



鉄筋コンクリート連層耐震壁の曲げ変形性状と部材モデルについて(耐震壁)

メタデータ	言語: jpn 出版者: 日本コンクリート工学協会 公開日: 2022-03-29 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 荒井, 康幸, 荒川, 卓, 溝口, 光男 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10258/00010500

論文

[2094] 鉄筋コンクリート連層耐震壁の曲げ変形性状と部材モデルについて

正会員○荒井康幸 (室蘭工業大学工学部)

正会員 荒川 卓 (室蘭工業大学工学部)

正会員 溝口光男 (室蘭工業大学工学部)

1. はじめに

連層耐震壁を含む鉄筋コンクリート建物の地震時における挙動を正確に把握するためには、耐震壁の変形性状をできるだけ忠実に表現できる適切なモデルを作成する必要がある。耐震壁の弾塑性曲げ変形挙動を解析する方法としては、材軸直交分割法や壁材軸に沿う曲率の分布形を仮定する曲率直線分布法などがある[1]。これら平面保持の仮定の下で構成式を組み立てる方法の他に、耐震壁を各種のパネの組合せとしたモデルが考えられているが[2]、実験データと直接対応させて作成されたモデルは見当らないようである。本報告では、耐震壁の曲げせん断実験を行った前報[3]の実験資料を用いて曲げ変形性状に関する検討を行い、その結果に基づいて連層壁付きフレームの構造解析用部材モデルを作成したので報告する。

2. 実験資料の概要

検討に用いた資料は、図-1に示すようにシアspan比(M/QD)と壁高を3とおりとし、常に図示のモーメント分布となるように正負漸増繰り返し加力を行った試験体である。試験体の断面、柱主筋量、壁補強筋量等は全て同一であり、一定の軸力(平均軸方向応力度 $\sigma_0=25\text{Kg/cm}^2$)がかかっている。これらの試験体の破壊状況は、シアspan比によって曲げ破壊型からせん断破壊型に移行している。実験の詳細については前報[3]を参照されたい。なお、検討する変形の範囲は、曲げ降伏した試験体のコンクリートが圧壊して耐力が低下する以前の繰返し6サイクル(部材角 $R=1/100\text{rad}$)までとした。

3. 曲げ変形性状の検討

曲げ降伏後にせん断変形が急増することが知られており、これに関して平石は引張側柱を弾塑性の変断面材としたトラスモデルを提案している[4]。本実験の試験体についても前報[3]に記したように、曲げ降伏後の繰返しピーク時の変形性状はトラス的な変形機構を示していた。そこで本報告では、典型的な曲げ降伏現象を示した試験体について、図-2に示す部材角 R (壁頂の水平変形 δ /計測点高さ h)と壁頂回転角 θ_T との関係を、加力開始時から繰返し加力の全過程について調べてみた。その結果を図-3に示す。図によると、同図(a)~(c)の $M/QD=1.48$ の試験体については、 θ_T-R 曲線は部材角 R の小さなうちから全範囲にわたってほぼ直線となっており、

