

[2114] ひびわれの開閉挙動に及ぼすせん断すべりの影響に関する基礎実験

正会員 野口 博(千葉大学工学部)
正会員 ○飯塚 崇文(千葉大学大学院)
徳永 雅昭(千葉大学大学院)

1. 研究目的

鉄筋コンクリート(RC)部材が、地震時のように正負繰返し荷重を受ける時の復元力特性を、FEMによる曲げせん断解析により精度良く把握するためには、ひび割れ開閉挙動におけるひび割れの局部接触効果の合理的なモデルの設定が重要となる。著者らは、以前にFEMによる柱梁接合部の正負繰返し載荷時の解析を行い、除荷時のひび割れの閉じ過ぎにより生じた除荷剛性の軟化現象に対し、Darwin²⁾、及び森田の研究³⁾を参考にして、ひび割れ面の局部接触効果を考慮し、徐々にクラックリンク要素のバネ剛性を復活させるように、図1に示すようにモデル化して、問題の解決を試みた¹⁾。その際、せん断力等によるひび割れに平行方向のずれ(図1の W_h)が大きいく程、局部接触効果が顕著に現れることを特に意図した。その結果、除荷時のひび割れの閉じ過ぎは防止され、除荷剛性もより実験結果に近づくことがわかった。しかし、このモデル化には十分な実験の裏付けがあるわけではないので、今後、復元力特性の解析精度を向上させるためには、最近の松崎・福山らによるひび割れ開閉実験⁴⁾のようにモデルを検証する基礎実験が必要である。そこで、本研究では、ひび割れ開閉挙動に及ぼすせん断すべりの影響に関する基礎実験を行い、本報告では、ひび割れ開閉挙動での局部接触効果とひび割れ再開開始点の定式化を試みることに重点を置いた。

2. 実験概要

2.1 試験体と変動因子

試験体形状を図2に、試験体一覧を表1に示す。試験体は、松崎・福山らの試験体⁴⁾と同一形状の断面20×20cm、長さ70cmのコンクリート直方体の中心に径19mmの異形鉄筋を埋め込んだもので、計10体(C1~C10)である。試験体表面のひびわれ位置を限定するために、試験体中央部に予めひび割れ発生誘導

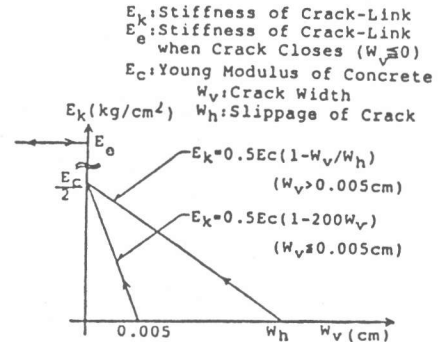


図1. ひび割れが閉じる時のクラックリンクのバネ剛性

試験体名	せん断すべり量(mm)	
	一定値	比例増分
C-1	0.00	
C-2	0.25	
C-3	0.50	
C-4	0.50	
C-5	0.75	
C-6	1.00	
C-7	1.00	
C-8	1.50	
C-9		0.33
C-10		0.50

表1. 変動因子別による試験体一覧表

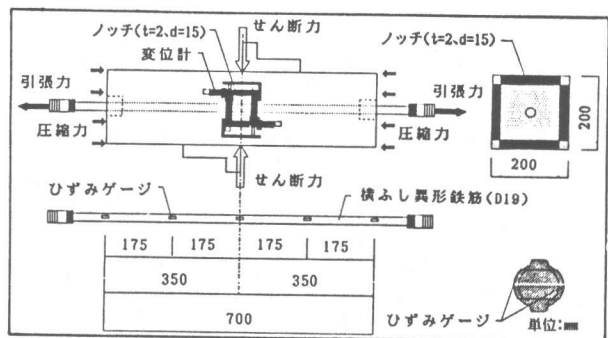


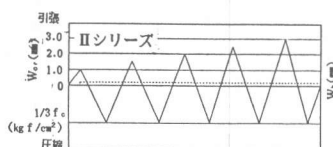
図2. 試験体形状図

のためのスリットを設け、厚さ2mm、深さ15mmの断面欠損を与えた。この断面欠損は、ひび割れ発生時の鉄筋の応力度が、降伏応力度の1/2以下となるように設けた。また、鉄筋両端部には割裂防止

