

論文

[2106] 繰り返し加力を受ける鉄筋コンクリート短柱のせん断破壊挙動に関する研究

正会員 田 中 彌壽雄 (早稲田大学理工学部)
 正会員 金 子 雄太郎 (西武建設)
 正会員 矢 代 晴 実 (早稲田大学理工学部)
 正会員 ○永 野 正 行 (鹿島建設)

1. はじめに

鉄筋コンクリート短柱のせん断破壊機構における主筋の付着性状を考えるため、筆者らは既往の研究¹⁾において主筋の付着を一部除去した供試体について実験研究を行なった。本研究では繰り返し載荷下の挙動特性を考慮した解析モデルを用いて有限要素解析を行ない、主筋の付着状況をパラメーターとして得られた解析結果より、短柱のせん断破壊機構に関し考察を行なった。

2. 有限要素解析モデル

本研究において用いた解析モデルのうち、コンクリート材料と鉄筋とコンクリートとの付着挙動のモデル化についてその概要を以下に示す。

2-1 コンクリート材料のモデル化

本解析ではコンクリート材料に対し一定ひずみ三角形要素を用いてモデル化した。また構成則としてDarwin・Pecknold²⁾による等価一軸ひずみに基づく直交異方性モデルを採用し、繰り返し載荷下の有限要素解析に適用することができるように修正を行なった。

野口・長沼³⁾は等価一軸ひずみの計算において、Darwin-Pecknoldの方法に対して、主ひずみより等価一軸ひずみを求め、主応力軸の回転に対して座標変換させることにより解の連続性を保持させる方法を提案した。しかしこの方法は、繰り返し載荷下の挙動に対して、コンクリート要素内の応力が0に近づくにつれ、わずかな不釣り合い力の発生により主応力方向が回転してしまい、収束計算に支障を及ぼすという欠点が明らかになった。このため本研究においては、大きな非線形性を示さない除荷時、及び再載荷時においてはDarwin・Pecknoldの方法を用い、載荷時や主応力方向が正負45°以上回転するような非線形性を大きく示す場合に、野口・長沼の方法を用いて等価一軸ひずみの計算を行なった。

・載荷時、または主応力方向が45°以上回転した時

$$\{\epsilon_{1u}\} = [T] \{\epsilon_{1uold}\} + [U] (\{\epsilon_1\} - [T] \{\epsilon_{1old}\})$$

・除荷時、再載荷時

$$\{\epsilon_{1u}\} = \{\epsilon_{1uold}\} + \frac{\sigma_{inew} - \sigma_{1old}}{E_1}$$

主軸の回転では、Darwin・Pecknold、野口・長沼とも同様の手法を用い、主応力方向が主軸領域を越え回転した場合、主軸に関する材料特性値に対しても、主応力方向に合わせ主軸の番号の入れ換えを行なっている。しかしこの方法では、主軸の入れ換え直後に大きな不釣り合い力が生じ、主軸の回転が集中する除荷時の0も近くでは収束計算ができなくなってしまう。これは図-1に示すように、主軸によって異なる挙動レベルにおいて等価一軸ひずみの計算を連続したものとして行なったことが原因と考えられる。本研究においては、主軸の回転に際しては等価一軸

ひずみの求め方を変え、異なる主軸でも同じ応力レベルを保持し、かつ不釣り合い力の発生を最小限に抑えるため次のような方法を用いて計算を行なった。

$$\varepsilon_{1u} = \varepsilon_{2uold} + \frac{\sigma_{1new} - \sigma_{2old}}{E_1}$$

$$\varepsilon_{2u} = \varepsilon_{1uold} + \frac{\sigma_{2new} - \sigma_{1old}}{E_2}$$

Darwin・Pecknoldは2軸応力下の最大圧縮応力 σ_{1c} に関し、Kupfer・Gerstleの最大強度基準に関する解析モデルを基に最大強度基準式を作成し、主応力比 $\alpha (= \sigma_1 / \sigma_2)$ を関数として σ_{1c} 、 σ_{2c} を求め、さらにこの値を用いて、

