

論文

[2054] 地震時の鉄筋コンクリートのひびわれ開閉挙動に関する基礎実験

正会員 ○飯塚 崇文 (千葉大学大学院)
 秋満 亨 (大林組)
 正会員 野口 博 (千葉大学工学部)

1. はじめに

地震時のRC部材の復元力特性を解析的に精度よく把握するためには、ひび割れ開閉挙動に及ぼすひび割れ面での局部接触効果を適切に考慮した合理的なひび割れモデルの設定が必要である。野口・長沼は、正負繰返し載荷時のひび割れ開閉モデルとして、図1に示すクラックリンク要素の垂直剛性モデルを提案したが、このモデルには十分な実験的裏付けがなかった[1]。

そこで本研究では、RC部材の曲げ領域とせん断領域を想定したひび割れ開閉挙動実験を行い、ひび割れ面のせん断滑りが局部接触効果に与える影響を考慮したひび割れモデルを提案し、実験結果による検証を行う。

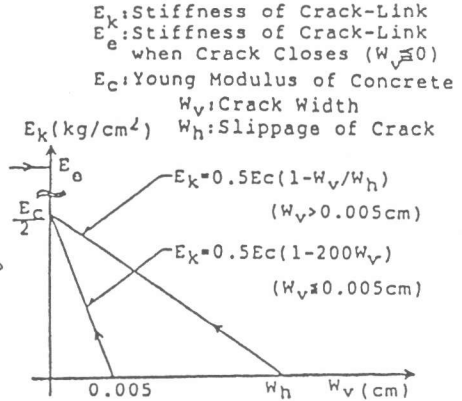


図1 クラックリンクの垂直剛性モデル

2. 実験概要

2.1 試験体と材料特性： 本実験で用いた試験体を図2に示す。試験体は、RC部材の曲げ領域とせん断領域のひび割れ面を想定した、20×20×70cmのRC角柱体とした。試験体数は16体とし、表1に示す。ひび割れ位置を限定する為に、試験体中央部にスリット (t=2mm、d=15mm) を設け、付着割裂防止のために鉄筋両端部に30mmの非付着域を設けた。変動因子は、1)せん断滑り量 (有無、一定値、比例増分)、2)ダボ作用 (有無)、3)内面せん断伝達効果 (有無) である。使用材料の力学的特性を表2に示す。粗骨材には、川砂利50%と採石50%の混合材 (JISの生コン用粗骨材規定) で、最大寸法25mmのものを使用した。

表1 試験体一覧

試験体名	せん断すべり量	
	一定値	比例増分
CIA1	0	
CIA2	0	
CIA3	0	
CIA4	0	
CIA5	0	
CIA6	0.25	
CIA7	0.5	
CIA8	0.75	
CIA9	1.0	
CIA10	1.5	
CIA11		0.2
CIA12		0.5
CIA13		0.5
CIA14	0.75	#1
CIA15	1.0	#1
CIA16	0.75	#2

#1 内面せん断伝達を除去
 #2 ダボ作用を除去

表2 使用材料の特性

鉄筋: D19		
降伏強度 (kg/cm ²)	引張強度 (kg/cm ²)	ヤング係数 (kg/cm ²)
3450.0	5085.0	1.77×10 ⁶
コンクリート		
圧縮応力度 (kg/cm ²)	引張強度 (kg/cm ²)	ヤング係数 (kg/cm ²)
269.0	22.5	2.1×10 ⁵

