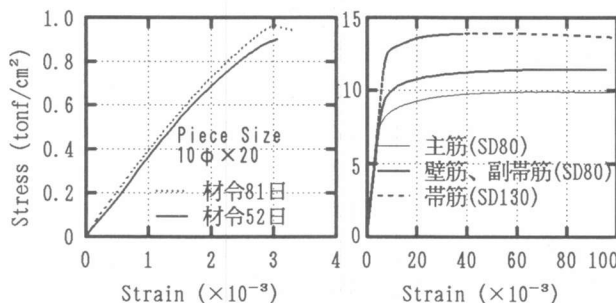
(a) コンクリート

試験体	材令 [日]	圧縮強度 [kg/cm ²]	降伏歪 [$\times 10^{-6}$]	ヤング係数 [$\times 10^5$ kg/cm ²]	割裂強度 [kg/cm ²]
NW-1	52	894 (10 ϕ x20)	3033	3.63	46.79
		881 (15 ϕ x30)	2989	3.80	
NW-2	81	955 (10 ϕ x20)	2960	3.78	52.67

(b) 鉄筋

補強筋	径 (規格)	降伏強度 [kg/cm ²]	降伏歪 [$\times 10^{-6}$]	引張強度 [kg/cm ²]	ヤング係数 [$\times 10^5$ kg/cm ²]
柱主筋	D10 (SD80)	7914	4150	10163	1.9
壁筋、柱副帯筋	D6 (SD80)	10216	6210	12113	1.7
柱帯筋 (Spiral)	D6 (SD130)	12876	7088	14006	1.8

鉄筋の降伏歪は、0.2% オフセット時の歪である。



(a) コンクリート

(b) 鉄筋

図2 σ - ϵ 関係

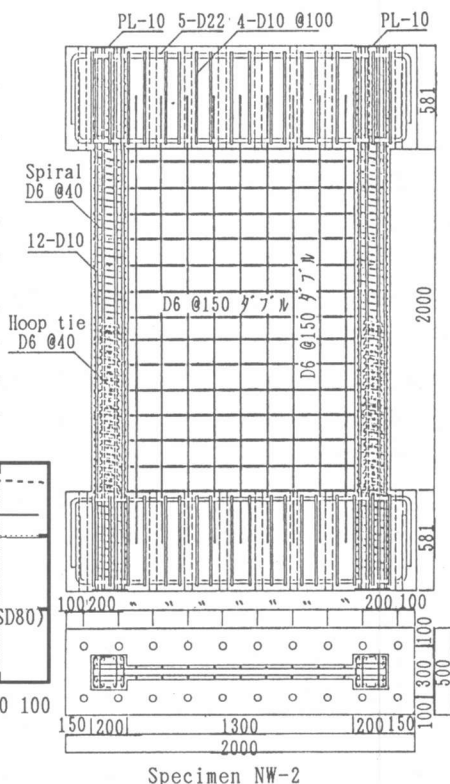


図1 試験体配筋図

測定方法：測定状況図を図3に示す。

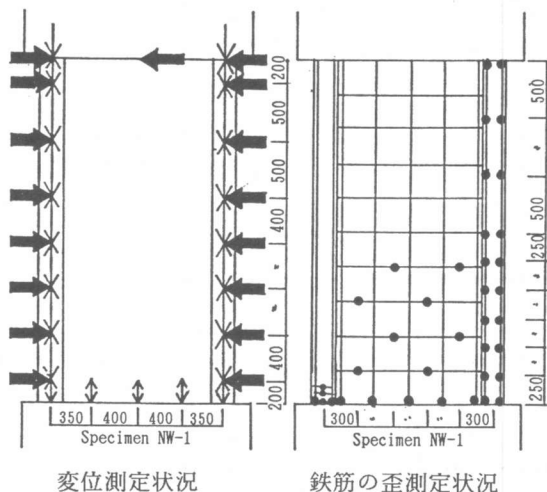
試験体上部（加力点高さ）での全体の水平変形、両側柱の鉛直変位、試験体を高さ方向に NW-1 では 8 分割、NW-2 では 6 分割した点の水平変位および柱の軸方向変形、両柱脚、壁脚にも軸方向変形を測定した。鉄筋の歪は、危険断面付近を中心に柱筋、壁筋、帯筋等で測定した。