ε_{1c} の値を定義した。しかしこの方法に関し次のような欠点が明らかになった。1) α の値が0に近付くにつれて σ_{1c} の値が次第に小さくなり、 $\alpha = 0$ の時は σ_{1c} は不定になる。2) 低せん断力載荷時における低応力域挙動では、主応力比 α が大きく変化し σ_{1c} の変化も大きくなるため、不正な不釣り合い力が生じ易くなる。3) σ_{1c} が現在の主応力 σ_1 から求まる主応力比 α のみで決定されるため過去の応力経路、ひずみ経路が全く考慮されていない。

本研究ではDarwin・Pecknoldの方法を修正し、第1主応力 σ_1 の符号により、2つのケースに分け、次のように σ_{1c} を求めた。

・第1主応力 σ_1 が正の時

$$\sigma_{2c} = \left(1 - 0.35 \frac{\sigma_1}{f_t'}\right) f_c' \quad \text{ただし} \quad \sigma_{2c} \leq 0.65 f_c'$$

ここで、 f_c' : コンクリートの一軸圧縮強度、 f_t' : コンクリートの一軸引張強度

・主応力比 α が $0 < \alpha < 1$ の時

$$\sigma_{2c} = f_c' + (\sigma_{2c}^* - f_c') \frac{\sigma_{2max}}{\sigma_{2c}^*} \quad \text{ただし} \quad \sigma_{2c}^* = \frac{1 + 3.65 \alpha^*}{(1 + \alpha^*)^2} f_c'$$

ここで $\alpha^* = \sigma_1 / \sigma_{2max}$

$$\sigma_{1c} = f_c' + (\sigma_{1c}^* - f_c') \frac{\sigma_{1max}}{\sigma_{1c}^*}$$

ここで $\sigma_{1max} > \sigma_2$ のとき $\sigma_{1c}^* = \alpha^* \frac{1 + 3.65 \alpha^*}{(1 + \alpha^*)^2} f_c' \leq f_c'$, $\alpha^* = \sigma_{1max} / \sigma_2$

$$\sigma_{1max} \leq \sigma_2 \text{のとき} \quad \sigma_{1c}^* = \frac{1 + 3.65 \alpha^*}{(1 + \alpha^*)^2} f_c', \quad \alpha^* = \sigma_2 / \sigma_{1max}$$

本解析ではコンクリート材料のひび割れに対しては、要素内を直交異方性化させる分布ひび割れアプローチを用いて表現した。ひび割れの開閉はひび割れ面におけるせん断ひずみ γ を考慮して、ひび割れに垂直方向の等価一軸ひずみ(ひび割れ幅)を修正することにより行なった。

2-2 鉄筋とコンクリートの付着挙動のモデル化

本解析においてはコンクリート要素と主筋要素の間に線形弾性のボンドリンク要素を設定し、すべり挙動を表わしている。帯筋に関しては完全付着を仮定している。

鉄筋コンクリート短柱の解析において部材の履歴挙動に対する付着の影響をモデル化する場合、ボンドリンク要素だけでは除荷時における弾性挙動を再現することができない。これは部材全体

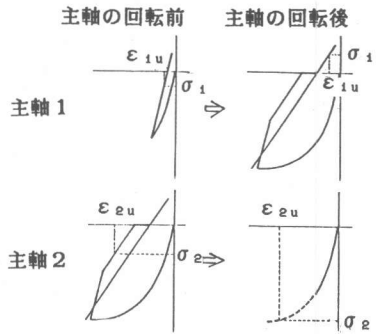


図-1 主軸の回転による不正応力の発生

のばね剛性に対し、ボンドリク要素が主筋要素と隣接するコンクリート要素との間にしかないと考えられる。このため本研究では、前出のボンドリク要素をコンクリートと主筋とのすべり挙動を再現するために取り入れる他、コンクリート材料のひび割れ後の等価一軸応力-ひずみ曲線を、図-2に示すように修正することにより引張剛性効果を考慮し、コンクリートと鉄筋の付着作用（かみあい、摩擦、ダボ作用等）が部材全体の挙動に及ぼす影響を考慮した。図-2に示す係数に対しては $\alpha =$