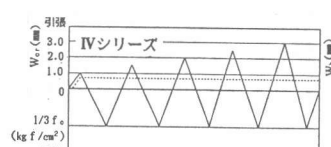
止のために端部から30mmの非付着域を設けた。本実験では、表1に示すようにひび割れ面でのせん断すべり量を変動因子とし、せん断すべり量を一定値 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 1.5mmとした場合、及びせん断すべり量をひび割れ幅に対して1/2倍、1/3倍を目標値として比例増加させた場合を対象とした。なお、使用したコンクリートと鉄筋の材料特性を表2に示す。

2.2 加力装置及び加力方法

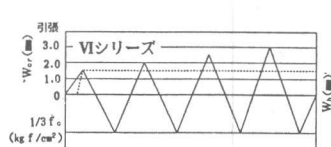
本実験の加力装置を図3に示す。加力は、引張・圧縮の交互繰り返し载荷を100tfアクチュエータ試験機で行い、引張力は鉄筋に、圧縮力は両端部のコンクリート面にのみ作用させた。試験体中央部ひび割れ面のせん断すべり量は、ひび割れ面の左右両方から50tfのアクチュエータ試験機を用いて与えた。载荷履歴は、図4に示すⅠ～Ⅷシリーズの8種類で各5サイクルまで载荷した。Ⅰシリーズは、せん断すべり量がなく、Ⅱ～Ⅵシリーズはせん断すべり量一定値でひびわれ幅のみを増加した、Ⅶ～Ⅷシリーズはせん断すべり量をひびわれ幅に対して1/2倍、1/3倍を目標値として比例増加させた。载荷は、まず、引張力を作用させてひび割れを発生させ、次にせん断力を漸増的に作用させながら引張力によりひび割れ幅を調節し、ひび割れ幅及びせん断すべり量が目標設定値に達した後、除荷に移った。圧縮载荷では、コンクリートの損傷を顕著には生じさせないように1/3FCを最大圧縮応力とした。



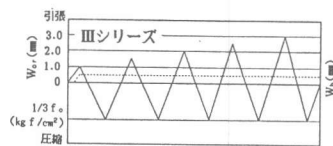
(C-2: せん断すべり量 0.25mm)



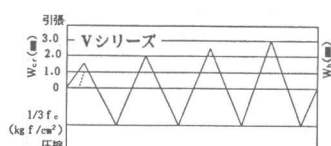
(C-5: せん断すべり量 0.75mm)



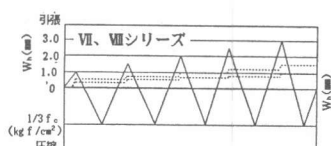
(C-8: せん断すべり量 1.50mm)



(C-3,4: せん断すべり量 0.50mm)



(C-6,7: せん断すべり量 1.00mm)



(C-9,10 せん断すべり量 比0.33,0.50)

図4. 载荷履歴図

2.3 測定箇所と測定方法

本実験では、ひび割れ幅及びせん断すべり量、鉄筋のひずみの測定、ひび割れの観察を行った。ひび割れ面のひび割れ幅及びせん断すべり量は、図2に示す試験体のひび割れ発生誘導面の側面8箇所の変位計の各4箇所毎の平均とした。また、鉄筋のひずみの測定は、付着を乱さないように各鉄筋ふし間に検長2mmのひずみゲージを5箇所、各点2枚ずつ、計10枚貼付け測定を行った。

3. 実験結果の検討

3.1 ひび割れ発生応力(f_t)