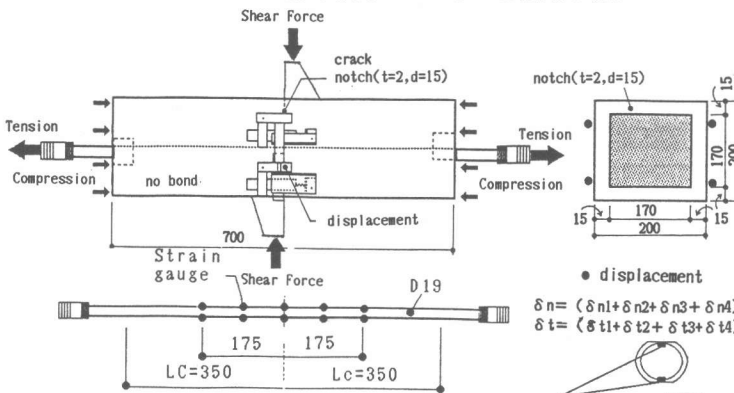


図2 試験体形状

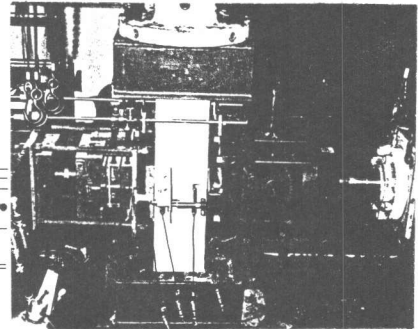
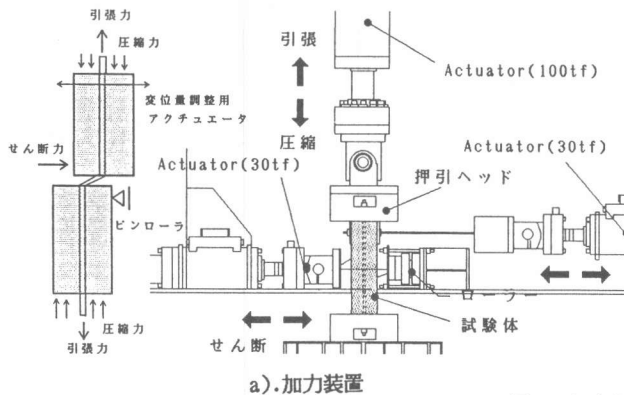


図3 加力装置

2.2 加力装置および測定方法： 加力装置を図3に示す。ひび割れ面に沿うせん断滑りは、30tfアクチュエータに加力プレートを介して与えた。均一なひび割れ幅とせん断滑り量が得られるように、試験体頂部に水平に取り付けた30tfアクチュエータにより調整した。引張・圧縮の正負繰り返し荷重は、100tfアクチュエータで行った。せん断滑りは、ひび割れ幅が目標ひび割れ幅の80%に達した時に与え、各サイクルで目標ひび割れ幅に達した後は、せん断滑り量を一定に保持して引張力の除荷から圧縮荷重、更に圧縮除荷へと移行した。最大圧縮応力度は、ひび割れ面の圧縮劣化が生じない程度の $1/3\sigma_n$ とした。ひび割れ幅とせん断滑り量は、図2に示す試験体側面の各4個所の変位計（精度 $1/1000\text{mm}$ ）測定値の平均とした。

3. 実験結果の考察

3.1 軸力とひび割れ幅の関係： 図4に、軸力とひび割れ幅の関係を示す。図4.aのせん断滑り量がない試験体（CIA5）は、既往の松崎・福山によるひび割れ閉閉モデル[2]とほぼ同様の挙動を示した。初期ひび割れは、割裂強度より小さい応力度で発生し、ひび割れ発生と同時にひび割れ幅はある一定量増大した。引張除荷域から圧縮荷重域では、ひび割れ幅が完全に閉合する前にひび割れ面の局部接触効果[3]により剛性が急増し、曲線が立ち上がる傾向にある。この局部接触時のひび割れ幅は、過去に経験した最大ひび割れ幅の値に比例して増加する傾向を示した。図4.a、bのせん断滑り量が一定値の試験体（CIA6、9、10）では、最大引張応力度まではせん断滑りがない試験体とほぼ同様の挙動を示した。引張除荷域から圧縮荷重域においては、せん断滑り量のない試験体に比べて早期から剛性の急増が生じた。この剛性の急増は、せん断滑り量の増大に比例して早期に生じている。せん断滑り量がある場合の局部接触時のひび割れ幅は、せん断滑り量の増加に比例して増大している。更に、せん断滑り量がない試験体では、最大圧縮応力度時でひび割れ幅は完全に閉合しているが、せん断滑り量がある試験体では、最大圧縮応力度時でも骨材の凹凸によりひび割れ幅の完全な閉合は見られなかった。この最大圧縮応力度時の残留ひび割れ幅は、せん断滑り量の値に比例して増大している。圧縮除荷域の剛性では、明確なせん断滑り量の影響は認められず、ひび割れの再開点まで高い剛性を有した。図4.cのせん断滑り量をひび割れ幅の増分に比例させた試験体（CIA11、12）は、圧縮荷重域の局部接触時のひび割れ幅、最大圧縮応力度時の残留ひび割れ幅、圧縮除荷域の再開ひび割れ幅等は、せん断滑り量が一定値の試験体と同様な傾向を示した。各サイクルのひび割れ幅は、せん断滑り量の増大に比例して増加する傾向を示した。図4.dのせん断滑り量 1.0mm を作用させた試験体（CIA9、15）では、ひび割れ面の凹凸を有する試験体（CIA9）で観察された局部接触時のひび割れ幅の増大、最大圧