0.5、 $\beta = 1.0$ を仮定し、繰り返し挙動による付着劣化に対してはコンクリートのひび割れが閉じ再開するごとに α の値を半減させている。

またせん断加力を受けるシアスパン比 1.5の鉄筋コンクリート短柱の破壊挙動の大きな特徴に、付着割裂ひび割れの発生を挙げることができる。本研究では、この付着割裂ひび割れをコンクリート材料のひび割れとして解析モデル上で再現するため「付着割裂ゾーン」の概念を導入した。この付着割裂ゾーンは図-3に示すように、主筋、帯筋及び主筋周りの付着破壊によって生じるコンクリート断面の欠損に対し、このゾーンのコンクリートの引張強度を低下させることにより付着割裂ひび割れの発生をモデル化するもので、主筋に対し垂直方向の引張強度 f_{tb}' は主筋のすべり量の関数として次のように表わされる。

$$f_{tb}' = \frac{A_b - A_s - \alpha \cdot S}{A_b} \cdot f_t'$$

ここで f_t' ：コンクリート一軸引張強度（kg/cm²）、 A_b ：要素の全断面積（cm²）、 A_s ：鉄筋（主筋、帯筋）によって支配される面積（cm²）、 S ：主筋とコンクリートの相対すべり量（cm）式中 α は付着すべりに関する破壊係数であり、本研究では $\alpha = 3.6 \times 10^4$ を仮定している。さらに付着割裂ゾーン内のコンクリート要素の主応力方向や、第2主応力方向の圧縮力の影響を考慮して、付着割裂ゾーン内の付着割裂強度 f_{tb} を次のように修正した。

$$f_{tb}' = f_{tb}' \sin^2 \theta + f_t' \cos^2 \theta \quad \text{ここで } \theta : \text{主応力方向の角度}$$

$$f_{tb} = \beta f_{tb}' \quad \text{ここで } \beta = 1.0 - \frac{\sigma_c}{f_c'} \cdot \cos^2 \theta \geq 0.5$$

付着割裂ひび割れは付着割裂ゾーン内にあるコンクリート要素の主引張応力が、この付着割裂強度 f_{tb} を越えた時に発生するとした。

3. 解析概要

本研究において解析対象とする供試体は、図-4に示すような断面25cm×25cm、内法寸法75cm、シアスパン比 1.5、引張主筋比 $P_t = 0.98\%$ （6-D16）の鉄筋コンクリート短柱で、表-1に示すように、軸力、帯筋比、主筋の付着性状をパラメーターとして解析を行なった。解析対象とした供試体一覧を表-2に示す。解析モデルの要素分割を図-5に示す。要素分割は繰り返し載荷下の解析も考慮して点対称としている。また本解析で用いた材料定数を表-3に示す。

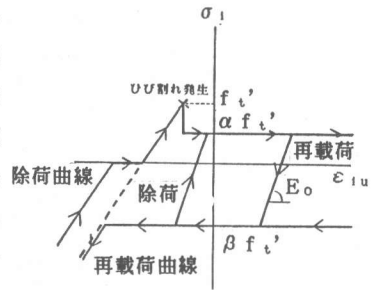


図-2 ひび割れ後の等価一軸応力-ひずみ曲線

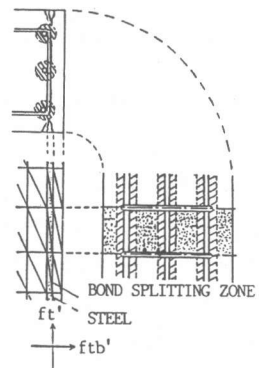


図-3 付着割裂ゾーンの概念図

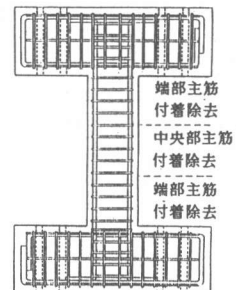


図-4 実験供試体

表-1 解析パラメーター

軸力 — 帯筋比・帯筋間隔 — 主筋本数・主筋の付着性状				
15t	0.85%	60cm	6本	B ; 付着健全
30t	1.28%			UE ; 端部付着除去
45t				UM ; 中央部付着除去

表-2 解析供試体一覧

一方向載荷、繰り返し載荷下の解析

15-0.85@60-6B	45-0.85@60-6B
---------------	---------------

パラメーター解析 (一方向載荷)

