

論文

[2197] 繰り返し水平加力に対する RC 造耐震壁の性状の解析

齊藤 三保*1

1. はじめに

建築物の耐震設計において保有耐力および変形性能の評価は、重要である[1]。従って、重要な耐震要素である鉄筋コンクリート造耐震壁の変形性能の評価、特に繰り返し加力に対する評価が重要である。繰り返し加力に対する鉄筋コンクリート造耐震壁の荷重-変形曲線の解析には、水平変形を曲げ変形とせん断変形の合計として、鉛直変形を曲げ変形から解析する方法[2][3]、壁部をブレースに置換して水平変形を解析する方法[4] 等があり、いずれも実験結果に近似した曲線を得ているが、水平および鉛直変形を構成する変形として壁脚部の鉄筋の抜け出しによる変形も無視できない場合がある。本論文では、水平変形を曲げ変形、せん断変形および鉄筋の抜け出しによる変形の合計、鉛直変形を曲げ変形および鉄筋の抜け出しによる変形の合計と考え、その解析方法および耐震壁試験体を解析して得られた荷重-各変形曲線および荷重や変形等に関する具体的な結果を実験結果と共に示し、本解析法の検討を行っている。本解析では、曲率の増分を仮定し、ひずみを求め、モーメント、せん断力を求め、各変形を解析している。

2. 曲げ変形の解析方法

解析では、耐震壁脚部のコンクリート断面を図-1 に示すように成方向に多数の要素に分割し、また鉄筋は1本を1要素としている。平面保持を仮定し、コンクリートの各要素は図-2 に示す滝口、黒正、小林らが提案した応力-ひずみ曲線[5] に、鉄筋の各要素は図-3 に示す Aktan、Karlsson、Sozen らが提案した折線形の応力-ひずみ曲線[6] に従うとしている。

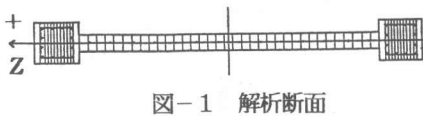


図-1 解析断面

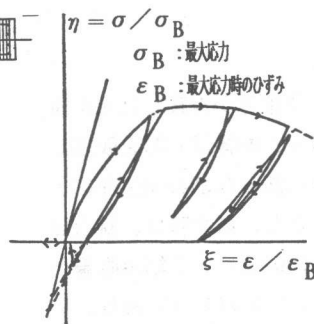


図-2 コンクリートの
応力-ひずみ曲線

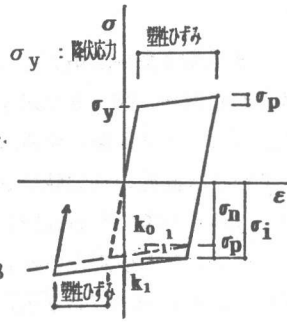


図-3 鉄筋の
応力-ひずみ曲線

次に断面解析の基本式を示す。

$$\begin{bmatrix} \partial N \\ \partial M \end{bmatrix} = \left(\sum_{i=1}^n C_{t,i} \begin{bmatrix} A_i & -A_i Z_i \\ -A_i Z_i & I_{zz,i} \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} \partial \epsilon_0 \\ \partial \phi \end{bmatrix} \quad (1)$$

ただし、 ∂N : 軸力の増分、 ∂M : モーメントの増分、 n : 要素数、

*1 小山学園 非常勤講師、工修 (正会員)

C_{ti} : 要素の前ステップにおける応力-ひずみ曲線上の接線剛性、
 Z_i : 要素の中心軸からの座標、 I_{zzi} : 要素の断面2次モーメント、
 A_i : 要素の断面積、 $\partial \varepsilon_0$: 中心軸におけるひずみの増分、 $\partial \phi$: 曲率の増分

