

論文  
 [2008] 鉄筋コンクリート造ウォールガーダーの強度変形性状

正会員 ○大久保全陸（九州芸術工科大学芸術工学部）  
 正会員 塩屋 晋一（九州芸術工科大学芸術工学部）  
 阿納 哲郎（九州芸術工科大学大学院）

1. はじめに

腰壁が梁と一体的に施工される鉄筋コンクリート造建物を、梁降伏形の骨組として設計する場合に、腰壁に構造目地を設けてこれを非構造化する方法と、腰壁をウォールガーダーの一部として積極的に構造部材化する方法がある。腰壁に構造目地を設置する前者の方法については多少の研究資料があるが[1]、後者のウォールガーダーに関しては、その力学的特性に関する知見は全く不足している。すなわち、ウォールガーダでは、その断面が通常のラーメン構造で採用される梁に比べて扁平に（梁幅に対する梁せいの比  $D/b$  がかなり大きく）なるため、面材としての性質が強く表れる可能性があり、それによつて、1) 曲げ圧縮域の靱性の問題やせん断スパン比の減少に伴うせん断変形の影響の問題、2) 曲げひび割れ発生後、曲げ変形の増加に伴って生じる軸方向変形と、それが拘束された場合に生じる軸方向拘束力が部材の強度変形性状に及ぼす影響、等未知な点が少なくない。上記の2) に関しては、通常寸法の梁を対象とした坂田・黒正らの研究[2]があり、基本的性状は一応把握されている。しかしながら、この問題はウォールガーダーでは通常の梁に比べて影響がより大きくなる可能性もある。

そこで、本報告では梁降伏形骨組にウォールガーダーを用いる場合を視点におき、上記の2) に関する問題を含めて実験を行なつてウォールガーダーの強度変形性状について検討するとともに、軸方向拘束力の影響度を梁の変形量との関係で定量化する手法について検討する。

なお、本報告で対象とする実験結果については、文献[3] で発表した。紙数の関係で本報告では実験結果を詳細に示すことができないので、実験値等については文献[3] を参照されたい。

本研究に対しては、昭和62・63年度文部省科学研究費補助金（一般研究B）の補助を受けた。2. 実験計画

(1) 試験体の種類・形状・寸法・配筋等

試験体の形状・寸法・配筋等の一例を図1に示す。試験体は、両端に柱型を設けたウォールガーダーであり、その梁幅は各試験体共通で  $b=10\text{cm}$  である。表1に実験した27体の試験体の記号と諸元を示す。主なる実験パラメータは、梁のせいと幅の比  $D/b$ 、梁内法長さ  $L_0$  と梁せい  $D$  の比  $L_0/D$ 、主筋比  $P_t$ 、肋筋比  $P_w$ 、及び軸方向変形の拘束度  $E_s A/L'$ （後述のように、本実験では軸方向変形の拘束にPC鋼棒を使用したため、その拘束度はPC鋼棒の軸方向剛性で表わしている）等

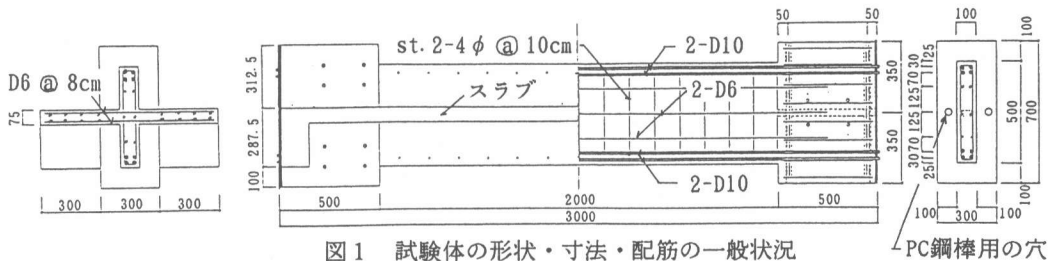


図1 試験体の形状・寸法・配筋の一般状況

であるが、スラブの存在による軸方向変形状の影響の調査についても実験が計画されている。

(2) 使用材料の性質

コンクリートの圧縮強度 $\sigma_B$ と主筋(D10, SD30)、腹筋・スラブ筋(D6, SD30)及び肋筋(D6, SD30と4 $\phi$ , SR24相当)の各降伏点強度 $\sigma_y$ ,  $\sigma_y'$ ,  $\sigma_{wy}$ の値を表1に示す。