15-0.85@60-6B	15-0.85@60-6UE	15-0.85@60-6UM
15-1.28@60-6B	15-1.28@60-6UE	15-1.28@60-6UM
30-0.85@60-6B	30-0.85@60-6UE	30-0.85@60-6UM
30-1.28@60-6B	30-1.28@60-6UE	30-1.28@60-6UM
45-0.85@60-6B	45-0.85@60-6UE	45-0.85@60-6UM
45-1.28@60-6B	45-1.28@60-6UE	45-1.28@60-6UM

表-3 材料定数

コンクリートの材料定数

一軸圧縮強度 f_c' (kg/cm ²)	250.0
一軸引張強度 f_t' (kg/cm ²)	36.0
f_c' 時のひずみ量 ϵ_{cs}	0.0030
初期接線係数 E_c (kg/cm ²)	215000.0
ポワソン比 ν	0.18

鉄筋の材料定数

降伏強度 τ_y (kg/cm ²)	3780.0
初期弾性係数 E_s (kg/cm ²)	2100000.0
降伏後の係数 E_{sh} (kg/cm ²)	50000.0

鉄筋とコンクリートとの付着特性

すべり剛性 E_a (kg/cm ²)	10000.0
-----------------------------------	---------

4. 解析結果及び考察

第2章で述べた解析モデルを用いて、最初に一方向せん断載荷、正負繰り返しせん断載荷を受ける供試体の有限要素解析を行ない、筆者らが行なった実験結果と比較することにより解析モデルの妥当性を検討した。次に既往の実験研究で行なった主筋の付着を除去した供試体に対して解析を行ない、鉄筋コンクリート短柱のせん断破壊における破壊機構に関し考察を行なった。

4-1 一方向せん断載荷のケース

解析及び実験によるせん断荷重-水平変位図を図-6に

示す。両モデルとも解析結果は実験曲線に近い挙動を示している。軸力15tのモデルではせん断荷重10t時、軸力45tのモデルでは14t時で非線形挙動を起し始め、軸力15tのモデルではせん断荷重18t時、軸力45tのモデルでは20t時で大きな剛性低下を示している。図-7に鉄筋コンクリート短柱のせん断荷重ごとのひび割れパターンを示す。このひび割れパターンより曲げひび割れ、曲げせん断ひび割れ、端部せん断ひび割れ、付着割裂ひび割れなどの発生による鉄筋コ

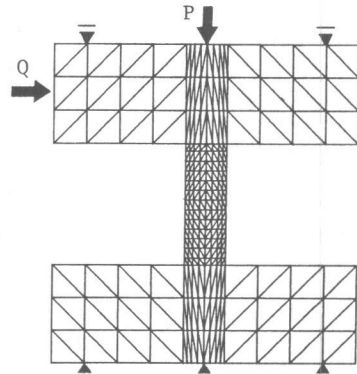


図-5 要素分割図

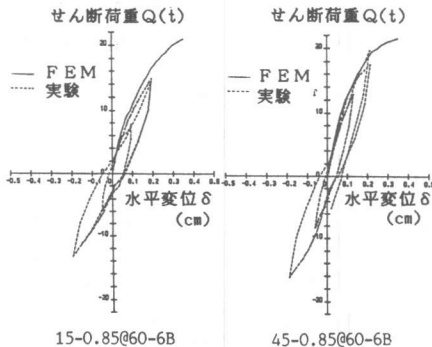


図-6 せん断荷重-水平変位図

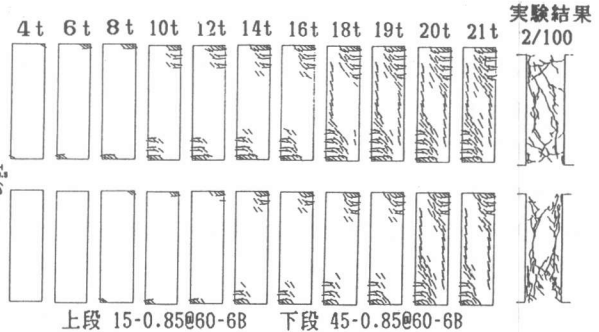


図-7 一方向載荷下のひび割れ図

コンクリート短柱の破壊過程が追跡でき、実験結果との良好な一致も見られた。図-8の帯筋応力図を見ると、軸力15tのモデルの方が端部での帯筋応力増加領域が大きくなっており、曲げせん断、端部せん断ひび割れの部材中央部への発生進展が確認されている。