この式は、Aktan、Pecknold、Sozen らが、用いた式[7]である。式(1)に仮定した $\partial \phi$ と定軸力による $\partial N=0$ を代入して $\partial \varepsilon_0$ を、 $\partial \phi$ と求めた $\partial \varepsilon_0$ を代入して ∂M を求める。 $\partial \varepsilon_0$ を式(1)により接線剛性を用いて線形に計算したため、補正を行う。中心軸におけるひずみ ε_0 は、補正後の $\partial \varepsilon_0$ を前ステップの中心軸におけるひずみに加えて求められる。同様に、 ∂M を式(1)により線形に計算したため、補正を行う。モーメント M は、補正後の ∂M を前ステップのモーメントに加えて求められる。ここで、ひずみは軸ひずみのことである。

曲げ変形は、遠藤等が提案した方法[2][3]に曲げ降伏を考慮して、求めている。最上梁心における水平変形(δ_{HB})を曲率分布を仮定し、中心軸における鉛直変形(δ_{VB})をひずみ分布を仮定し、求めている。図-4に仮定した曲率分布およびひずみ分布を示す。曲げひび割れ発生前は、壁脚部の曲率と最上梁心の曲率0を結ぶ三角形の曲率分布を、壁脚部から最上梁心まで長方形のひずみ分布を仮定し、曲げひび割れ発生後曲げ降伏前は、曲げひび割れ発生点で折れ曲がる曲率分布を、曲げひび割れが発生している範囲に三角形のひずみ分布を仮定し、曲げ降伏後は、曲げひび割れ発生点

および曲げ降伏発生点で折れ曲がる曲率分布を、曲げひび割れが発生している範囲に曲げ降伏発生点で折れ曲がるひずみ分布を仮定している。

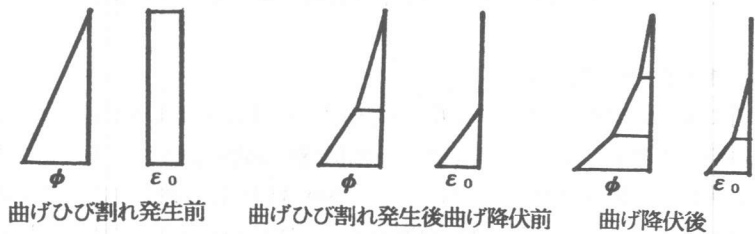


図-4 曲率分布とひずみ分布

3. せん断変形の解析方法

せん断変形は、図-5に示す遠藤等が提案したせん断応力度(τ) - せん断ひずみ(γ)曲線[2][3]を仮定し、求めている。曲線の加力時のせん断ひび割れ発生前は、富井、大崎らが導いた直線[8]とし、減力時は、減力点(γ_a, τ_a)と仮想点($-\alpha_3, -G \cdot \alpha_3$)を結ぶ直線としている。 $\alpha_3 = 0.00743 \sqrt{\tau_a}$ 、 $G = E/2(1+\nu)$ あり、 E はコンクリートのヤング係数、 ν はポアソン比である。せん断ひび割れ荷重 τ_{cr} は、菅野式による値を、せん断終局荷重 τ_u は、広沢式による値を、せん断終局時のひずみ γ_u は、富井、大崎らの実験結果による0.004を仮定している[8]。せん断力 Q を、モーメント M を壁高さで除して求め、せん断応力度 τ を、 Q を壁板の断面積で除して求める。 $\tau - \gamma$ 曲線上で τ に対する γ を求め、 γ に壁高さを掛けて、最上梁心における水平変形(δ_{HS})を求めている。

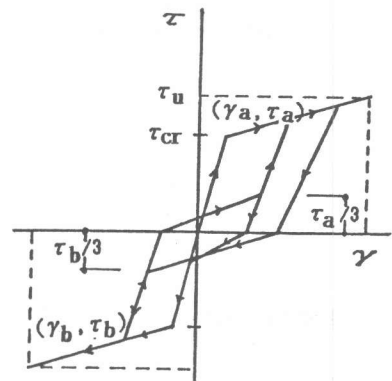


図-5 せん断応力度 - せん断ひずみ曲線

4. 鉄筋の抜け出しによる変形

曲げひび割れが発生している時に、柱の外端主筋の引張力に応じた抜け出し量を計算し、最上梁心における水平変形 (δ_{HP}) および中心軸における鉛直変形 (δ_{VP}) を求めている。鉄筋の抜け出し量の計算は、小阪、谷川、山田らが用いている[9] 方法により、行っている。柱の外端主筋の定着域を先端から20個の領域に分割し、コンクリートと鉄筋の間には、図-6に示す森田、角らが提案した付着応力度(τ_s) - すべり関係(S)[10] が、成立するとしている。分割したj 点での鉄筋の軸力 sP_j およびj 領域におけるすべり量 S_j の計算式を次に示す。