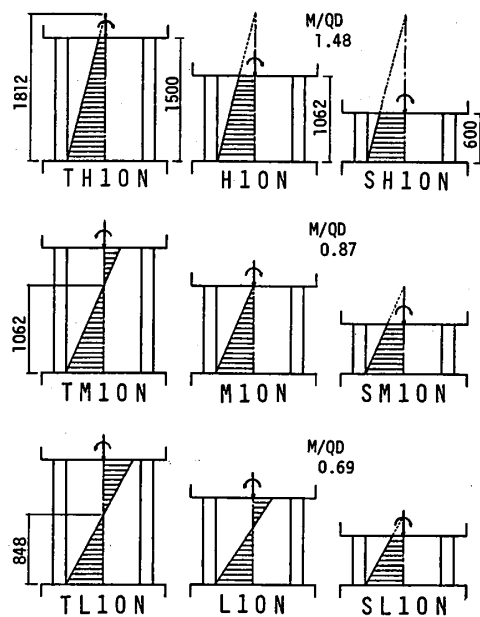


図-1 試験体とモーメント分布

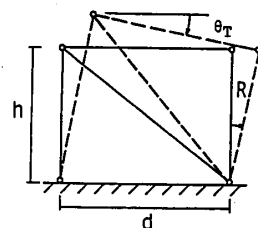
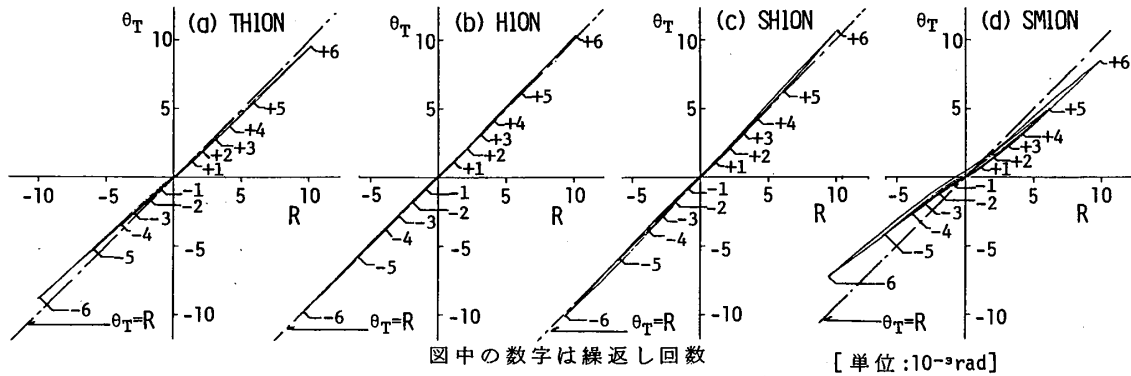


図-2 トラスモデル



図中の数字は繰返し回数 [単位: 10^{-3} rad]

図-3 壁頂回転角 θ_T と部材角 R の関係

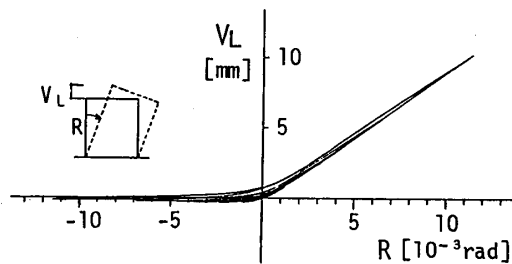


図-4 側柱頂部の鉛直変位 [H10N]

TH10N がやや離れているものの直線 $\theta_T = R$ にほとんど一致している。同図(d)の $M/QD=0.87$ の SM10N については、壁頂回転角 θ_T は部材角 R より小さな値となっているが、 R が大きくなると $\theta_T - R$ 曲線の包絡線は直線 $\theta_T = R$ に概ね平行となっている。

トラスモデルでは引張側柱の伸びによって壁頂に水平変形 δ が生じ、他の部材の伸縮を無視すると $\theta_T = R (= \delta/h)$ となる。側柱頂部の鉛直変位 V_L と部材角 R との関係は図-4 に示すとおりであり、圧縮側柱となる場合の縮みは引張側柱となる場合の伸びに比べて極めて小さい。一方、 $M/QD=1.48$ の試験体3体の曲げ降伏時せん断力は、せん断ひび割れ荷重計算値 $(Aw\sqrt{c\sigma_t^2 + c\sigma_t \cdot \sigma_o} / \kappa_w)$ よりも小さいので、せん断力による変形(斜め圧縮材の縮み)はごく小さなものと考えられる。これら3試験体に比べてシアスパン比の小さい SM10N では、せん断力が大きくなるので、これによる変形が現われて部材角 R が壁頂回転角 θ_T より大きくなっていると思われる。

$M/QD=1.48$ の3試験体のせん断力 Q - 壁頂回転角 θ_T 曲線とせん断力 Q - 部材角 R 曲線を比較して図-5 に示す。前掲の図-3 でも示されているが、曲げ降伏以前の極めて早い段階から $Q - \theta_T$ 曲線