3. 実験結果

破壊性状：終局時の破壊状況を図4

に示す。両試験体ともに変形部材角 $R=1/400$ の繰返し加力では、引張り

側の側柱、壁脚部に曲げ亀裂が生じ、更に曲げせん断、せん断亀裂が、前後して生じた。変形部材角 $R=1/133$ までに曲げ、せん断亀裂が密に発生した。その後、試験体 NW-1 では、 $R=1/100$



変位測定状況

鉄筋の歪測定状況

図3 測定状況図

程度で圧縮側、側柱に僅かにコンクリートの剥離が見られた。

$R=1/50$ の繰返しにおいてカバーコンクリートの剥落したが、

耐力の低下は見られない。変形部材

角 $R=1/40$ 程度で引張側主筋（2、3本）、壁縦筋（3、4本）が相次いで破断し、大幅に強度が低下した。

終局まで圧縮側の側柱はカバーコンクリートの剥離（ $R=1/100\sim 1/67$ ）が見られる程度で健全であった。引張り側の側柱は鉄筋の破断および除荷時の圧縮軸力によって、コアコンクリートまでかなり破砕した。また引張り側の開きは壁脚および柱脚から30 cm程度上のひび割れに集中していた。試験体NW-2では、変形部材角 $R=1/100$ の繰返しにおいて、圧縮側カバーコンクリートの圧壊等が見られず、NW-1よりも柱の破壊程度は軽微であった。これは、いずれも平面応力場（コンクリート圧縮ストラットの広がり）の違いによるものと考えられる。変形部材角 $R=1/67$ のピーク時において壁板のコンクリート（側柱との間、壁脚から40～50cm上部）に圧壊の兆しが見られ、直後に 40° 程度方向に大きな斜せん断ひび割れが貫通してせん断補強筋が破断し、同時に壁板が圧壊して、耐力が低下した。柱は両側とも健全であった。