一軸引張りを受けるRC直方体の初期ひび割れ発生荷重(P_{or})を、 $P_{or}=f_t \times A_e$ から求めた。ここで、 f_t はひび割れ発生時の応力(kg f/cm^2)、 A_e はコンクリート等価断面積(cm^2)である。図5に本実験と、松崎・福山らの実験⁴⁾から得られた f_t/σ_t -かぶり厚(t)関係との比較結果を示す。全体として、本実験値は松崎・福山らの提案式をやや上回っているが、 f_t は σ_t より小さい。要因としては、鉄筋近傍の乾燥収縮等が考えられる。表3に f_t とコンクリート圧縮強度(f_c)及びコンクリート割裂引張強度(σ_t)との関係を示す。松崎・福山らの実験も参考にして、かぶり厚7.55cm程度の場合の f_t の評価式として、

$$f_t = 0.598 \times \sigma_t$$

が得られた。

3.2 荷重(P)-ひび割れ幅(W_{or})関係

図6に、せん断すべり量(W_h)を変動因子とした荷重(P)-ひび割れ幅(W_o)関係の実験結果を示す。各試験体とも初期ひび割れ発生時のジャンプ現象、その後のひび割れ位置の鉄筋降伏までの剛性低下型の曲線、さらに降伏後の曲線の折れ曲がり等は、松崎・福山らの提案モデル⁴⁾とほぼ等しいループ性状を示している。しかし、せん断すべり量の影響により引張載荷のピーク荷重からの除荷、更に圧縮載荷及びその除荷において、ひびわれの閉合及びひびわれの再開のループ性状に違いがみられる。せん断すべり量の値が大きくなるほど、圧縮載荷のピーク荷重時の残留ひび割れ幅の値も大きくなっている。また、せん断すべり量0.25mmが作用しているC-2試験体の第1サイクルではせん断すべり量の影響で早期にひび割れの閉合が生じているが、第2サイクル以降は第1サイクル圧縮時に於てひび割れ面の骨材やペースト粒子が接触による損傷を受けたと考えられ、せん断すべり量の無いループ性状に近づいていく傾向がある。それぞれ、せん断すべり量0.5mm、さらに0.75mmのC-3試験体、及びC-5試験体では、せん断すべり量の影響は第4サイクルまでは顕著であり、せん断すべり量が、1.0mm、1.5mmと大きいC-6及びC-8試験体では、全サイクルにわたってせん断すべり量による影響を受けていることがわかる。

3.3 ひび割れ面のコンクリートの局部接触

ひび割れ閉合時のひび割れ面での局部接触点を、ひび割れ幅及びせん断すべり量の動きと $P-W_{or}$ 曲線の剛性の変化により判断し、局部接触前後の測定データの平均中間点を局部接触点と定義した。図6から、せん断すべり量の値の大小と経験した各サイクル数の影響を検討してみると、せん断すべり量の値が小さい($0 < W_h < 0.5\text{mm}$)試験体では、第1、第2サイクルまではひび割れ面の骨材やペースト粒子の凹凸により、せん断すべりのために早期に局部接触が行われるが、第3サイクル以降は第1、第2サイクルの繰り返し引張・圧縮載荷により、ひび割れ面の凹凸に損傷が生

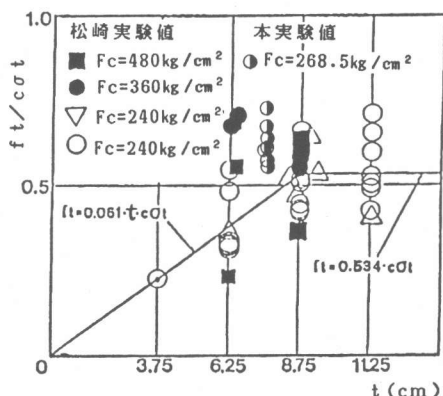


図5. f_t/σ_t -かぶり厚(t)関係

試験体名	f_t	f_t/σ_t	f_t/f_c
C-1	13.55	0.557	0.050
C-2	16.20	0.660	0.060
C-3			
C-4	14.76	0.607	0.054
C-5	18.15	0.746	0.067
C-6	13.20	0.543	0.049
C-7	10.95	0.450	0.040
C-8	14.17	0.583	0.052
C-9			
C-10	13.36	0.549	0.049
平均値	14.29	0.589	0.052
標準偏差	2.15	0.087	0.008