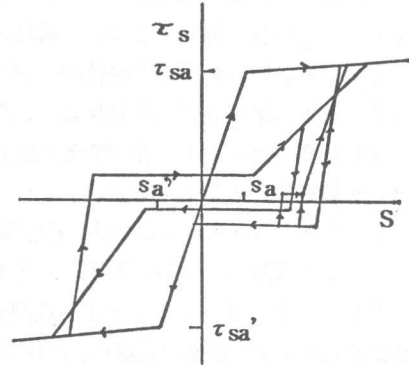


図-6 付着応力度-すべり関係

$$sP_j = sP_{j-1} + \Delta x \cdot \tau_{s(j-1)} \cdot \phi \quad (2)$$

$$S_j = S_{j-1} + \Delta x \cdot (sP_{j-1} + sP_j) / (2E_s \cdot A_s) \quad (3)$$

ただし、 Δx : 領域の長さ、 ϕ : 鉄筋周長、 E_s : 鉄筋の接線弾性係数、 A_s : 鉄筋の断面積

定着完了条件を $sP_1 = 0$ 、 $S_1 = 10^{-5}$ とし、領域1 から20まで sP_j と S_j の逐次計算を sP_{21} が、現在抜け出しを考慮している柱外端主筋の引張力に等しくなるまで繰り返す、その時の領域20のすべり量 S_{20} を抜け出し量としている。定着完了領域が2 以降の時は、その領域から計算を開始する。水平および鉛直変形は、耐震壁を剛体と考え、回転角および抜け出し量から求めている。

5. 実験試験体の解析

5. 1 解析耐震壁試験体

昭和52年に建設省建築研究所が報告した実験中のW7605 の結果を示した。図-7に配筋詳細図を示した。壁厚10cm、柱、梁の寸法25cm x 25cmである。試験体には37.5 tの定軸力および表-1に示す12サイクルの正負繰り返し水平加力が行われた。破壊状況は、壁脚部および柱脚部圧壊、せん断圧縮破壊である[11]。

5. 2 解析結果

図-8、9に荷重-水平および鉛直変形曲線の実験結果[11]と解析結果を、図-10、11に水平および鉛直変形を構成する各変形の荷重-変形曲線の解析結果を示し、曲げ水平変形は、実験結果[11]と共に示した。図-12に1、2、3、8サイクルの正側ピーク荷重時の水平変形を構成する各変形値を示す図の実験結果[11]と解析結果を、図-13に解析結果の各荷重における各変形の割合を示す図を、表-2に各荷重における荷重と部材角の値の、図-14に図-7の左柱外端主筋および壁中央部縦筋の荷重-ひずみ曲線の実験結果[11]と

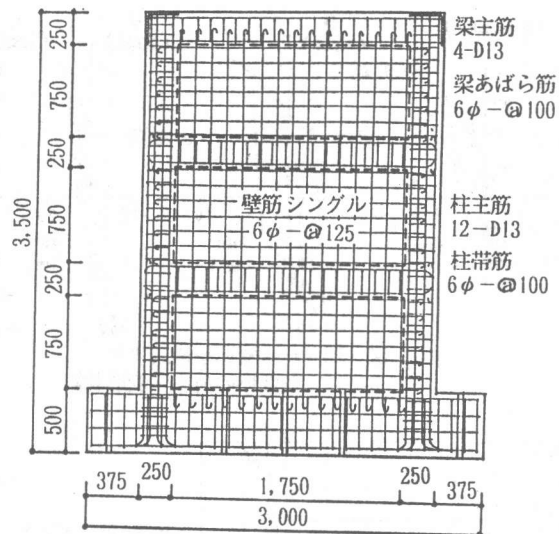


図-7 W7605 配筋詳細図

解析結果を示した。実験では引張が+、解析では圧縮が+であり、解析の繰り返しは、実験時の部材角により制御している。解析結果の各曲線の×印は、最大荷重点を示す。解析結果および実験結果より、次のことがわかる。