(3) 加力測定方法

加力には逆対称変形加力装置を用いた。加力は変位漸増方式とし、部材角R=1/400, 1/200, 1/100, 1/50の各変形段階で±3回の繰り返し加力を行なうことを目標とした。軸方向変形の拘束を与えた試験体では、梁せいの中央レベルの梁の両側面にPC鋼棒を各1本配し、その両端を柱型の外側でナット定着した。PC鋼棒は、実験開始時には初期張力をほぼ0に近い状態にし、試験体に軸方向変形が生じるとその変形に比例して軸方向拘束力が梁断面中央にかかるようにした。

3. 実験結果の概要

図2と図3に軸方向変形の拘束がないNo.4試験体と、同じ諸元を持ち軸方向変形を拘束したNo.10試験体の荷重変形曲線を一例としてそれぞれ示す。図中の破線は、後述の解析結果を示す。

試験体は、27体とも全て引張鉄筋の降伏による曲げ破壊が先行した。本実験では、No.14試験体とNo.15試験体の2体を除き、他の試験体では腹筋を柱型の内部に定着して実験を行なった。

このため、断面内に多段配筋された腹筋は梁の曲げ応力度を負担しているが、腹筋は引張側か

表1 試験体の種類・実験諸元と実験結果

No.	記号	bxD (cm)	lo/D	D/B	Pt (%)	$\gamma$	Pw (%)	EsA/L' (t/cm)	$\sigma_B$	$\sigma_y$	$\sigma_y'$	$\sigma_{wy}$	Qy (t)	Qmax (t)	破壊モード										
1	205o1	10x50	2.0	5	0.3	1.0	0.20	0	334	3630	3040	3400	3.84	4.46	F										
2	205o2							3.77					6.38	F											
3	205o21							3.96					8.95	F											
4	205w1							0					5.58	6.61	F → S										
5	205w11							0					297	3254	3627	3826	5.15	6.85	F						
6	205w2							13.1					334	3630	3040	3400	6.12	8.04	F → S						
7	205w21							31.0					6.19	9.71	F → S										
8	205w22							0.31					31.0	297	3254	3627	3826	5.26	10.24	F					
9	205w23							0.31					31.0	5.40	10.07	F									
10	205w24							0.20					56.8	334	3630	3040	3400	6.40	10.61	F → S					
11	205w1s	0.31	0	297	3254	3627	3826	6.71	9.64	F															
12	205w1s1	0.31	0	6.76	11.07	F																			
13	205w1s2	0.31	0	6.85	11.07	F																			
14	205s1	10x40	2.0	4	0.4	1.0	0.2	0	334	3630	3040	3400	2.57	2.76	F										
15	205s2							56.8					3.16	8.40	F										
16	205r1							0.6					0.5	0	4.38	5.65	F								
17	205r2							56.8					4.87	10.25	F										
18	164o1							35.8					3.28	4.42	F										
19	164o2							35.8					3.86	7.26	F										
20	155w1							10x50					1.5	5	0.6	1.0	0.20	0	297	3254	3627	3826	6.70	8.38	F → S
21	155w2							0.51					37.2	7.96	13.78	F									
22	155w21							7.31					13.98	F → T											
23	155w22							7.75					14.05	F											
24	123o1	10x30	2.0	3	0.5	1.0	0.2	0	334	3630	3040	3400	2.61	3.16	F										
25	123o2	42.3	3.10	5.90	F																				
26	105w1	10x50	1.0	5	0.6	1.0	0.2	0	297	3254	3627	3826	10.43	11.70	F → S										
27	105w2	1.28	46.5	11.07	19.20	F → T																			