$f_c, f_t, \sigma_t (\text{kg f/cm}^2)$

表3. 相関関係表

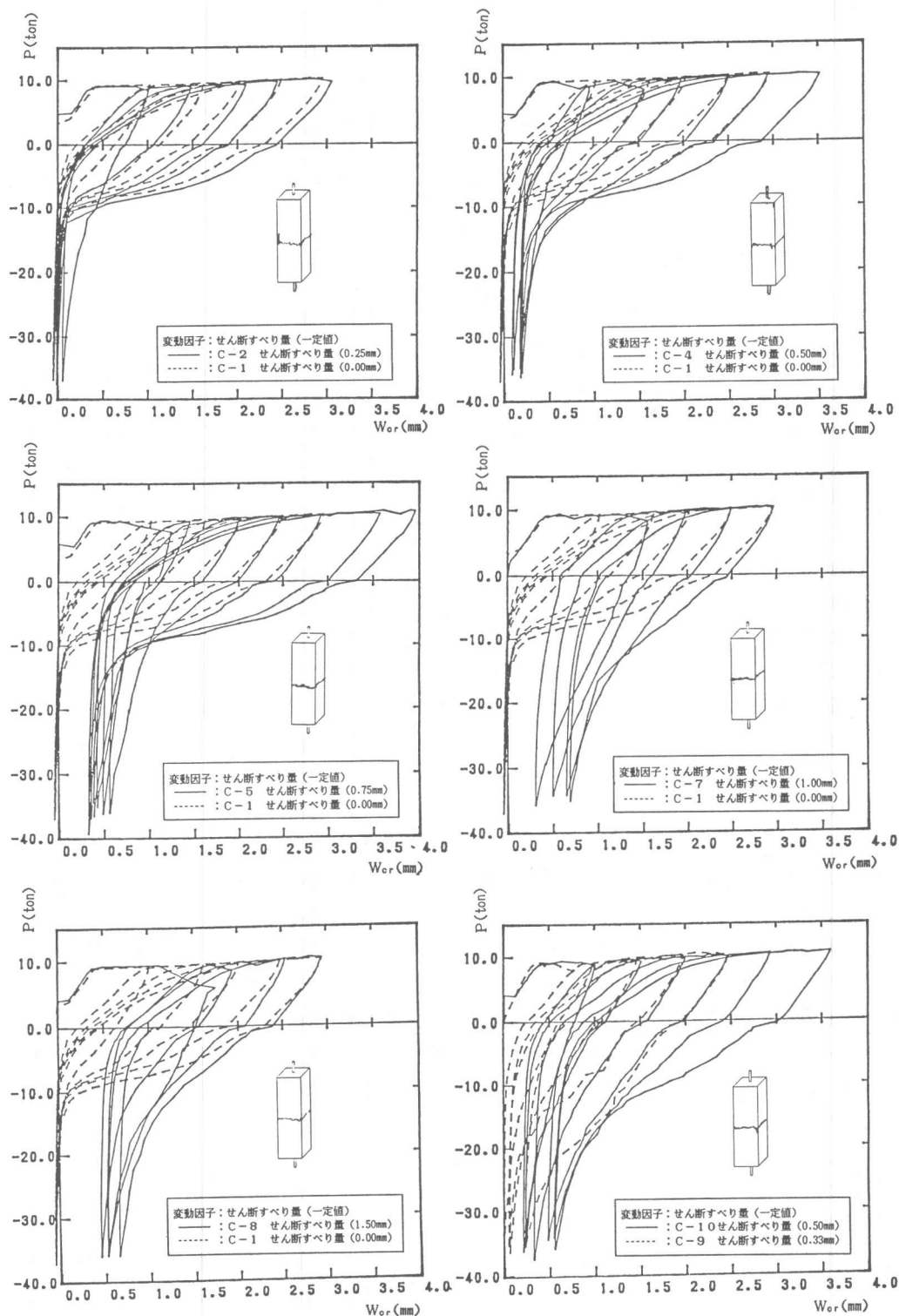


図6. 荷重(P)-ひび割れ幅(W_r)関係

じてきたため、せん断すべり量を与えていないC-1試験体のループ性状に近づいていくものと考えられる。また、せん断すべり量の値が大きい($0.5\text{mm} < W_h < 1.5\text{mm}$)試験体では、第5サイクル位までの圧縮荷重によるひび割れ面の凹凸の損傷よりもせん断すべり量の影響の方が大きく現れているためと考えられる。

表4に、局部接触時のひび割れ幅(W_T)に対する各サイクルでの(W_{hu}/W_{mu})との相関関係を示す。表より、せん断すべりが作用する場合の局部接触時のひび割れ幅は、残留せん断すべり量と残留ひび割れ幅との比に比例して増加していることが認められる。更に、繰返し荷重数の影響として、図6より繰返し荷重によるひびわれ面での凹凸の損傷のためサイクル数が増す毎に局部接触が早期に起こっていることも認められる。以上のことから W_T を評価するには(W_{hu}/W_{mu})を用いるのが妥当であると思われる、実験結果から得られる W_T の評価式として

$$W_T = \alpha \cdot (W_{hun}/W_{mun}) \quad (1)\text{式}$$

が得られた。ここで係数 α は、表4より1サイクルから順に5サイクルまで、1.19、1.54、2.31、3.42、4.22となる。また、せん断すべりが作用しない場合の局部接触時のひびわれ幅については、森田らの提案モデル³⁾による正負繰返し荷重実験によりコンクリートの剛性の復活がひび割れ幅の0.05mm前後で起こっていること、及び松崎・福山の提案モデル⁴⁾での正負繰返し荷重実験での局部接触時のひび割れ幅は、経験した最大ひび割れ幅に比例することが報告されている。以上のことから W_T の評価式として、松崎・福山の提案モデル⁴⁾式に森田らの提案モデル³⁾から導かれた、 $W_T = 0.05\text{mm}$ を代入することにより、

$$W_T = 0.234 \times W_{mu} \quad (\text{ただし、} W_{mu} \leq 0.22\text{mm}) \quad (2)\text{式}$$