(1) 荷重-水平および鉛直変形曲線の解析結果の形状は、実験結果に近似している。

(2) 荷重-曲げ水平および鉛直変形曲線の解析結果の特に再加力開始時の剛性が大きく、また、ピンチング現象がみられ、荷重-水平および鉛直変形曲線に影響を与えている。

(3) 1、2、3、8サイクルの正側ピーク荷重時の水平変形を構成する各変形値を示す図の解析結果のサイクルが進むに従い、曲げ変形が増大している等の傾向は、実験結果に近似している。

表-1 荷重履歴のめやす

サイクル	部材角
1	壁せん断ひび割れ発生まで
2	1/500
3~7	1/200
8~11	1/100
12	1/50

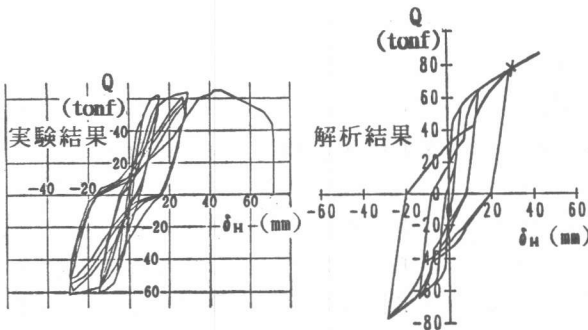


図-8 荷重-水平変形曲線

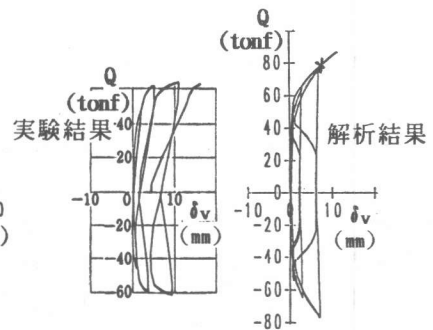


図-9 荷重-鉛直変形曲線

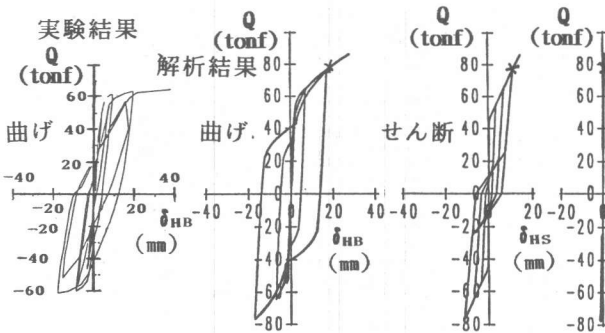


図-10 水平変形を構成する各変形の荷重-変形曲線

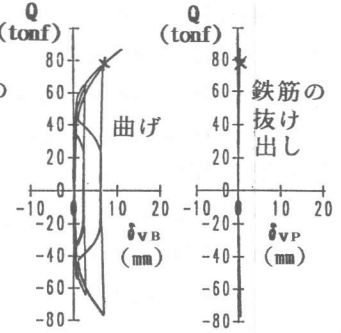


図-11 鉛直変形を構成する各変形の荷重-変形曲線

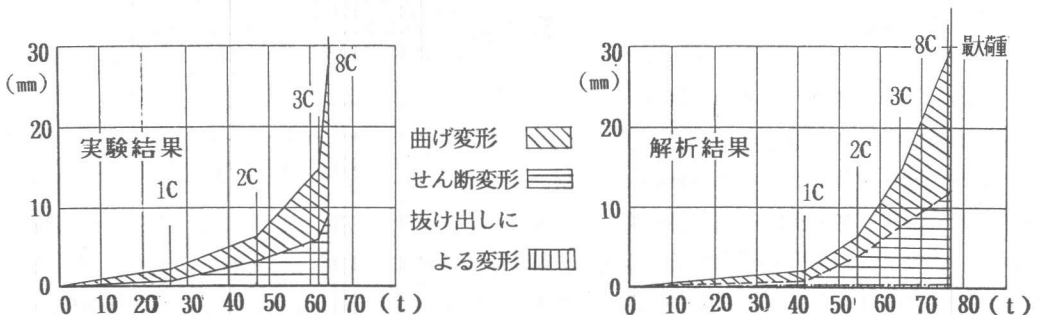


図-12 1,2,3,8 サイクルピーク荷重時の各変形の値

-			荷重段階	+		
曲げ変形(%)	せん断変形(%)	抜け出し変形(%)		曲げ変形(%)	せん断変形(%)	抜け出し変形(%)
44.6	55.4		曲げひび割れ	44.7	55.3	
58.5	30.0	11.5	せん断ひび割れ	66.9	23.4	9.7
34.0	59.5	6.4	曲げ降伏	45.0	49.1	5.9
			最大荷重	60.0	38.3	1.7

図-13 各荷重における各変形の割合