(注) lo/D: 梁内法寸法と梁せいの比、D/b: 断面のせいと幅の比、Pt: 梁主筋比、 $\gamma$ : 複筋比、Pw: 肋筋比、EsA/L': 軸方向変形拘束剛性、 $\sigma_B$ : コンクリート圧縮強度、 $\sigma_y$ : 梁主筋の降伏点強度、 $\sigma_y'$ : 腹筋・スラブ筋・ $\sigma_{wy}$ : 肋筋の降伏点強度。Qy, Qmaxは曲げ降伏及び最大荷重の実験値、破壊モードのFは曲げ降伏、Sはせん断破壊、Tはねじれにより実験中止を示す。空欄は、上に同じ。

[試験体記号]: 先頭の2桁数字は梁内法長さ(20→2m)、次の1桁数字はD/b、次の英小文字は、o: 梁主筋1段配筋、w: 2段配筋、s: 腹筋端部定着無し、r: 梁主筋上下非対称配筋、次の1桁数字は軸方向変形拘束の有無(1: 無、2: 有)、最後の英数字は、その他の要因の違いによる区別を表す(s, s1, s2はスラブ付き)。No. 9は端部Dの区間のPwをNo. 8の2倍、No. 22では端部Dの区間を、No. 23では端部0.5Dの区間をそれぞれNo. 21の2倍にしている。

ら断面せいの中央部にあるものまで、梁主筋の曲げ降伏とほぼ同時に曲げ降伏し、これによって部材としても曲げ降伏点を表す結果となった。

一方、軸方向変形を拘束した試験体の場合には、図3に見られる

ように荷重変形関係には、梁主筋降伏後、変形増加に伴って発達する軸方向拘束力の影響によって、曲げ降伏後も荷重の上昇が生じているのが特徴である。

#### 4. 曲げ終局強度

図4に曲げ降伏強度の実験値をe関数法による計算値と比較して示す。また、図5に曲げ終局強度の実験値（圧縮縁の歪度がほぼ0.3%となったときの値）を圧縮コンクリートに等価ストレスブロックを仮定して計算した値と比較して示す。上記の計算では、腹筋は全て曲げに関係する鉄筋として扱っている。

各図にみられるように、軸方向変形の拘束がない試験体については、計算値は実験値と比較的よく対応したが、軸方向変形を拘束した試験体では、拘束軸力の効果が計算に評価されていないため概して計算値は実験値より小さい値となっている。

#### 5. 曲げ変形とヒンジ領域長さ

本実験では、試験体の梁内法長さ $L_0$ 間を10~15cmの区間に分割して各区間の平均曲げ歪を断面の圧縮・引張縁近傍で板バネ式変位計によって測定した。測定した各区間の曲げ歪を基にして区間の平均曲率 $1/\rho$ を求め、材長に沿って分布するこの曲率の面積和を材端の曲率 $1/\rho_{x=0}$ で除して得られる等価曲率長さを、ここではヒンジ領域長さ $lp$ と定義する。

図6にヒンジ領域長さ $lp$ と部材角 $R$ との関係を示す。この図には軸方向変形の拘束度が異なる4体の試験体のデータが示されており、図から $lp$ は $R$ の増加に伴って若干増加する傾向もあるが、曲げ降伏以降 $lp$ はほぼ一定に近い値となっている。 $lp$ が $R$ と独立にほぼ一定の値を示す傾向は、図示されていない他の試験体でもほぼ共通して観察されている。なお、図6の例では $lp$ の値はおよそ梁せい $D$ の約0.4~0.5程度であるが、この値は試験体によって多少の違いはある。図7は27体の全試験体について $R=1/100$ のときの $lp$ の値をその時の曲げモーメント係数 $(M/bD\sigma_B)$ との関係で示したものである。図から曲げモーメント係数が大きくなると $lp$ も若干増加する傾向もあるが、その影響はあまり顕著でなく、ヒンジ領域長さは概ね0.5D程度となっている。