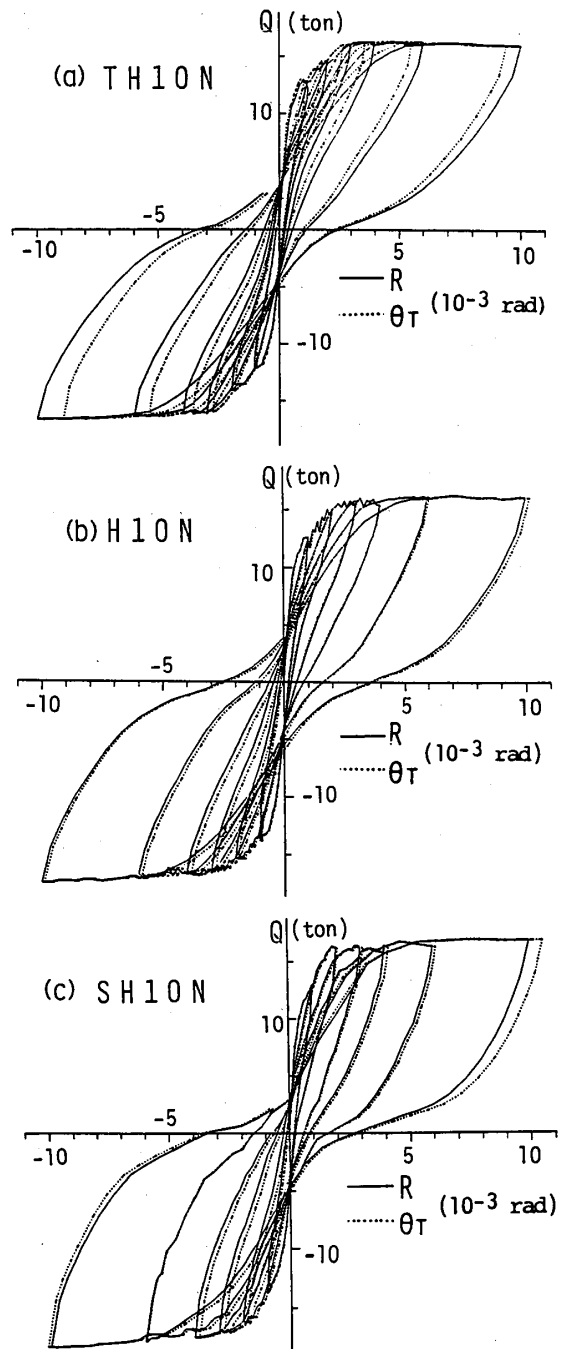


図-5 $Q - R$ 曲線と $Q - \theta_T$ 曲線の比較

とQ-R曲線は良く一致している。また、繰返し加力時の履歴特性についても非常に良く対応している。

図-6に壁材軸上の壁頂部鉛直変位V（左右の側柱頂部鉛直変位の平均）と壁頂回転角 θ_T との関係を示す。シアスパン比が1.48と0.87の両試験体とも、V- θ_T 曲線は繰返しによる履歴ループもあまり描かず、また、鉛直変位Vは回転角 θ_T の原点付近ではほぼ0で変化も少ないが、 θ_T が大きくなると正負のそれぞれの方向にほぼ直線的に増大している。曲げひび割れ発生後からトラス的な変形機構になるものとする、曲げひび割れ後のVと θ_T との関係は $V=(\theta_T-\theta_{TC})d/2$ （ θ_{TC} :曲げひび割れ発生時の壁頂回転角、d:側柱中心間距離）となり、図-6の1点鎖線のように表される。ここで、 θ_{TC} は後述の壁脚モーメント-壁頂回転角曲線を3折線にモデル化した第1折点の回転角を使用した。同図の1点鎖線と実験曲線を比較すると両者は良く一致している。

