

論文

[2053] ひびわれコンクリートの圧縮特性の劣化に関する基礎実験

正会員 ○大久保 雅章 (千葉大学大学院)
 濱田 聡 (戸田建設建築設計統轄部)
 正会員 野口 博 (千葉大学工学部)

1. はじめに

ひび割れ間のコンクリート圧縮ストラットの応力-ひずみ関係は、シリンダーに比べ耐力、剛性ともに低下することが平板実験で指摘されている [1]。せん断補強されたRC構造部材のせん断耐力は、コンクリートストラットの圧縮強度に支配されるので、この耐力、剛性の低下現象は、RC部材のせん断挙動の解析モデルの構築のために、重要な問題であるが、そのメカニズムについてはまだ不明な点が多い [2]。本研究では、既往の平板実験より簡単な装置により、コンクリートのひび割れ直交方向ひずみを変動因子とした一定引張応力下における小型RC平板の圧縮実験を行い、ひび割れコンクリートの圧縮耐力、剛性の低下に与える影響因子について検討し、共同研究 [3]の一環としてFEM解析やマクロモデル解析の精度向上に役立てることを目的とした。

2. 実験概要

2.1 試験体: 本実験の試験体は図-1に示すような小型平板で、寸法は、長さ 35cm、高さ 20cm、厚さ 5cm で、試験体の両端部から 2.5cm の区間は、鉄筋とコンクリートの付着を除去した。変動因子は、1) 鉄筋径 (付着面積)、2) ひび割れ直交方向の平均引張ひずみであり、試験体数は 19 体である。配筋は、鉄筋比を同程度とし、付着が悪い 4-D10、良い 8-D6 の2種類とした。試験体諸元及び実験結果を表-1に示す。

2.2 加力及び測定方法: 本実験に用いた加力装置を図-2に示す。始めに水平方向の引張力を鉄筋に載荷して、コンクリートにひび割れを発生させ、平均引張ひずみが所定の値に達したら、その状態で引張力を保持したまま、鉛直方向の圧縮力を最大耐力まで単調載荷で加力した。圧縮載荷においては、試験体圧縮面の摩擦による変形拘束を除去するために、コンクリート圧縮面と載荷板の間にカップグリースを塗布した厚さ 0.1 mm のテフロンシート 2枚を挿入した。加力中は、図-3に示す測定装置により、コンクリートの圧縮方向変形、コンクリートの引張方向のひび割れを含む伸び量、試験体端部からの抜け出しを含めた鉄筋の伸び量を、それぞれ 4 個の変位計で測定し、これを測定区間の標点距離で除してひずみに変換した。この他、鉄筋のひずみ、引張荷重及び圧縮荷重を測定した。