4-2 正負繰り返しせん断載荷のケース

解析によって得られた履歴曲線と実験結果との比較を図-9に示す。解析と実験による履歴挙動はループ形状及びループ面積など良好に一致しており、特に低荷重域においては、ひび割れの開閉挙動によって示されるピンチ効果が本解析モデルによって良好に再現されている。図-10に繰り返し載荷下のひび割れ分布状況を示す。せん断荷重0t時におけるひび割れ状況においては、開いた状態にあるひび割れがかなり存在しており、図-9に示した履歴挙動におけるピンチ効果に大きく影響していると考えられる。

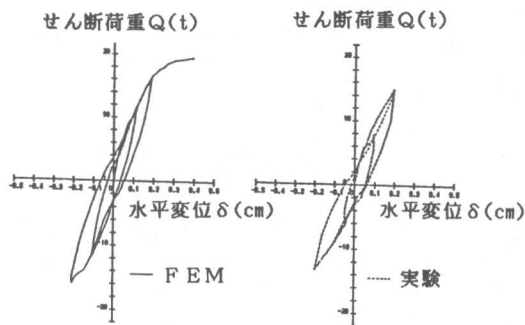


図-9 解析と実験による履歴挙動の比較
(15-0.85@60-6B)

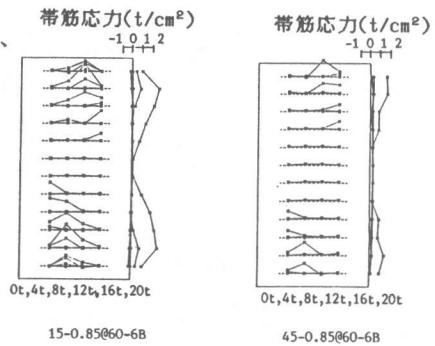


図-8 帯筋応力図

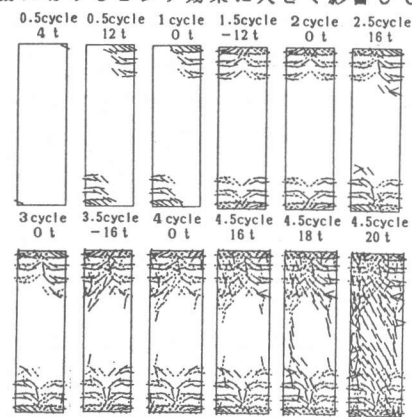


図-10 繰り返し載荷下のひび割れ図
(15-0.85@60-6B)

4-3 主筋付着性状をパラメータとした解析

最初に図-11に示すせん断荷重-水平変位図を見てみると、通常供試体(B)、主筋中央部付着除去の供試体(UM)、主筋端部付着除去の供試体(UE)は最大耐力時まではほぼ同様の挙動を示している。最大耐力時におけるせん断荷重で部材耐力を比較すると、UE供試体が最も耐力が小さく、次いでUM供試体、B供試体という結果が得られた。解析によるひび割れ図を実験結果とともに図-12に示す。曲げひび割れ、曲げせん断ひび割れ、端部せん断ひび割れ、付着割裂ひび割れへと破壊の進展を示すB供試体に対し、UM供試体は端部せん断ひび割れ後、部材圧縮端部の主筋に沿った付着割裂ひび割れ発生によって最大耐力に至っている。またUE供試体は曲げせん断ひび割れ発生後、部材中央部の主筋付着の健全な部分からせん断ひび割れを生じるとともに付着割裂破壊を起こし最大耐力となっている。実験研究においても得られた解析結果とほぼ同様な傾向を示している。以上の結果よりこれらの供試体の破壊性状を模式化したものを図-13に示す。ここではUM供試体、UE供試体とも曲げひび割れ、端部せん断ひび割れ等の発生後、主筋付着の健全な部分への力の集中を顕著に表わしている。