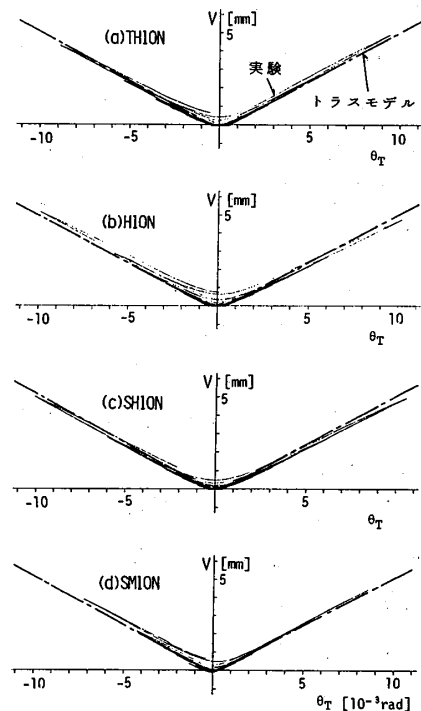


図-6 壁頂の鉛直変位と回転角の関係

以上のように、部材モデルを作成する上では、曲げによる壁の変形は、曲げひび割れ発生後から繰返し加力時を含めて圧縮側柱脚を中心として回転すると考えることができよう。そこで本論では、壁脚・壁頭間を弾性部材とし、曲げひび割れ後の塑性回転変形 θ_P は、図-7(a)に示す回転バネを同図(b)のように壁脚に挿入して表すこととする。