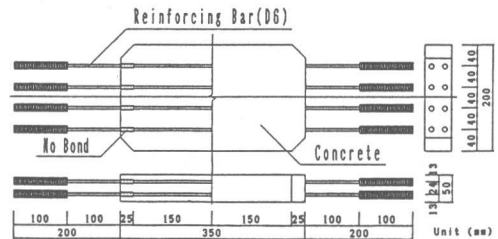


図-1 試験体詳細図

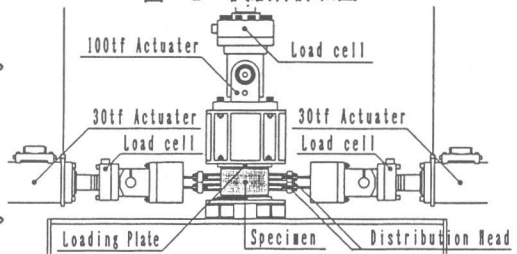


図-2 加力装置

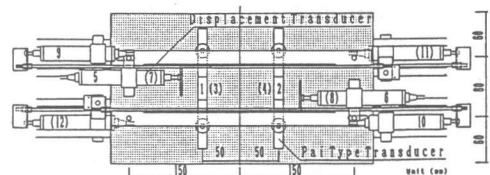


図-3 測定装置

2.3 材料特性：本実験に使用した材料の力学的特性を表-2に示す。なお、シリンダーの圧縮試験は、平板実験と同様に圧縮面の摩擦拘束を除去して行った。

3. 実験結果

3.1 ひび割れ状況及び鉄筋ひずみ分布：図-4に試験体 P-7、P-18の引張載荷終了時におけるひび割れ図及び鉄筋のひずみ分布を示す。ひび割れ発生状況は、鉄筋の付着面積の大きい D6 試験体の方が、D10 試験体よりも同一ひずみレベルにおける平均ひび割れ間隔、平均ひび割れ幅ともに小さくなった。また、鉄筋のひずみ分布においても D6 試験体ではひずみが全域にわたって均一に増大しているのに対し、D10 試験体では局所的なひずみの増大が著しいことがわかる。

3.2 引張応力-平均ひずみ関係：図-5は、テンションスティフニング効果によりコンクリートが負担する平均引張応力 ($c\sigma_1$) と平均引張ひずみ (ε_1) の関係である。鉄筋コンクリート中の鉄筋の平均応力-平均ひずみ曲線は、ひび割れ面で鉄筋が降伏しても、ひび割れ間の鉄筋は降伏点以下の部分が存在するため、図-6のように鉄筋降伏近傍から鉄筋単体の応力-ひずみ曲線と異なる性状を示す[4]。そこで、 $c\sigma_1$ の算出においては、鉄筋のひずみ分布から得られる鉄筋の応力分布により求めた鉄筋の平均応力-平均ひずみ関係を用い、同一ひずみにおける鉄筋コンクリートと鉄筋の平均応力の差に鉄筋比を乗じて $c\sigma_1$ を求めた。ひび割れ発生時の平均応力 f_{cr} の平均値は 11.1 kgf/cm^2 で、割裂強度 f_t の約 45%であった。両試験体の $c\sigma_1 - \varepsilon_1$ 関係は、ひび割れ発生から 2000μ 付近まで、 $c\sigma_1$ は付着の良い D6 試験体の方が大きく、鉄筋降伏以降は同様な傾向を示し、テンションスティフニング効果は消滅することなくコンクリートは引張力を負担している。

表-1 試験体諸元および実験結果一覧

試験体	配筋	平均引張ひずみ		圧縮強度 f_{cz} (kgf/cm^2)	圧縮強度 低減係数 λ
		引張終了時 ε_{11} (μ)	圧縮破壊時 ε_{1c} (μ)		
P-1	4-D10	0	740	236	0.945
P-2	#	1390	1950	207	0.829
P-3	#	3600	4520	188	0.753
P-4	#	4420	5520	192	0.769
P-5	#	7520	8870	173	0.693
P-6	#	8280	8920	172	0.689
P-7	#	10290	11650	165	0.661
P-8	#	13160	14380	168	0.673
P-9	#	19100	19410	145	0.581
P-10	8-D6	0	660	243	0.973
P-11	#	1460	2320	211	0.815
P-12	#	2190	3530	183	0.733
P-13	#	3730	4880	148	0.593
P-14	#	5690	7940	166	0.665
P-15	#	6290	7770	181	0.725
P-16	#	6280	7300	164	0.657
P-17	#	8820	9680	171	0.685
P-18	#	11940	12950	174	0.697
P-19	#	18800	19590	138	0.553

表-2 材料特性

鉄筋				
鉄筋種	降伏強度 (kgf/cm^2)	降伏ひずみ (μ)	ヤング係数 (kgf/cm^2)	引張強度 (kgf/cm^2)
D10	3681	1998	1.84×10^9	5390
D6	4375	2614	1.67×10^9	5630

コンクリート

圧縮強度 f_c (kgf/cm^2)	f_c 時軸ひずみ ε_c (μ)	ヤング係数 E_c (kgf/cm^2)	引張強度 f_t (kgf/cm^2)	最大骨材 粒径 (mm)
249.7	1988	2.24×10^9	24.7	10