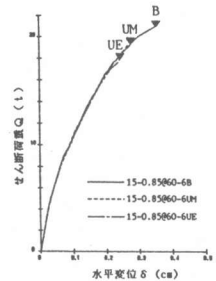


図-11 せん断荷重-水平変位図

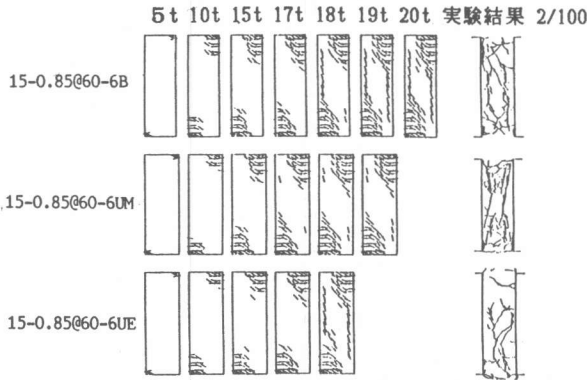


図-12 主筋附着除去供試体のひび割れ図

これらの結果を踏まえてシアスパン比1.5の鉄筋コンクリート短柱の破壊メカニズムを考察すると、図-14に示すような破壊の推移状況を考えることができる。すなわち最初に部材端に曲げひび割れ、曲げせん断ひび割れ、せん断ひび割れが発生することにより部材端部の主筋の附着効果が小さくなり、次に中央部に附着割裂ひび割れを生じることにより部材中央部の主筋附着が切断される。これによって最終的に形成される機構は軸力、せん断力に対し、部材中央部のコンクリートと部材圧縮端部における主筋の附着によって抵抗する状態で表わされる。

UE供試体は曲げせん断ひび割れ発生以降、UM供試体は附着割裂ひび割れ発生以降を考察する際に、最大耐力以降の挙動の追跡が難しい有限要素解析によって得られた結果を用いることができると考えられ、特に本解析結果からは部材圧縮端部における主筋の附着部分への力の集中が観察されている。

5. まとめ

本研究ではDarwin・Pecknold、野口・長沼の有限要素法による解析手法をさらに発展させた解析モデルを考案した。そして鉄筋コンクリート短柱の有限要素解析に適用した結果、一方向載荷下の解析及び正負繰返し載荷下の解析ともに実験結果との良好な一致を示した。

さらにこのモデルを用いて鉄筋コンクリート短柱の主筋の附着を一部除去した供試体の有限要素解析を行ない、得られた結果より鉄筋コンクリート短柱の破壊機構の考察を行なった。この際有限要素解析を鉄筋コンクリート短柱の最大耐力以後の破壊過程を追跡する上で、有効に用いることができた。

【参考文献】1) 田中他；「繰り返し加力を受ける鉄筋コンクリート短柱の破壊性状に関する研究」(その4)(その5)、日本建築学会大会学術講演梗概集、昭和62年8月 2) Darwin・Pecknold；"Elastic Model for Cyclic Biaxial Loading of RC" Univ. of Illinois, July 1974 3) 野口・長沼；「繰り返し荷重を受けるRC部材のせん断解析モデル」、第2回RC構造のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム論文集、昭和58年10月

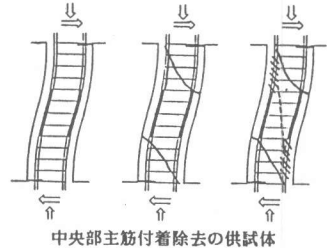
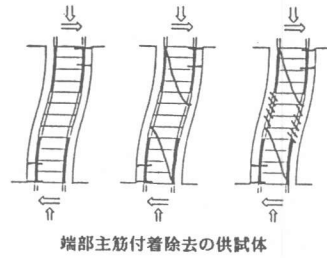


図-13 主筋附着除去供試体の破壊模式図

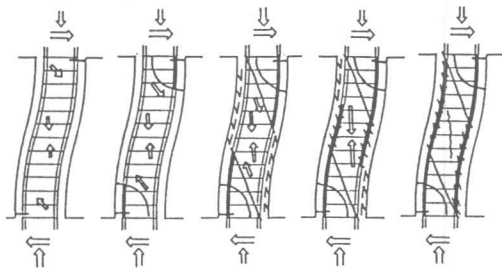


図-14 鉄筋コンクリート短柱の破壊機構