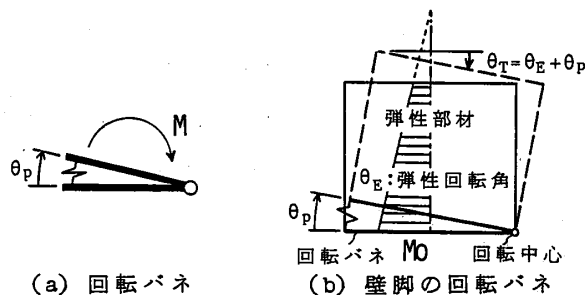


図-7 曲げ変形モデル

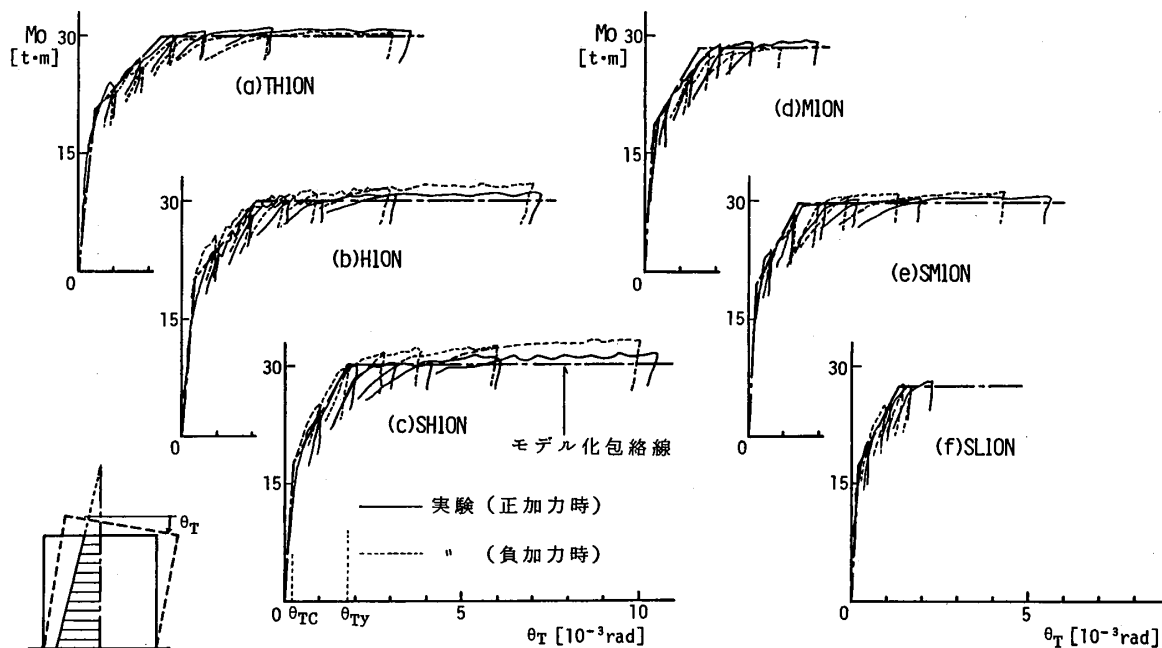


図-8 $M_o-\theta_T$ 曲線の包絡線

4. 回転バネの剛性

反曲点高さが壁高よりも高い試験体6体(図-1参照)について、壁脚モーメント M_0 -壁頂回転角 θ_T 関係の包絡線を図-8に示す。前記の図-7に示した曲げ変形モデルの θ_T は、弾性回転角 θ_E と回転バネによる塑性回転角 θ_P との和であるから、回転バネの剛性は M_0 - θ_T 関係が定まるとおのずと決まる。図-8の各試験体の M_0 - θ_T 曲線の包絡線は図のように3折線でモデル化することができよう。同図のモデル化包絡線は、第1剛性を弾性回転剛性計算値とし、第1および第2折点はそれぞれ図上で実験曲線に合わせて設定した。第1折点のモーメント M_c 、第2折点の降伏モーメント M_y および降伏時壁頂回転角 θ_{TY} を表-1に示す。 M_y は終局曲げ強度式による値 $calMu$ にほぼ一致しているが、 M_c は曲げひび割れ計算値 $calMc$ より約30%大きな値となっている。ところで、降伏時における曲率の鉛直方向の分布形状は、前報[3]で述べたように、たわみ性分布を図-9のように仮定して得られる曲率分布によく対応している。これを利用して壁頂回転角が θ_{TY} となるとき壁脚の曲率 ϕ_{oy} を求めると同表中の値になる。この ϕ_{oy} と前記の M_c 、 M_y を用い、第1剛性を弾性曲げ剛性として壁脚部のモーメント M_0 -曲率 ϕ_0 関係のモデル化包絡線を描くと図-10のようになる。同図には実験による包絡線も示したが、両者の降伏時曲率は良く対応していると言えよう。したがって、壁脚の降伏時曲率を定めるとシアスパンや壁高が異なっても、図-9のたわみ性分布から得られる曲率を積分して降伏時壁頂回転角を求

表-1

	M_c t·m	$calMc$ t·m	$\frac{M_c}{calMc}$	M_y t·m	$calMu$ t·m	$\frac{M_y}{calMu}$	θ_{TY} 10 ⁻³ rad	ϕ_{oy} 10 ⁻⁶ 1/mm
TH10N	20.1	13.7	1.47	29.1	28.3	1.03	2.33	4.40
H10N	19.8	15.0	1.32	29.1	''	1.03	2.13	4.32
SH10N	18.0	13.4	1.34	29.4	''	1.04	1.77	4.59
M10N	18.0	14.6	1.23	27.6	''	0.98	1.53	5.05
SM10N	18.9	14.4	1.31	28.8	''	1.02	1.40	4.98
SL10N	17.0	13.6	1.25	26.7	''	0.94	1.30	5.64

$calMu = [0.9a_c \cdot s \cdot f_u + 0.4a_w \cdot s \cdot f_{cu} + 0.5N(1-N/BLF_c)]L$, $calMc = (c\sigma_c + \sigma_o)Z$
式中の記号は文献[5]を参照