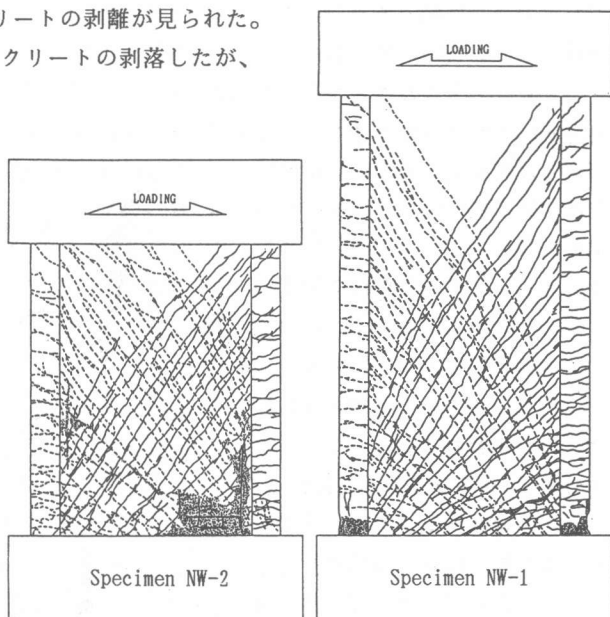


図4 終局時の破壊状況

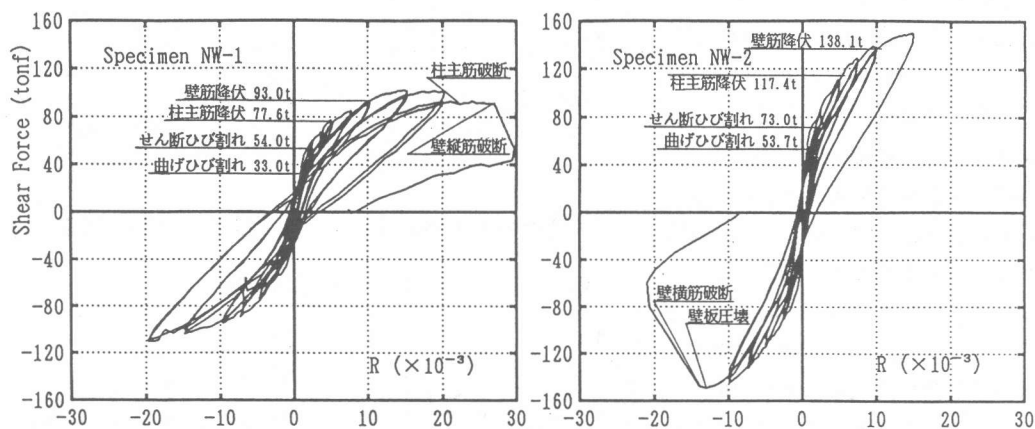


図5 せん断力と頂部水平変位の関係

復元力特性：せん断力と頂部水平変位の関係を図5に示す。NW-1では、変形部材角 $R=1/50$ の繰返しまで、耐力低下の少ない安定した曲げ降伏型の復元力特性が得られた。ただし、縦筋の降伏はかなり大きな変形角（ $1/67$ ）まで起こらないので、エネルギー吸収能力の少ない復元力特

性であるのが特徴的である。NW-2では、変形部材角 $R=1/100$ の繰返しまでは、NW-1とほぼ同様な復元力特性が得られた。しかし、同じ変形角でのせん断力は、NW-1の1.5倍よりは低い。NW-2もまたエネルギー吸収能力の少ない復元力特性である。

軸方向変形：ベースモーメントと脚柱（高さ20cm）の軸方向歪の関係を図6示す。両試験体ともに安定した履歴を示した。圧縮側軸方向歪の絶対値は、NW-1では、およそ0.8%、NW-2では、0.5%程度で、NW-2の圧縮側軸方向歪が進んでいないことがわかる。このことは、破壊状態とも対応しており、壁板が斜せん断力として軸力を負担したと思われる。

曲率分布：曲率は高さ方向に分割（NW-1は8分割、NW-2は6分割）して柱軸方向変形を測定して、各ブロックから算定されている。曲率分布を図7示す。両試験体とも部材角 $R=\pm 1/100$ 程度には、下層から上層にかけてなだらかに曲率が減少しているが、次第に下層部に変形が集中する。シアスパン比の相違による曲率分布の違いは見らない。

柱脚および壁脚部変形：脚部20cm最下区間の変位計における軸方向歪状況を図8-(a)に示す。変形部材角 $R=1/200\sim 1/67$ においてNW-1とNW-2は同様な歪を示して、両試験体ともに各加力時を通じて平面保持が保たれていると思われる。

鉄筋の歪状況：歪ゲージにより測定された危険断面の歪分布を図8-(b)に示す。引張り側において柱は、NW-1は $R=1/200$ 、NW-2は $R=1/133$ で最初に降伏し、 $R=1/100$ には、両試験体ともほとんどが降伏していた。壁縦筋は、 $R=1/100$ で2本程降伏し、 $R=1/67$ には、ほとんどが降伏した。また壁横補強筋は、加力終了後もNW-1では降伏せず、NW-2では、 $1/2$ が降伏した。