(4) 解析結果の水平および鉛直変形における鉄筋の抜け出しによる変形は、全体的に小さい。

(5) 解析結果では、せん断終局荷重が最大荷重となり、せん断破壊と判断でき、実験結果の破壊モードと同様である。曲げ降伏以降、曲げ変形が増大しているのは、試験体のシアスパン比が大きく、壁厚も厚いため、典型的なせん断破壊より曲げ変形が大きくなったためと思われる。

(6) 解析結果の曲げひび割れ、せん断ひび割れ荷重は、実験結果との相違が大きく、曲げ降伏、最大荷重は、相違が20%以内の近似となっている。また、各荷重での部材角の相違は大きい。

(7) 解析結果の各サイクルのピーク荷重は、多サイクルほど大きめである。

(8) 荷重-ひずみ曲線の解析結果は、柱外端主筋は正側が引張、負側が主に圧縮、壁中央部縦筋は全体が引張側にある現象は実験結果と近似しているが、柱外端主筋および壁中央部縦筋共に曲げ降伏しており、実験結果と大きく相違している。

表-2 各荷重における荷重と部材角の値

荷重段階	C	荷重			部材角		
		解析値A (t)	実験値E (t)	A/E	解析値A ($\times 10^{-3}$)	実験値E ($\times 10^{-3}$)	A/E
曲げ	+1	22.8	12.0	1.90	0.18	0.32	0.56
ひび割れ	-1	22.3	12.0	1.86	0.17	0.13	1.31
せん断	+2	46.3	12.0	3.86	0.88	0.32	2.75
ひび割れ	-2	46.4	26.0	1.78	0.72	0.58	1.24
曲げ降伏	+2	51.1	59.0	0.87	1.61	3.67	0.44
	-2	51.8	62.0	0.84	1.48	5.16	0.29
曲げ終局	+	-	12	65.3	-	-	-
	-	-	8	61.5	-	-	-
せん断終局	+12	77.4	65.3	1.19	10.47	14.96	0.70
	-	-	8	61.5	-	10.25	-