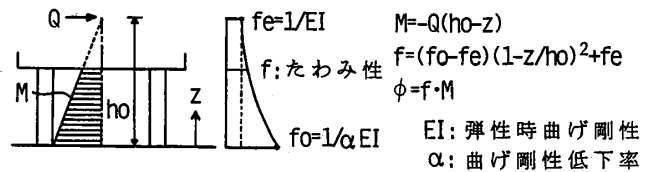


図-9 たわみ性分布の仮定

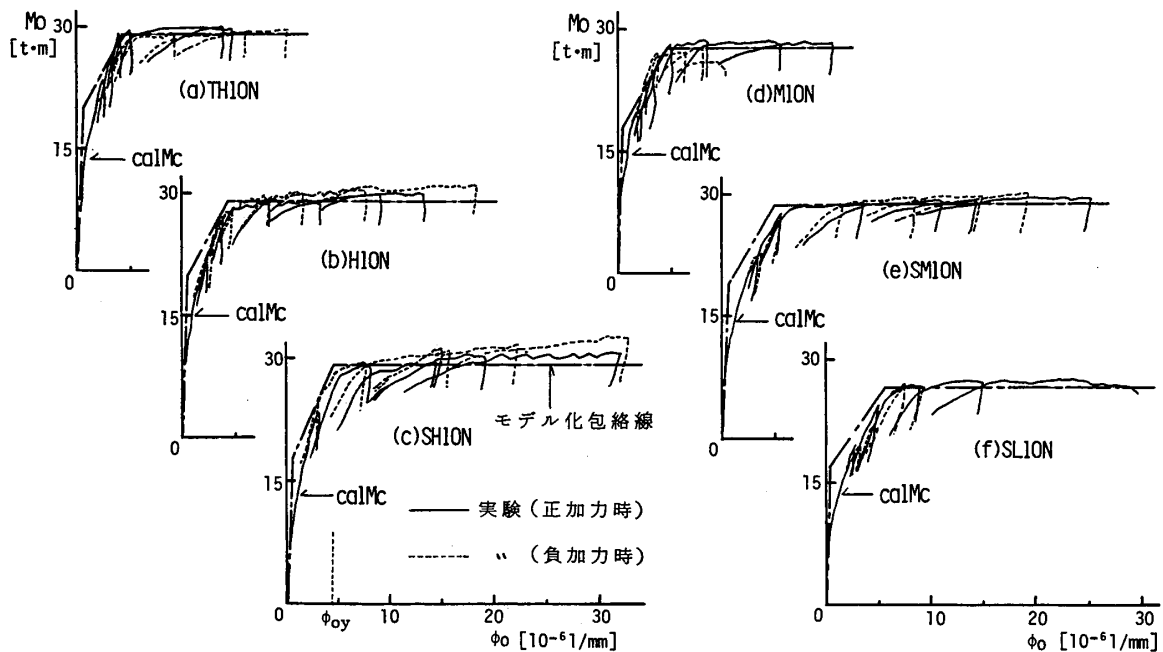


図-10 M_0 - ϕ_0 曲線の包絡線

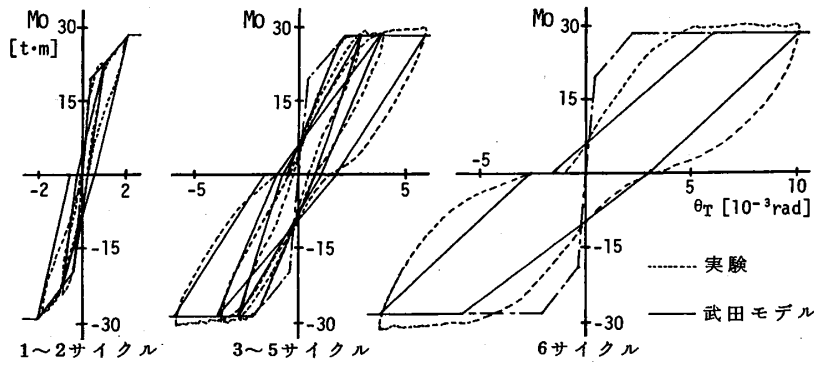


図-11 Mo-θ_T関係の履歴特性[H10N]