図8は、部材端の曲率が $lp$ の区間に等分布するとして求めた曲げ変形 $\delta_{lp}$ を、変位計によって測定した全体変形 $\delta$ と比較したものである。 $\delta$ にはせん断変形も含まれているため、 $\delta_{lp}$ は $\delta$ よ

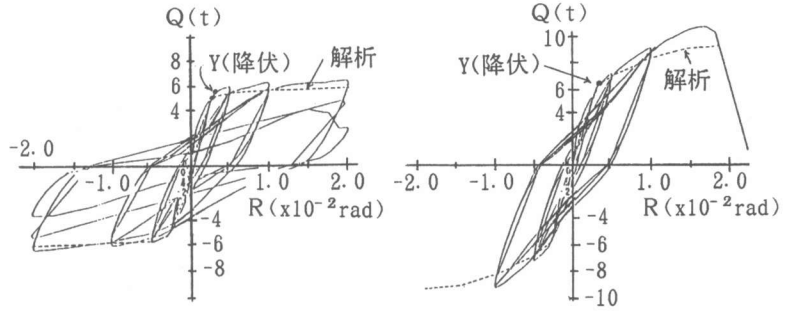


図2 荷重変形曲線 (No.4試験体) 図3 荷重変形曲線 (No.10 試験体)

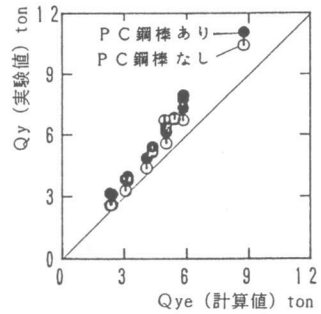


図4 曲げ降伏強度 (実/計)

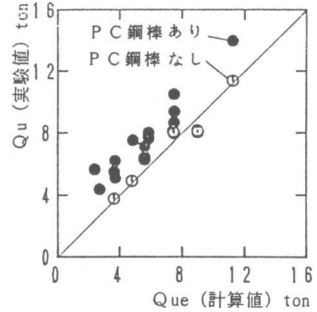


図5 曲げ終局強度 (実/計)

り概して小さいが、図から材端に梁せいDの約1/2程度のヒンジ領域を仮定して変形を計算すると、曲げ変形が支配的な場合には、概ね部材の全体変形を知ることができると思われる。

## 6. 軸方向変形とその拘束力

### (1) 軸方向変形 $\Delta L$ と軸方向変形拘束力 $N_R$ の挙動

鉄筋コンクリート部材が曲げ応力を受けて断面にひび割れが生じると、曲げ応力度の中立軸が一般に断面中央から断面の圧縮側に移動する。従って、引張鉄筋降伏形の部材を逆対称変形加力形式で実験すると、部材は左右逆対称形に形成される部材端の曲げ圧縮合力位置を見かけの回転中心として変形するためひび割れの進展と幅の増加によって一般に部材は伸び変形を生じる。ここでは、この変形を軸方向変形  $\Delta L$  と呼ぶ。

図9は軸方向変形を拘束しない試験体について、軸方向変形  $\Delta L$  の挙動を部材角  $R$  との関係で示した一例であり、曲げひび割れ発生後の  $R > 1/400$  では、 $\Delta L$  は  $R$  にほぼ比例して増加している。図中の破線は、後述の式(1)による推定値を示す。

図10はP C鋼棒によって軸方向変形の拘束を与えた試験体について、部材の変形  $R$  の増加に伴って発達する軸方向変形拘束力  $N_R$  の挙動を示した一例である。図にみられるように  $N_R$  も  $R$  にほぼ比例して増加している。図中の破線は、後述の式(3)による推定値を示す。