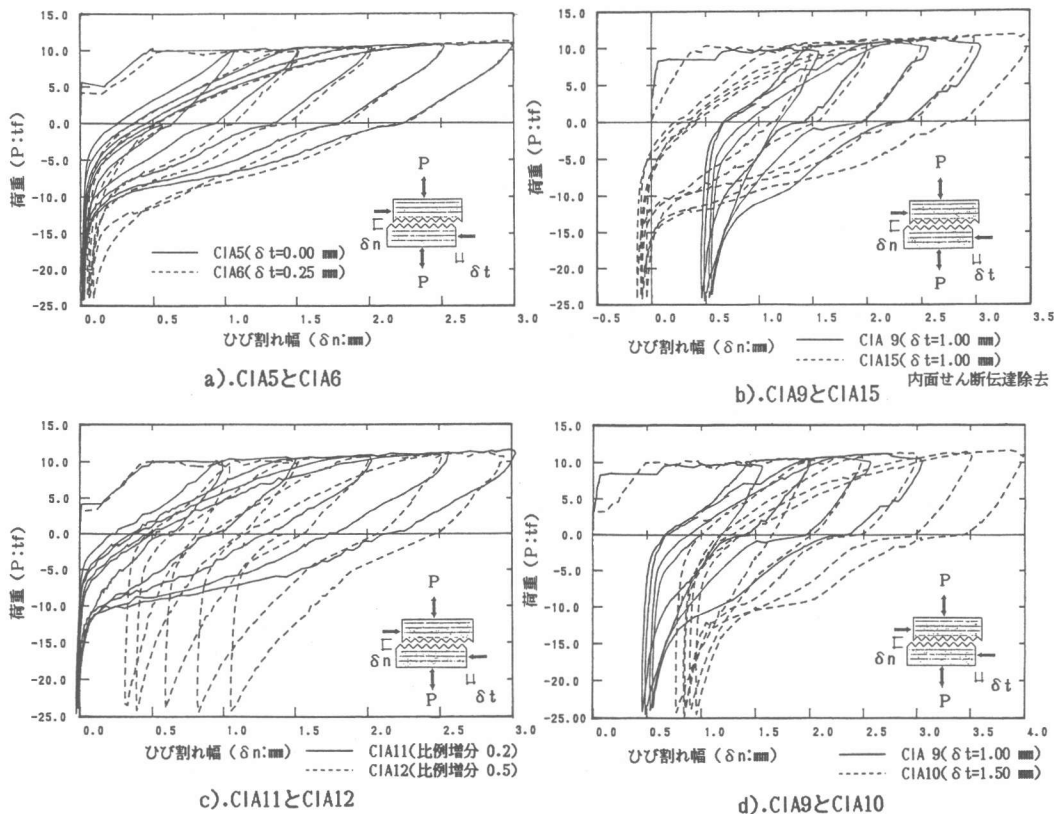


図4 軸力とひび割れ幅の関係

縮応力度時の残留ひび割れ幅の増大等の現象は、内面せん断伝達を除去した試験体 (CIA15) では認められなかった。

3.2 局部接触効果と圧縮荷域のモデル化： ひび割れ面の圧縮剛性は、局部接触以後生じると考える。局部接触時のひび割れ幅 δn は、せん断滑り量がない場合の局部接触時のひび割れ幅 $\delta n1$ とせん断滑り量の影響による局部接触時のひび割れ幅の増分値 $\delta n2$ の和として次式のように表現できると考える。