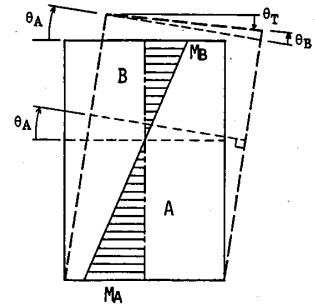


図-12 曲げ変形モデル

めることができる。さて、 θ_{Ty} はシアスパン比が同じ場合に壁高が高いほど大きい、 ϕ_{oy} はほぼ同じ値になっている。シアスパン比が小さくなると ϕ_{oy} は大きくなる傾向があるが大差はない。本実験の ϕ_{oy} は 5×10^{-6} 1/mm 前後となっているが、これに関する実験データの蓄積が必要であろう。本実験の ϕ_{oy} を中立軸が圧縮側柱中心にあるとして引張側柱脚部のひずみ度でみると約0.5~0.6%になる。

図-11に壁脚モーメント M_o -壁頂回転角 θ_T 関係の履歴曲線を示す。同図には武田モデル[5]による履歴ループも比較して示した。モデルの包絡線は前掲図-8のモデル化包絡線を使用し、武田モデルの繰返しルールにおける除荷時剛性低下指数は1.0としている。両者を比較すると、6サイクル目($\theta_T \approx 1/100 \text{ rad}$)のループに比較的大きな違いが見られるが、5サイクル目($\theta_T \approx 6/1000 \text{ rad}$)まではほぼ対応していると言えよう。

次に、反曲点高さが壁高より低い場合について考える。この場合には、図-12に示すように反曲点高さで壁を上下A、Bに分割してそれぞれの部分で材端回転角を考え、両者を合わせて壁全体の曲げ変形とする。これによって作成したTM10NとTL10Nのせん断力 Q -壁頂回転角 θ_T 関係を実験による包絡線と共に図-13に示す。ここで、A、Bそれぞれの部分に必要な材端モーメント-材端回転角関係は、同一シアスパン比の試験体の M_c 、 M_y および ϕ_{oy} を用いて作成した。モデル化した Q - θ_T 関係と実験曲線を比較すると、同図(b)のTL10Nではせん断破壊したので以後に開きが見られるが、それまではTM10Nを含めてほぼ対応していると言えよう。図-14にはTM10Nについての壁頂の鉛直変位 V と θ_T の関係を示した。 θ_T が大きくなるにつれて、実験による V はモデル化曲線を上回っているが、これはせん断ひび割れによって壁板が膨張したためと思われる。両試験体とも壁頂の材端モーメントは第1折点の M_c を越えていないので十分な検討を行っているとは言い難いが、反曲点が壁内に存在する場合には上記のようにモデル化できるものとする。

5. 部材モデルと構成方程式

連層壁の壁脚・壁頭に設けた節点A、Bに関する部材モデルの構成方程式を導く。回転バネは

図-15に示すように、反曲点が壁外にある場合には壁脚のみに、壁内にある場合には脚部と頭部に回転バネを設ける。繰返し荷重を受ける場合には、バネの回転方向によって回転中心は左右の側柱位置に移動することを考慮し、また、せん断剛性の低下は剛性低下率で考慮する。

図-15に示す記号を用いて力と変形の関係を増分形で表示すると、回転バネによる材端回転角 $\Delta\theta_{PA}$, $\Delta\theta_{PB}$ は

$$\begin{Bmatrix} \Delta\theta_{PA} \\ \Delta\theta_{PB} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{PA} & 0 \\ 0 & f_{PB} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta M_A \\ \Delta M_B \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} f_A & 0 \\ 0 & f_B \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta Z_A \\ \Delta Z_B \end{Bmatrix}$$

ここに、

$$f_A = \begin{cases} -f_{PA} \cdot d / 2 & (\theta_{PA} \geq 0) \\ f_{PA} \cdot d / 2 & (\theta_{PA} < 0) \end{cases}, \quad f_B = \begin{cases} f_{PB} \cdot d / 2 & (\theta_{PB} \geq 0) \\ -f_{PB} \cdot d / 2 & (\theta_{PB} < 0) \end{cases}$$

$$f_{PA} = 1/k_{PA}, \quad f_{PB} = 1/k_{PB}, \quad k_{PA}, k_{PB}: \text{回転バネ剛性}$$