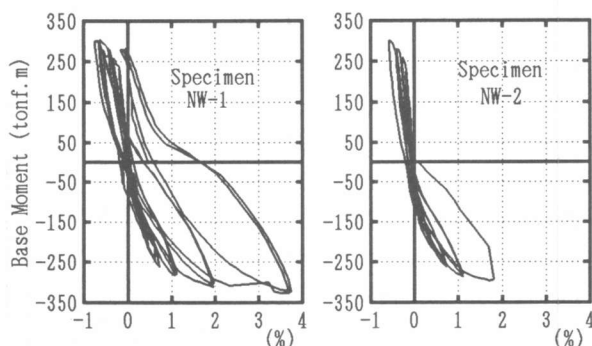


図6 ベースモーメントと脚柱の軸方向歪の関係

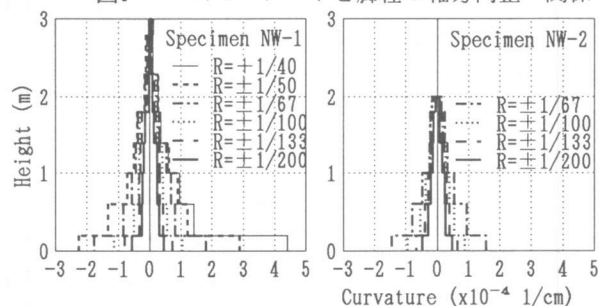


図7 曲率分布

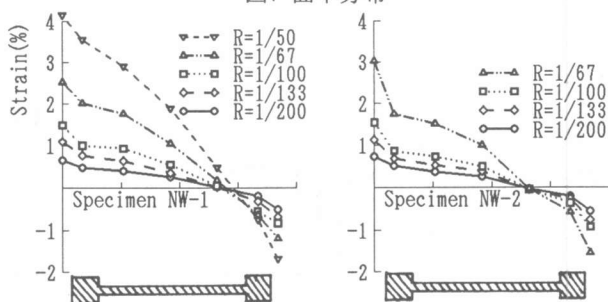


図8-(a) 軸方向歪状況

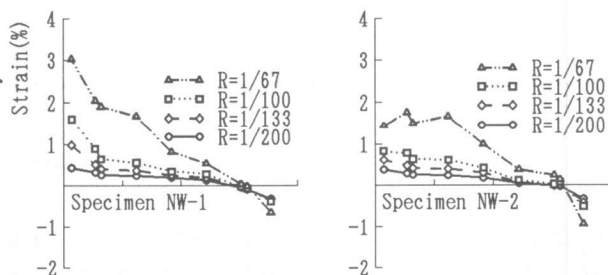


図8-(b) 危険断面の歪分布

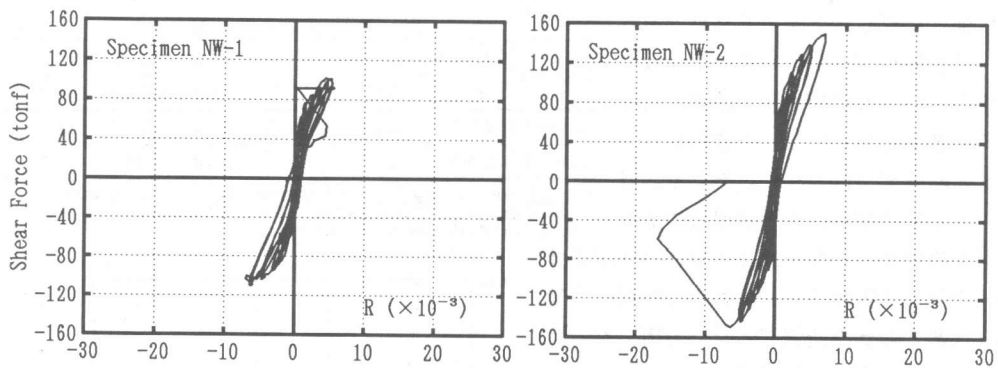


図9 セン断力とせん断変形の関係

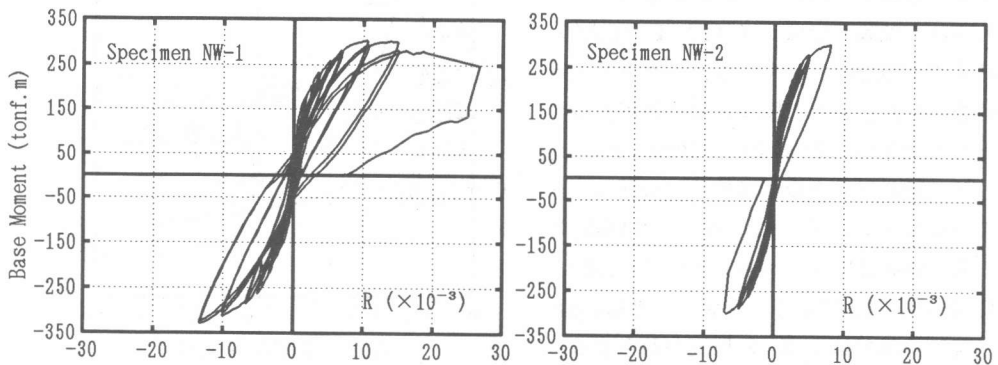


図10 ベースモーメントと曲げ変形の関係

曲げ変形とせん断変形：曲げ変形およびせん断変形は、高さ方向に分割し測定した側柱伸縮量から、平面保持を仮定して各区間での平均曲率を求め、これにより生ずる水平変位の和を曲げ変形とし、せん断変形は全体の水平変形から曲げ変形を除いたものとする。曲げ変形、せん断変形の履歴として、壁脚モーメントと曲げ変形の関係を図9 に、せん断力とせん断変形の関係を図10に示す。また、曲げ変形とせん断変形の割合を図11に示す。変形部材角ごと曲げ変形の割合は、NW-1 は70%、NW-2 は50%で、ほとんど変化は見られない。同じモーメントでの曲げ変形はNW-1 では、NW-2 の1.5倍程度であり、弾性論に対応している。それに対して同じせん断レベルでのせん断変形は、NW-1 の方が大きく、検討が必要である。