ただし、Cは発生したサイクルである。

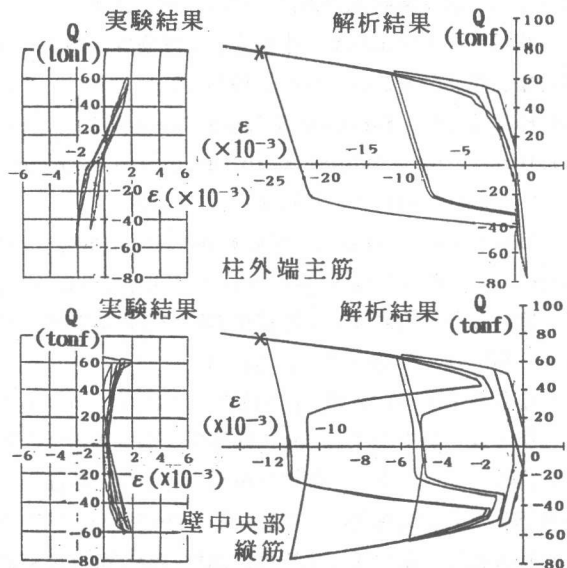


図-14 荷重-ひずみ曲線

(9) 解析では、最大荷重となってもモーメントの解析には反映されず、モーメントは増加し続けたため、各変形は指定した最終サイクルの部材角まで増加し続けている。最大荷重77.4ton以降の解析結果は、意味を持たない。

6. まとめ

繰り返し水平加力に対する荷重-水平および鉛直変形曲線を解析する方法を示し、3層1スパン耐震壁試験体を解析して得られた荷重-各変形曲線をはじめとする結果を実験結果と共に示した。本解析法により、解析の対象とした試験体の荷重-水平および鉛直変形曲線や水平変形を構成する各変形の割合、曲げ降伏および最大荷重の値、柱外端主筋および壁中央部縦筋の荷重-ひずみ曲線の現象、破壊モード等を概略的に予測できた。解析結果の抜け出しによる変形は全体的に小さいが、鉄筋の抜け出しが大きい耐震壁の荷重-水平および鉛直変形などの性状の解析には本解析法は、より有効であると思われる。荷重-変形曲線の剛性、各荷重における部材角、ピーク荷重、最大荷重以降の解析方法、鉄筋要素の曲げ降伏等について検討を要することがわかった。また、コンクリート要素の応力-ひずみ曲線を同一にしたが、かぶり部分、コア部分、壁板それぞれについて考慮した方が良いと思われる。

参考文献

- 1) 日本建築学会：建築耐震設計における保有耐力と変形性能、日本建築学会、1990
- 2) Endo, Toneo, Adachi, Hiromi, Nakanishi, Mitsukazu : FORCE-DEFORMATION HYSTERESIS CURVES OF REINFORCED CONCRETE SHEAR WALLS , PROCEEDINGS OF THE SEVENTH WORLD CONFERENCE ON EARTHQUAKE ENGINEERING, PP315 ~322 , 1980.9
- 3) 渡辺敏行：鉄筋コンクリート造耐震壁の力学的性状に関する研究、東京都立大学特別研究、1979
- 4) 山田稔・河村広・森高英夫：鉄筋コンクリート耐震壁の弾塑性変形性状に関する研究、日本建築学会近畿支部研究報告書、PP53~56、1975
- 5) 滝口克己・黒正清治・小林克己：鉄筋コンクリート断面の二軸曲げ解析、日本建築学会論文報告集、第250号、PP.1~8、1976.12
- 6) Aktan, A. E., Karlsson, B. I. and Sozen, M. A. : Stress-Strain Relationships of Reinforcing Bars Subjected to Large Strain Reversals, CIVIL ENGINEERING STUDIES , No.397, University of Illinois, 1973.6
- 7) Aktan, A. E., Pecknold, D. A. W. and Sozen, M. A. : Effect of Two-Dimensional Earthquake Motion on a Reinforced Concrete Column, University of Illinois, 1973.5
- 8) 富井政英・大崎順彦：架構付無開口壁の剪断抵抗に関する研究(第1報)、日本建築学会論文集、第51号、PP96~105、1955.9
- 9) 小阪義夫・谷川恭雄・山田和夫：エンドクロニック理論による鉄筋コンクリートの非弾性解析-第1報 解析方法-、日本建築学会論文報告集、第326号、PP.78~90、1983.4
- 10) 森田司郎・角徹三：繰り返し荷重下における鉄筋とコンクリート間の付着特性に関する研究、日本建築学会論文報告集、第229号、PP15~24、1975.3
- 11) 建設省建築研究所：建築構造部材の耐震強度の解析(鉄筋コンクリート造耐震壁(シアスパン比シリーズ)の実験研究)、1977.3