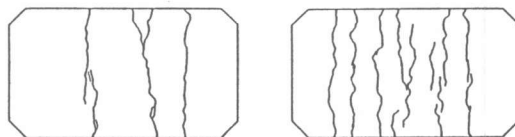


図-4 ひび割れ図および鉄筋ひずみ分布

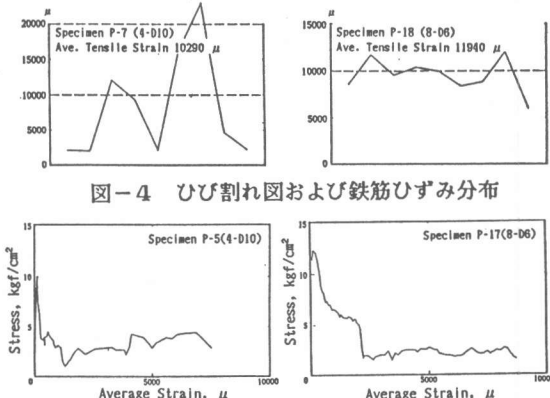


図-5 コンクリート平均応力-平均ひずみ関係

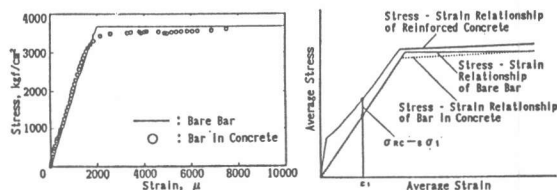


図-6 鉄筋応力-ひずみ関係および平均応力算定方法

3.3 圧縮応力-ひずみ関係：図-7に、導入した平均引張ひずみレベルごとの圧縮応力 ($c\sigma_2/f_c'$) - ひずみ ($\varepsilon_2/\varepsilon_0$) 関係を示す。各図中の破線は、ひび割れを導入していない平板試験体 (P-10) の応力-ひずみ曲線である。全試験体にわたり、初期剛性がサイリダーの剛性よりも高めとなった。ひび割れを導入した試験体においては、圧縮強度が引張ひずみレベルの増大にともなって低下していく傾向がみられる。また、初期剛性には明確な違いはみられないが、圧縮強度の低下にともなって低応力レベルで剛性が低下する傾向があり、剛性低下の度合は圧縮強度の低下にほぼ対応している。

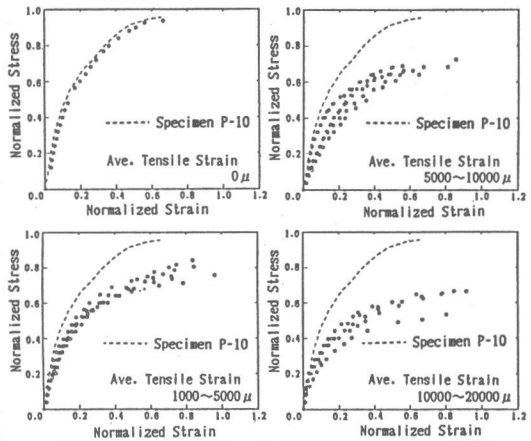


図-7 コンクリート圧縮応力-ひずみ関係

3.4 圧縮強度低減係数：サイリダーの圧縮強度 (f_c') に対する各試験体の圧縮強度 (f_{c2}) の比を圧縮強度低減係数 λ ($=f_{c2}/f_c'$) と定義する。

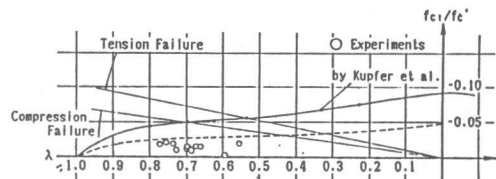


図-8 圧縮強度低減係数-平均引張応力関係

鉄筋コンクリート部材では、鉄筋とコンクリートの付着作用により、ひび割れ間のコンクリートに引張応力が生じ、それによりコンクリートの圧縮強度が低下すると考えられる。図-8は Kupfer 等のコンクリート二軸破壊包絡線 [5] の引張-圧縮領域に、本実験の結果をプロットしたものである。鉄筋コンクリートにおけるコンクリートの引張応力分布は、要素内では様にならない。そこで、引張応力には前述の平均応力の値を用い、これに対応して $f_{c2}=0$ 時の引張強度には、ひび割れ発生時のコンクリート平均応力 f_{cr} の平均値を用いた。図中の破線が平均応力で考えた本実験の破壊包絡線を表わす。全試験体ともに破壊包絡線内で破壊に至っている。これは、異形鉄筋の節から生じるコンクリート内部の劣化が累積されていくためと考えられる。