### (2) 軸方向変形とその拘束力の推定式

図11に示すモデルを用いて、軸方向変形  $\Delta L$  とそれを拘束したときに生じる拘束軸力  $N_R$  を推定する。(a) 図は部材が逆対称変形を受けて変形する状態を簡単に剛体の回転に置き換えたモデルであり、ここでは、左右の梁端の圧縮合力点  $A$  を結ぶ斜めの仮想アーチ(長さを  $L$  とする)が角  $R$  だけ回転し  $A$  点が  $B$  に移動したときに生じるアーチの水平軸への投影長さの増分  $\Delta L$  を軸方向変形と等価なものとして考える。図中の記号を使うと、幾何学的関係から、 $L \cdot \cos(\theta - R) - L_0 = \Delta L$ 、及び  $L = L_0 / \cos \theta$  の関係があり、この2式から軸方向変形  $\Delta L$  と  $R$  との関係を示す式(1)を得る。

$$\Delta L = \{ \cos R + (\alpha D / L_0) \sin R - 1 \} L_0 \quad (1)$$

式(1)の  $\Delta L$  はアーチ長さが初期の長さのまま回転したときの軸方向変形であるが、変形  $R$  の増加に伴って発達する軸方向変形の拘束要因があると、アーチ長さは軸方向拘束力によって減少する。この様子をモデルの右半分だけ取り出して

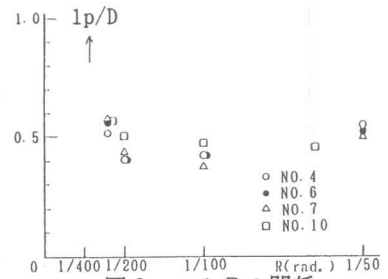


図6  $lp$  と  $R$  の関係

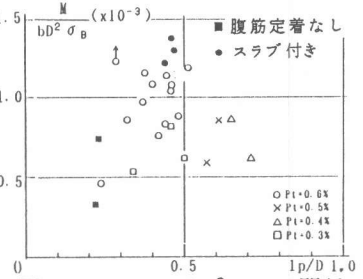


図7  $lp$  と  $M/bd^2 \sigma_B$  の関係

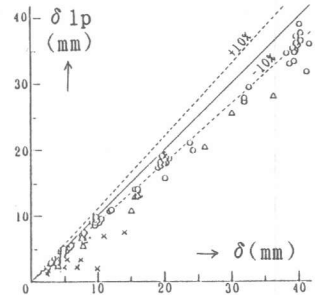


図8  $\delta lp$  と  $\delta$  の関係

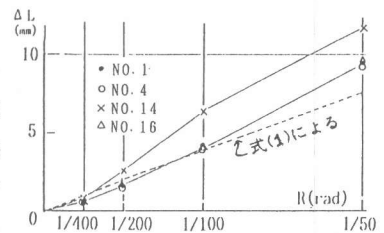


図9  $\Delta L$  と  $R$  の関係

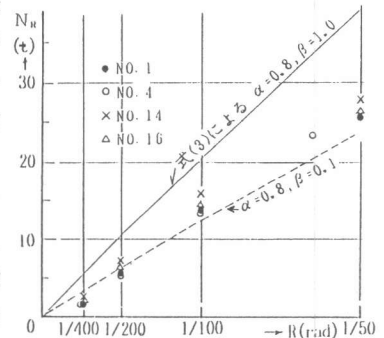


図10  $N_R$  と  $R$  の関係

(b) 図に示す。ここで、B 点はアーチ長さが不変のまま角 R だけ回転したときの移動後の点であるが、軸方向拘束力  $N_R$  の存在によって B 点は B' 点に押し戻されると考えることとする。(b) 図の  $\Delta Lc$  は  $N_R$  によってアーチが押し戻された長さであり、 $\Delta Lr$  が実験で測定している実際の軸方向変形を示し、両者には次の関係がある。