$$\delta n = \delta n1 + \delta n2 \quad \dots \dots (1)$$

せん断滑り量がない場合の局部接触時のひび割れ幅 $\delta n1$ は、図5に示すように過去に経験した最大ひび割れ幅 $\delta nmax$ の影響を受け、次式の実験評価式を得た。単位は、mmである。

$$\delta n1 = 0.138 \delta nmax \quad \dots \dots (2)$$

ここで実験定数 0.138は、本実験値、松崎・福山らの実験値[2]と飯塚・徳永による実験値[5]の相関性を最小自乗法により算出した。

過去に経験した最大ひび割れ幅 $\delta nmax$ に対する最大せん断滑り量 $\delta tmax$ の比 γmax を”ひび割れ最大せん断ひずみ”と定義する。図6に、せん断滑り量がある場合の局部接触点のひび割れ幅の増分値 $\delta n2$ とひび割れ最大せん断ひずみ γmax との関係を示す。図中の実線は、局部接触時のひび割れ幅の増分値 $\delta nc2$ の実験評価式であり、単位はmmである。

$$\delta n2 = 0.430 |\gamma max|^{1.15} \quad \dots \dots (3)$$

従って、せん断滑り量の影響も考慮したひび割れ面の局部接触点のひび割れ幅 δn は、式(2)と式(3)を式(1)に代入して得られる次式で求まる。単位は、mmである。

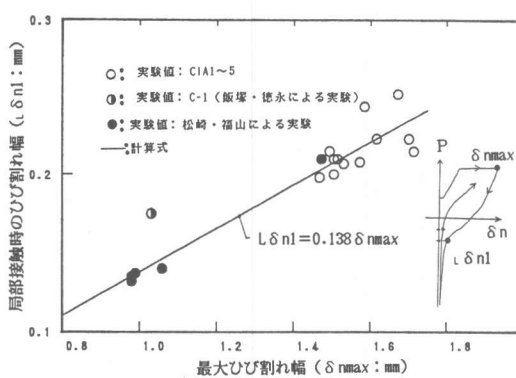


図5 一軸応力下の局部接触時のひび割れ幅と最大ひび割れ幅の関係

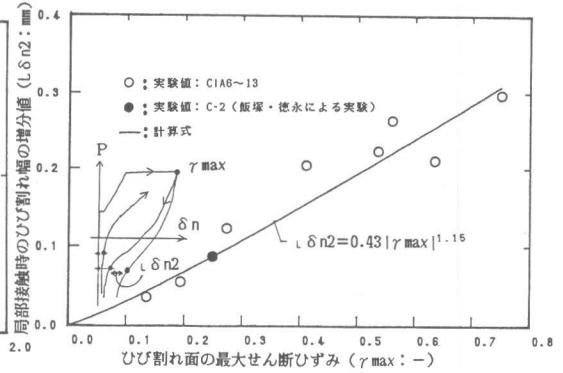


図6 局部接触時のひび割れ幅の増分値とひび割れ最大せん断ひずみとの関係

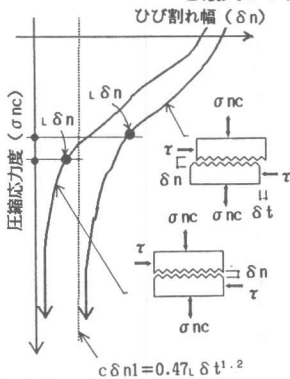


図7 圧縮荷域での軸力とひび割れ幅の関係モデル
 $L\delta n = 0.138 \delta n_{max} + 0.430 |\gamma_{max}|^{1.15}$
 $c\delta n1 = 0.47L \delta t^{1.2}$