が得られた。図7に局部接触時のひびわれ幅(W_T)に対する(W_{hu}/W_{mu})の関係式(1)と W_{mu} との関係式(2)を示す。

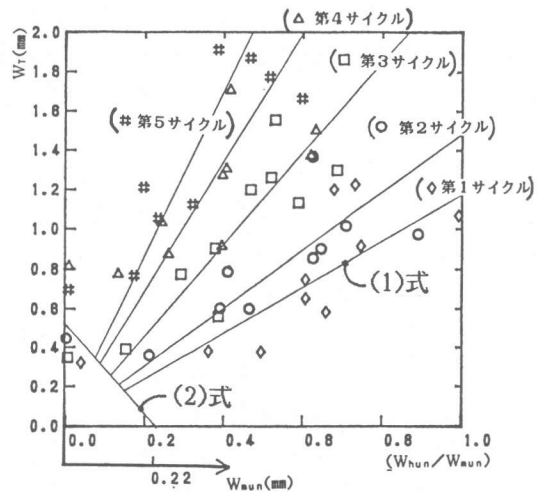


図7. 局部接触時のひび割れ幅(W_T)-(W_{hu}/W_{mu})関係

試験体名	第1サイクル			第2サイクル			第3サイクル			第4サイクル			第5サイクル		
	WT1	A	B	WT2	A	B	WT3	A	B	WT4	A	B	WT5	A	B
C-1	0.32	8.24	210.19	0.446	143.8	46409	0.349	55.39	8793.1	0.813	94.53	10992	0.696	92.8	12373
C-2	0.38	1.05	2.89	0.360	1.70	8.00	0.391	2.56	16.75	0.774	5.84	44.02	0.767	4.46	25.93
C-3	0.75	1.23	2.02	0.600	1.29	2.76	0.903	2.38	6.27	0.873	3.35	12.86	1.052	4.49	19.18
C-4	0.58	0.88	1.34	0.787	1.91	4.65	0.774	2.65	9.06	1.033	4.24	17.37	1.210	6.12	53.93
C-5	0.91	1.22	1.67	1.015	1.43	2.02	1.201	2.56	5.46	0.912	2.31	5.85	1.124	3.50	10.89
C-6	1.23	1.67	2.29	0.901	1.39	2.15	1.262	2.43	4.67	1.306	3.20	7.85	1.774	3.43	6.61
C-7	1.20	1.77	2.60	1.367	2.19	3.50	1.556	2.93	5.52	1.707	4.09	9.78	1.912	4.96	12.85
C-8	1.07	1.07	1.08	0.974	1.09	1.23	1.299	1.89	2.76	1.500	2.37	3.75	—	—	—
C-9	0.38	0.76	1.54	0.603	1.54	3.92	0.561	1.45	3.74	1.273	3.20	8.07	1.871	4.00	5.57
C-10	0.65	1.07	1.76	0.854	1.36	2.17	1.133	1.92	3.25	1.371	2.21	3.56	1.664	2.78	4.65
平均値	—	1.19	1.91	—	1.54	3.38	—	2.31	6.39	—	3.42	12.57	—	4.22	17.45
標準偏差	—	0.34	0.59	—	0.34	2.03	—	0.46	4.32	—	1.17	12.58	—	1.04	16.44

$A = W_T / (W_{hun}/W_{mun})$ 、 $B = W_T / (W_{hun}/W_{mun})^2$ ここで、nは各サイクルのサイクル数を表す。

単位: W_T 、 W_{hun} 、 W_{mun} (mm)

表4. 相関関係表

3.5 コンクリートのひび割れ再開開始点

ひび割れ閉合後、除荷していくと、まだ圧縮力が作用している間にひび割れが再び開き始める。

このひび割れ再開開始点も、局部接触点判断の場合と同様にひび割れ幅及びせん断ずれ量の動きと $P-W_{cr}$ 曲線の剛性の変化により判断し、再開開始点前後の測定データの平均中間点を再開ひび割れ開始点と定義した。表5に、ひび割れ再開開始点のひび割れ幅(W_{co})と圧縮荷重時の残留ひび割れ幅(W_{cm})との相関関係を示す。ひび割れ再開開始点のひび割れ幅は圧縮荷重のピーク荷重時の残留ひび割れ幅にほぼ比例して増大していることがわかる。以上のことから W_{co} の評価式として、