$$\Delta L = \Delta Lr + \Delta Lc \quad (2)$$

また、 $\Delta Lr$  は実験では軸方向変形の拘束に用いた PC 鋼棒の伸びにも対応し、PC 鋼棒にはそれによってある量の力が発達する。この力が軸方向変形拘束力  $N_R$  であり、 $N_R$  の作用によってアーチ長さは  $\Delta Lc$  だけ減少する。そこで、実験に用いた PC 鋼棒の軸方向剛性  $EsA/L'$  を  $Kr$  とし、アーチの軸方向剛性を梁全断面の軸方向剛性  $Kc$  の  $\beta$  倍とすると、 $\Delta Lr$  及び  $\Delta Lc$  は、それぞれ、 $\Delta Lr = N_R / Kr$ 、 $\Delta Lc = N_R / \beta Kc$  と表せるので、これを式(2) に代入し、式(1) の関係を用いると、軸方向拘束力  $N_R$  は次式によって表すことができる。

$$N_R = \{Kr \cdot \beta Kc / (Kr + \beta Kc)\} \{ \cos R + (\alpha D / Lo) \sin R - 1 \} Lo \quad (3)$$

### (3) 軸方向変形とその拘束力に対する実測値と推定値の比較

軸方向変形の拘束がない試験体について、式(1) によって計算した  $\Delta L \sim R$  関係を実験結果と比較し、一例として図9に示した。式(1) の適用にあたり、ここではアーチ端位置を圧縮縁から 0.1D のところに仮定し、 $\alpha = 0.8$  とした。

また、式(3) によって計算した軸方向変形拘束力  $N_R$  と部材角 R の関係を実験結果と比較し、一例として図10に示した。図12は軸方向変形を拘束した15体の試験体について、 $R = 1/100$  のときの実測値  $N_R$  を式(3) による値と比較して示したものである。式(3) の適用にあたり、ここでは  $\beta$  を 0.1 と仮定しており、上記の  $\alpha$  も含め係数  $\alpha$ 、 $\beta$  の採り方についてはさらに検討と要するが、曲げひび割れ発生後の軸方向変形とそれが拘束された場合に生じる拘束軸力については、簡単な剛体モデルの使用によって概ねその値を推定しうるものと思われる。

## 7. 部材の強度変形関係の解析

### (1) 解析方法

5章に示したヒンジ領域長さとは6章に示した拘束軸力に対する検討結果をベースとし、以下の手順と仮定の基に、軸方向変形が拘束された試験体の強度変形関係を解析する。

1) 部材端に曲率一定の曲げ降伏ヒンジ (ヒンジ長さを 0.5D と仮定する) を設定し、曲率がある値の時の部材角 R を計算する。

2) 1) で計算された部材角 R に対応する拘束軸力  $N_R$  を式(3) によって計算する。式(3) の係数については、 $\alpha = 0.8$ 、 $\beta = 0.1$  を仮定する。

3) 2) で計算された  $N_R$  を部材端断面の中央に作用する軸力とみなし、1) で設定した断面の曲

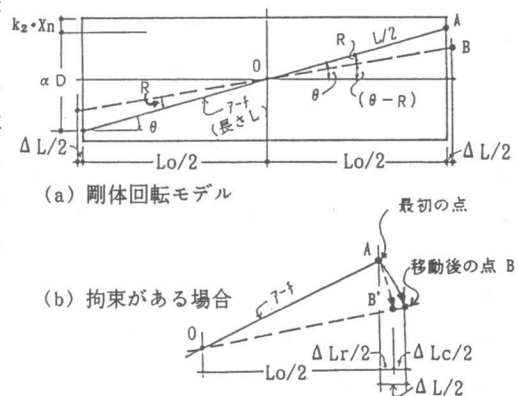


図11 軸方向変形と拘束力の解析モデル

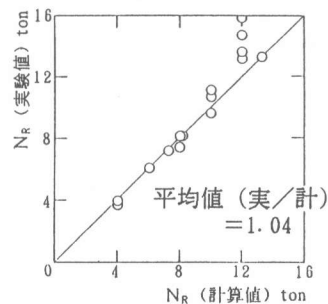


図12 軸方向変形  $N_R$  の比較 (実/計)