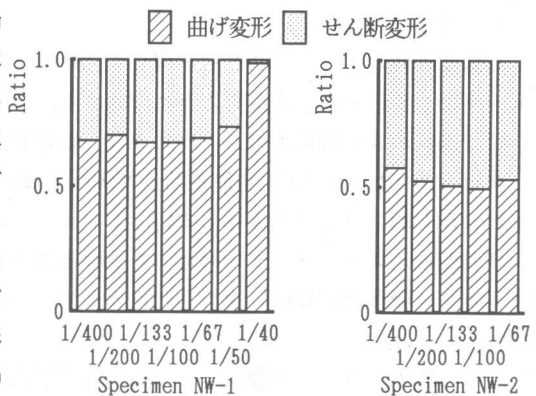


図11 曲げ変形とせん断変形の割合

4. 実験結果の検討

試験体の曲げ強度の計算値を実験値と比較してを表3 に示す。計算値に対する実験値の比率は、降伏モーメント(M_y)では、0.97~0.98とほぼ一致しているが、終局モーメントでは、1.17 (NW-1) ~1.08 (NW-2) で、NW-1 で特に大きく上回る。これは降伏後の鉄筋強度が

降伏強度に対して上昇するためである。

試験体NW-2は降伏後に壁板の圧壊およびせん断補強筋の破断によるせん断破壊が生じて、この変形レベルのせん断強度が得られた。そこで、既往のせん断強度算定式を適用して実験結果を検討する。算定式は、現行の2次設計用の設計式(実験式)^[1]および終局強度型指針(案)のせん断強度式^[2]を用いた。ただし、指針(案)の算定式では、コンクリート強度の有効係数は、 $\nu=[0.7-\sigma_b/2000]$ で与えられ、試験体では $\nu=0.22$ となって大幅に低下するので、これをパラメータとして計算値を示した。また、簡単のため等価壁長さはともに全せい($\ell_{wa}=\ell_{wb}=170\text{cm}$)とした。