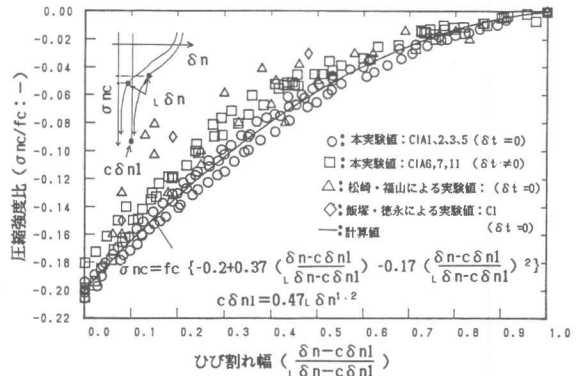


図8 圧縮荷域の軸力とひび割れ幅の関係

圧縮荷域での軸力とひび割れ幅の関係は、図7に示すようにひび割れ面にせん断滑り量がない場合は、 $c\delta n = 0$ を指向して閉合していくが、せん断滑り量がある場合には、最大圧縮応力時の残留ひび割れ幅 $c\delta n1 = \alpha \cdot L \delta t$ の関係で示される漸近線を指向して閉合していく考える[6]。最大圧縮応力時の残留ひび割れ幅 $c\delta n1$ は、局部接触時のせん断滑り量の影響を受け、次式のように定義する。単位は、mmである。

$$c\delta n1 = 0.47L \delta t^{1.2} \quad \dots \dots \dots (5)$$

図8に、本実験値、松崎・福山らによる実験値[2]、飯塚・徳永らによる実験値[5]を含めた圧縮荷域での圧縮強度比 σ_{nc}/f_c とひび割れ幅の関係を示す。図中の実線は、圧縮荷域での圧縮強度比の実験評価式であり、次式のように定義する。

$$\sigma_{nc}/f_c = -0.2 + 0.37 \frac{(\delta n - c\delta n1)}{(L\delta n - c\delta n1)} - \left\{ \frac{(\delta n - c\delta n1)}{(L\delta n - c\delta n1)} \right\}^2 \quad \dots \dots \dots (6)$$

上式を微分した次式が、圧縮荷域での垂直剛性となる。

$$C_{cn1} = f_c \left\{ \frac{0.37}{(L\delta n - c\delta n1)} - 0.34 \frac{(\delta n - c\delta n1)}{(L\delta n - c\delta n1)^2} \right\} \quad \dots \dots \dots (7)$$

3.3 再開ひび割れ点と圧縮除荷域のモデル化: ひび割れ面の圧縮剛性は、再びひび割れが開き出す再開ひび割れ点まで有すると考える。再開ひび割れ点のひび割れ幅 $r\delta n$ は、最大圧縮応力時の残留ひび割れ幅 $c\delta n$ の影響を受けると考える。図9に、本実験値、松崎・福山らによる実験値[2]、飯塚・徳永による実験値[5]の再開ひび割れ点のひび割れ幅 $r\delta n$ と残留ひび割れ幅 $c\delta n$ の