回転バネの回転によって生じる軸方向変位 ΔW_{PA} , ΔW_{PB} は

$$\begin{Bmatrix} \Delta W_{PA} \\ \Delta W_{PB} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} f_A & 0 \\ 0 & f_B \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta M_A \\ \Delta M_B \end{Bmatrix} + \frac{d^2}{4} \begin{bmatrix} f_{PA} & 0 \\ 0 & f_{PB} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta Z_A \\ \Delta Z_B \end{Bmatrix}$$

壁材端の変形は、回転バネの変形と中間部材の弾性変形との和であるから、節点回転角を $\Delta\theta_A$, $\Delta\theta_B$ 、部材角を ΔR 、節点軸方向変位を ΔW_A , ΔW_B とすると次の構成方程式が得られる。

$$\begin{Bmatrix} \Delta\theta_A - \Delta R \\ \Delta\theta_B - \Delta R \\ \Delta W_A - \Delta W_B \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1 + f_{PA} & f_2 & -f_A \\ f_2 & f_1 + f_{PB} & f_B \\ -f_A & f_B & h/EA + (f_{PA} + f_{PB})d^2/4 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta M_A \\ \Delta M_B \\ \Delta N \end{Bmatrix}$$

ここに、

$$\Delta N = -\Delta Z_A = \Delta Z_B, \quad f_1 = \frac{h}{6EI} (2+g), \quad f_2 = \frac{-h}{6EI} (1-g), \quad g = \frac{6\kappa EI}{\beta GAwh^2}$$

E: ヤング係数, I: 断面2次モーメント, A: 壁の全断面積, Aw: 壁板の断面積

G: せん断弾性係数, β : せん断剛性低下率, κ : 形状係数

6. むすび

連層壁付きフレームの構造解析用部材モデルを作成することを目的として、曲げせん断力を受ける耐震壁の曲げ変形状について検討を行った。その結果、曲げひび割れ後の変形は、繰返し載荷時も含めて圧縮側柱脚を中心とする回転変形と見なすことができたので、柱・はりなどに用いられている材端バネモデルの回転中心を圧縮側柱脚に設けた部材モデルを作成した。回転バネの降伏時回転角は、たわみ性分布の仮定により降伏時曲率から求められるが、これに関する実験資料の蓄積が必要である。今後、シアスパンが変化する場合についての検討も必要であるが、簡便な本報の部材モデルは連層壁付きフレームの弾塑性解析に有用であると考えられる。

[謝辞] 卒論生として本研究に携わっていただいた山内 茂君に深く感謝いたします。

参考文献 1) 益尾 潔、安倍 勇、秦 雅史: RC連層耐震壁架構の弾塑性変形状に関する解析的研究(その1 解析法)、日本建築学会論文報告集、第339号、昭和59年5月、pp.1~10 2) 壁谷沢寿海、小谷俊介、青山博之: 耐震壁を有する鉄筋コンクリート構造物の非線形地震応答解析、第5回コンクリート工学年次講演会講演論文集、1983、pp.213~216 3) 荒井康幸、荒川 卓、溝口光男、近藤智則: 鉄筋コンクリート連層耐震壁の耐力と変形状に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文報告集 10-3、1988、pp.391~396 4) 平石久廣: 曲げ降伏型の鉄筋コンクリート造耐震壁の復元力特性に関する解析的研究、日本建築学会構造系論文報告集、第347号、昭和60年1月、pp.95~101 5) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート終局強度設計に関する資料(連層耐震壁) 6) T.Takeda, M.A.Sozen, N.N.Nielsen: Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquakes, 第3回日本地震工学シンポジウム講演集、1970年11月、pp.357~364

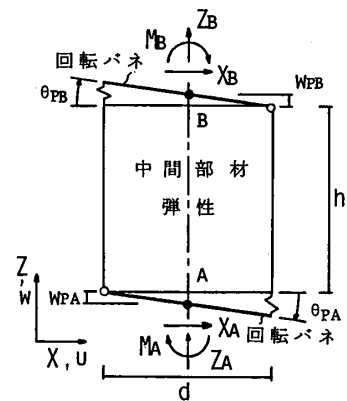


図-15 部材モデル