率に対応する断面内の引張鉄筋の歪 $\epsilon_t$ と圧縮縁のコンクリートの歪 $\epsilon_c$ を4)と5)の仮定に基づいて断面力の釣り合い条件から計算し、得られた断面力を使って断面の抵抗モーメントを計算する。ただし、軸方向変形の拘束がない試験体では、

$N_R = 0$  とする。

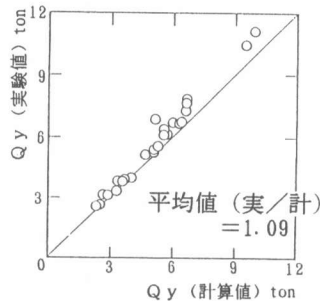


図13 実験値と解析値の比較 ( $Q_y$ )

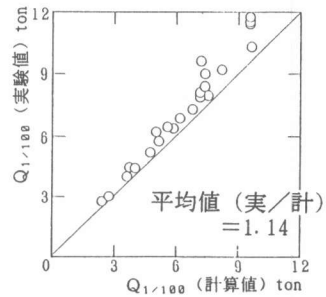


図14 実験値と解析値の比較 ( $Q_{R=1/100}$ )

4) 1)で設定する曲率の計

算には、断面の引張側で見かけの歪に対して平面保持を仮定するが、鉄筋の応力度の計算に際しては、付着劣化による歪の減少を考慮する。即ち、引張側最外縁の鉄筋の見かけの歪を $\epsilon_t / F$ とし、多段配筋状態にある引張鉄筋については、中立軸からの距離に比例させて実歪を計算する。 $F$ は歪の実測値を参照し、 $\epsilon_t \geq \epsilon_y$  のとき、 $F = 0.4$ と仮定する。

5) 鉄筋には完全弾塑性型の応力歪関係を、また、コンクリートには圧縮強度点までを2次曲線とし、以後は圧縮強度を保持する簡単な応力歪関係を仮定する。

#### (2) 解析結果と実験値の比較検討

解析結果の一例を図2及び図3に破線で示す。解析結果は、図3に見られるように軸方向変形を拘束した試験体で概して強度が低めとなっているが、曲げ降伏後、軸方向変形拘束力の発達によって強度が上昇する傾向は一応再現されている。

図13に27体の全試験体について、曲げ降伏時の強度の解析結果を実験値と比較して示し、図14に同じく $R = 1/100$  のときの強度について解析結果を実験値と比較して示す。計算値に対する実験値の比(実/計)は、曲げ降伏強度の場合、平均1.09となり、また $R = 1/100$  のときの強度の場合、平均1.14となり、概して計算値はやや低目の値を評価する結果となっている。

### 8. 結び

鉄筋コンクリート造ウォールガーダーの実験結果のうち、主に強度変形関係について検討し、

1) 軸方向変形が拘束されない場合、曲げ終局強度は断面内の腹筋を曲げに関係する鉄筋として考慮すると、曲げ終局強度理論によって良く評価できる、

2) 等価曲率の考えに基づいて定義された降伏ヒンジ領域の長さは、概ね 0.5D 程度である、

3) 簡単な剛体モデルを用いて、軸方向変形が推定しうる可能性がある。また、軸方向変形を拘束する要因がある場合には、その軸方向拘束剛性がわかれば、その値を用いて剛体モデルによって軸方向変形拘束力を推定し、推定された軸方向拘束力を断面の曲げ強度の計算に考慮すると、概ね部材の強度変形関係が推定しうる、等を示した。

#### 【文献】

- 1) 日本建築学会：構造目地を設けた鉄筋コンクリート造二次壁に関する研究資料、1988. 3.
- 2) 坂田、林、和田、黒正：軸方向変形の拘束効果を考慮した鉄筋コンクリートはりの弾塑性性に関する実験研究、日本建築学会構造系論文報告集、第 380号、1987. 10.
- 3) 大久保、塩屋、阿納、谷口、淀川：鉄筋コンクリート造ウォールガーダーの耐震じん性能に関する実験研究(その1～その4)、日本建築学会九州支部研究報告、第31号1、1989. 3.