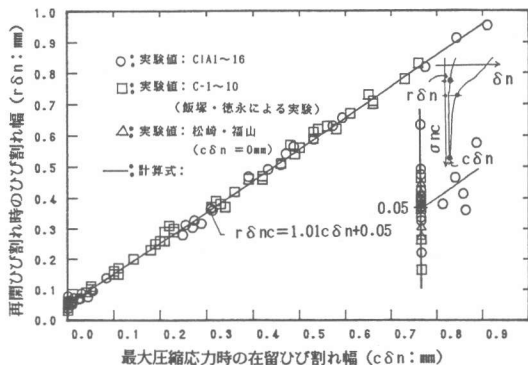


図9 再開ひび割れ時のひび割れ幅と残留ひび割れ幅の関係

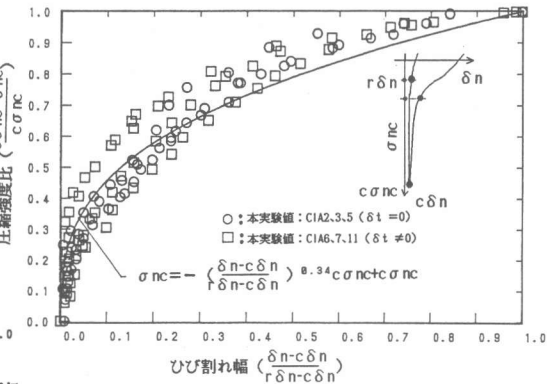


図10 圧縮除荷域での軸力とひび割れ幅の関係

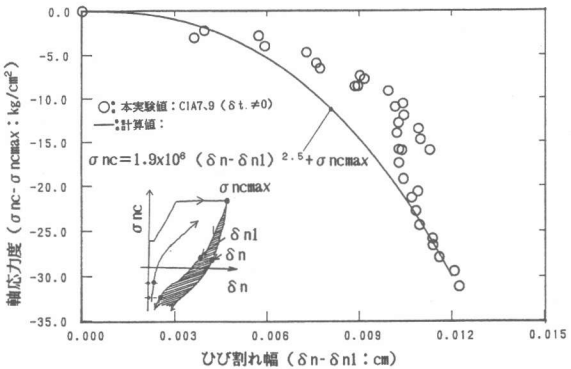


図11 鉄筋のダボ作用による軸応力度とひび割れ幅の関係 (δt≠0)

関係を示す。再開ひび割れ点のひび割れ幅 $r\delta n$ は、次式の一次式より求まる。単位は、mmである。

$$r\delta n = 1.01 \cdot c\delta n + 0.05 \quad \dots \dots \dots (8)$$

図10に、本実験値と飯塚・徳永による実験値[5]を含めた圧縮除荷域での圧縮応力度とひび割れ幅の関係を示す。圧縮除荷域での圧縮応力度とひび割れ幅の関係には、せん断滑り量の影響は認められなかった。図中の実線は、圧縮除荷域での圧縮応力度 σ_{nc} の実験評価式であり、次式のように定義する。ここで、最大圧縮応力度を $c\sigma_{nc}$ と定義する。単位は、kg/cm²とcmである。

$$\sigma_{nc} = - \left\{ \frac{\delta n - c\delta n}{r\delta n - c\delta n} \right\}^{0.34} c\sigma_{nc} + c\sigma_{nc} \quad \dots \dots \dots (9)$$

上式を微分した次式が、圧縮除荷域での垂直剛性となる。単位は、kg/cm²/cmである。

$$C_{cn2} = -0.34 \cdot c\sigma_{nc} \left\{ \frac{\delta n - c\delta n}{r\delta n - c\delta n} \right\}^{-0.66} \quad \dots \dots \dots (10)$$

3.4 ダボ作用の垂直剛性： 図11にひび割れ面を横切る鉄筋のダボ作用による垂直応力度とひび割れ幅の関係の実験結果と実験評価式を示す。ダボ作用による垂直剛性は、この実験評価式を微分した式5となる。ダボ作用による垂直剛性は、せん断滑り量の影響は認められず、ひび割れ幅の関数として表現出来た。

$$C_{dn} = 4.75 \times 10^6 (\delta n - \delta n1)^{1.5} \quad \dots \dots \dots (11)$$

4. ひび割れ垂直剛性モデル

図12に、局部接触点のひび割れ幅推定式(4)、圧縮載荷域での垂直剛性式(7)、再開ひび割れ幅推定式(8)、及び圧縮除荷域の垂直剛性式(10)を総合したひび割れ垂直剛性モデルを示

す。提案したひび割れ垂直剛性モデルとダボ作用による垂直剛性式(11)を用いた計算結果と実験結果を比較したものを図13~15に示す。実験で観察された局部接触時のひび割れ幅や残留ひび割れ幅が、せん断滑り量の値に比例的に増大することやひび割れ再開点のひび割れ幅が残留ひび割れ幅の影響を受けることが計算結果にも現われている。