せん断終局強度の計算値とせん断スパン比の関係を図12に示した。同図には略算式による曲げ終局強度(M_u)から、高さ(H)を除いた値(Q_{mu})も示している。NW-2では、指針(案)の式では $\nu=0.45$ 程度が適合する。

せん断破壊としては比較的大きな変形レベル(1/67)で生じたものであり、この値には変形レベルによるコンクリート強度有効係数の低下も含まれることに注意する必要がある。

5. まとめ

高強度鉄筋およびコンクリート用いた曲げ降伏型耐震壁の静加力実験をせん断スパン比をパラメータとして行った。結果を以下に要約する。

- (1) 曲げ降伏のせん断応力のレベルにより、靱性および破壊モードが異なる復元力特性が得られた。NW-1では $R=1/40$ で主筋破断、NW-2は $R=1/67$ で壁板の圧壊により脆性的な破壊が生じた。しかし軸力は十分に保持し安定していた。
- (2) 高強度鉄筋コンクリートで高軸力を受ける耐震壁では、残留変形の少ないS字型の比較的履歴エネルギー吸収能力の低い復元力特性となり、部材のモデル化あるいは設計でこれを考慮する必要がある。
- (3) 曲げ強度は、既往の略算式による値にはほぼ対応した。
- (4) せん断強度は、既往の設計式では過小評価する。コンクリート圧縮強度の有効係数は、高強度コンクリートの場合、設計式で仮定しているほどには大きくは低下しないと考えられる。

[謝辞] 本研究は、建設省総プロNew RC(委員長青山博之東大教授、構造性能分科会面材WG主査狩野芳一明治大学教授)の一環として行なったものである。また、実験の実施にあたっては、横浜国立大学助手李康寧博士、同卒論生金本清臣氏の御助力を得た。ここに謝意を表する。

[参考文献]

[1] 日本建築センター『構造計算指針・同解説』1988年

[2] 日本建築学会『鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針(案)・同解説』1988年

表3 実験値および計算値

Specimens	Yield Moment (M_y) (tonf.m)			Maximum Moment (M_u) (tonf.m)		
	(Exp)	(Cal)	(exp/cal)	(Exp)	(Cal)	(exp/cal)
NW-1	232.7	238.8	0.97	327.8	280.3	1.17
NW-2	236.5	240.7	0.98	301.4	280.3	1.08

* 実験値の(M_y)は、引張側主筋が降伏した時(歪ゲージにより)の値とした。

$$M_y = 0.8 \cdot A_g \cdot f_y \cdot \ell + 0.2 \cdot A_s \cdot f_{wy} \cdot \ell + 0.5 \cdot N \cdot \ell \cdot (1 - N/tw \cdot \ell_w / \sigma_b)$$

$$M_u = at \cdot \sigma_y \cdot \ell_w + 0.5 \cdot aw \cdot \sigma_{wy} \cdot \ell_w + 0.5 \cdot N \cdot \ell_w$$

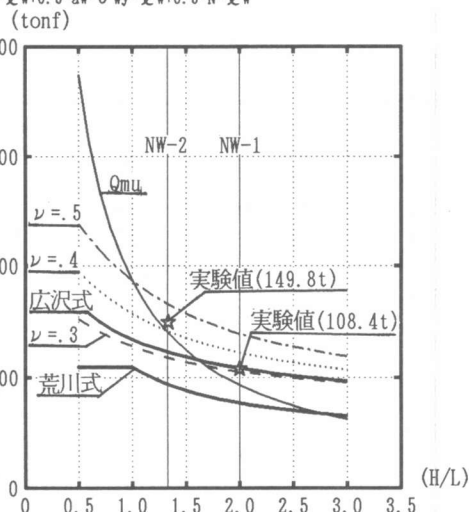


図12 計算値との比較