$$W_{co} = 1.20 \times W_{cm} \quad (3)式$$

が得られた。図8にひび割れ再開開始点のひび割れ幅 (W_{co}) に対する圧縮荷重のピーク荷重時の残留ひび割れ幅(W_{cm})との関係式(3)を示す。

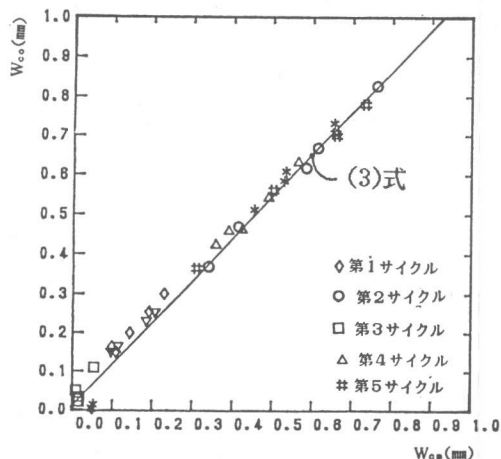


図8. ひび割れ再開開始時のひび割れ幅(W_{co})-(W_{cm})関係

試験体名	第1サイクル			第2サイクル			第3サイクル			第4サイクル			第5サイクル		
	W_{co}	W_{cm}	A	W_{co}	W_{cm}	A	W_{co}	W_{cm}	A	W_{co}	W_{cm}	A	W_{co}	W_{cm}	A
C-1	0.004	-0.05	0.07	0.001	-0.05	0.01	0.002	-0.05	0.03	0.002	0.404	0.00	-0.05	0.346	0.12
C-2	0.11	0.05	2.20	0.05	-0.01	0.83	0.02	-0.01	0.66	0.03	-0.02	0.60	0.02	-0.02	0.50
C-3	0.30	0.23	1.30	0.25	0.19	1.31	0.2	0.143	1.39	0.15	0.11	1.36	0.16	0.10	1.60
C-4	0.26	0.20	1.30	0.15	0.10	1.50	0.17	0.11	1.54	0.23	0.18	1.27	0.26	0.21	1.23
C-5	0.46	0.42	1.09	0.54	0.49	1.10	0.63	0.56	1.12	0.46	0.39	1.17	0.42	0.36	1.16
C-6	0.37	0.34	1.08	0.47	0.42	1.11	0.62	0.58	1.06	0.67	0.61	1.09	0.83	0.76	1.09
C-7	0.37	0.31	0.68	0.56	0.50	1.12	0.71	0.66	1.07	0.78	0.73	1.06	0.70	0.66	1.06
C-8	0.59	0.53	1.11	0.51	0.46	1.10	0.61	0.53	1.15	0.73	0.65	1.12	—	—	—
C-9	0.03	-0.01	0.75	0.10	0.05	2.00	0.09	0.04	2.25	0.31	0.22	1.40	0.38	0.33	1.15
C-10	0.29	0.21	1.38	0.29	0.23	1.26	0.39	0.32	1.21	0.57	0.48	1.18	0.62	0.54	1.14
平均値	0.31	0.25	1.21	0.32	0.27	1.26	0.38	0.33	1.27	0.44	0.37	1.14	0.42	0.37	1.12
標準偏差	0.17	0.17	0.44	0.20	0.20	0.33	0.27	0.26	0.44	0.27	0.26	0.23	0.28	0.27	0.30

$$A = W_{co}/W_{cm} \quad \Sigma n = 15 \quad W_{co}/W_{cm} / n = 1.20$$

単位: W_{co} 、 W_{cm} (mm)

4. まとめ

ひび割れ発生域での開閉挙動に及ぼすせん断すべりの影響に関し、局部接触点とひび割れ再開開始点等の評価式を得ることができた。今後、FEMによる解析精度の向上のために、松崎・福山らによるひび割れ開閉モデルのようにひび割れ開閉挙動全域にわたりモデル化を試み、更にFEM解析モデルに組み込んで行くことが大切である。

【謝辞】本研究は科学研究費補助金(総合研究(A)課題番号61302067、研究代表者:森田司郎京大教授、研究課題: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)を受けて行い、実験は千葉大学工学部建築工学科実験棟で行った。

【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)Darwin, D. and Pecknold, D.A., "Irreversible Model for Cycle Biaxial Loading of RC," Univ. of Illinois, UIU-ENG-2018, 1974, PPS.169
- 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)松崎育弘、福山洋、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(その3) 実験概要及び付着特性(その4) ひび割れ性状、日本建築学会大会学術講演梗概集、1987、PP.529~370、昭和62年度科学研究総合A鉄筋コンクリート造に於けるひび割れは発生域の抵抗機構に関する実験研究(要因 コンクリート強度、鉄筋本数、補強筋)中間報告レポート、1987年11月
- 5)Fardids M., Buyukozturk O.: "Shear Transfer Model for Reinforced Concrete", ASCE, Journal Engineering Mechanics Division, Apr.1979.