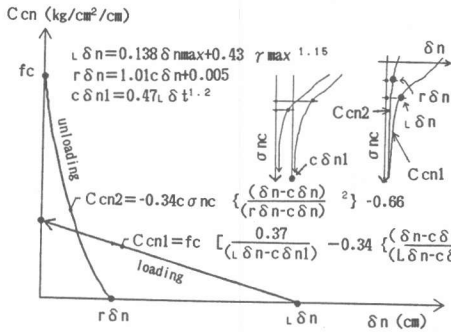


図12 ひび割れ垂直剛性モデル

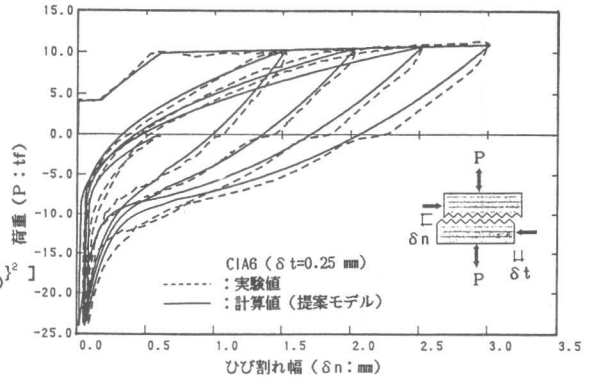


図13 荷重とひび割れ幅の関係 (δt=0.25mm)

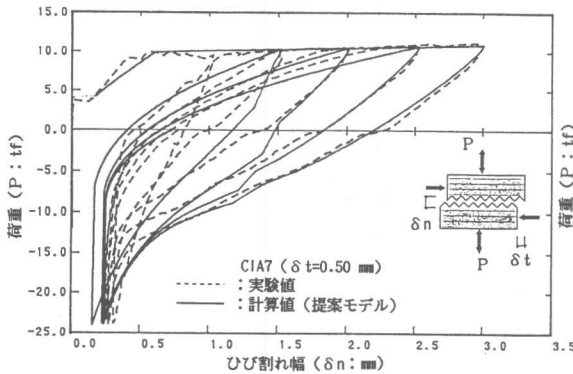


図14 荷重とひび割れ幅の関係 (δt=0.50mm)

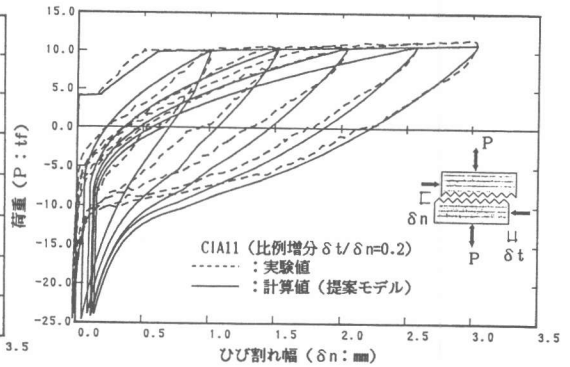


図15 荷重とひび割れ幅の関係 (δt/δn=0.2)

5. まとめ

本研究では、(1)RC部材の曲げ領域とせん断領域を想定したひび割れ開閉挙動実験により、ひび割れ垂直剛性モデルを提案した。(2)提案したひび割れ垂直剛性モデルによる計算結果と実験結果との比較検証を行い、提案モデルの妥当性を検討した。

【謝辞】

本研究は、文部省科学研究費補助金(総合研究(A)課題番号61302067、「RC構造のFEM解析の精度向上のための基礎実験と解析モデルの開発」研究代表者:森田司郎京都大学教授)を受けて行った。

【参考文献】

- 1) 野口博、長沼一洋: 繰返し荷重を受ける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、1983年10月、PP.97~104
- 2) 松崎育弘、福山洋、中沢春生、物部雅江: 鉄筋コンクリート造におけるひびわれ発生域の抵抗機構に関する実験研究、日本建築学会構造系論文報告集 第388号・昭和63年6月
- 3) 森田司郎、角徹三、須藤英司: 鉄筋コンクリート柱体の正負繰返し荷重下での変形挙動、第1回コンクリート工学年次講演論文集、1979年、PP.329~332.
- 4) 吉川弘道: 面内力を受けるRC部材の力学的挙動に関する解析モデル、(機間組特定研究報告、第2号、昭和62年5月。
- 5) 野口博、飯塚崇文、徳永雅昭: ひび割れの開閉挙動に及ぼすせん断滑りに影響に関する基礎実験、コンクリート工学年次論文報告集 pp.639~pp.644、1988