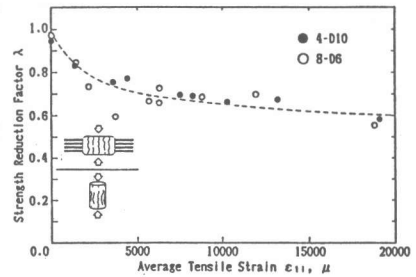


図-9 圧縮強度低減係数-平均引張ひずみ関係

次に λ と引張載荷終了時の平均引張ひずみ ε_{t1} の関係を図-9に示す。 λ は導入した平均引張ひずみが 5000μ 以下の領域では、 ε_{t1} の増大にともなって急激に低下しているが、 5000μ を越えた付近から低下の度合が小さくなり、最終的には60%程度に収束していくようである。付着面積の異なる D10、D6両試験体では、前述したようにひび割れの発生状況が大きく異なっていたにもかかわらず、これら両者をひび割れを含む平均引張ひずみとして表現してしまえば、強度低下の度合は同様な傾向を示すことになる。

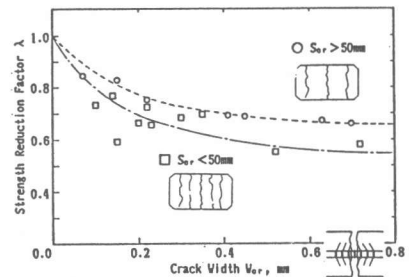


図-10 圧縮強度低減係数-ひび割れ幅関係

ここで、ひび割れ幅とひび割れ間隔の強度低下への影響を調べるために、 λ と平均ひび割れ幅

W_{cr} の関係を図-10に示す。図中の○は平均ひび割れ間隔 S_{cr} が 50mm以上の試験体、□は 50 mm 以下の試験体を表わす。 W_{cr} の増大に伴って圧縮強度は低下し、 S_{cr} が小さな試験体の方が同程度の W_{cr} に対して強度の低下が大きくなる傾向がみられる。同様な結果が、前川等の円筒試験体による実験結果からも得られている [6]。引張ひずみの増加は、主にひび割れ幅の増大とひび割れ本数の増加（ひび割れ間隔の減少）に依存する。ひび割れ幅の増大は、鉄筋のすべりによる抜け出しと見なせ、異形鉄筋の場合、これにより鉄筋周辺の内部ひび割れが進行する。また、ひび割れ発生と同時に、コンクリートの引張力は解放されるが、ひび割れ近傍のコンクリートは、ひび割れ発生以前に導入される引張力により損傷を受けている。ひび割れ間隔の減少は、損傷を受けたコンクリート領域の増大であると考えられる。圧縮強度の低下は、ひび割れ幅の増大やひび割れ間隔の減少によって生じるが、両者の共存によりそれぞれの影響が相殺し合って、見かけ上ひび割れを含めた平均引張ひずみにより耐力の低下を評価できると考えられる。

4. 既往の実験結果との比較及び検討

図-11は、Collins 等のλ算定式と本実験結果との比較である。なお、ここでの平均引張ひずみには、圧縮荷重時のポアソン効果によるひび割れ直交方向のひずみ増分を含めてある。本実験結果では $\epsilon_{1u}/\epsilon_0 = 2.0$ 以上の領域では、著しい耐力低下が生じていない点が Collins等の提案式と異なっている。これには、Collins 等のせん断型加力ではひび割れ面での骨材の噛み合い等による多軸効果が含まれ、また試験体が斜め配筋のため圧縮及び引張方向における変形が相互に作用し合い耐力低下が大きくなる [7]といった力学的性状と、試験体の厚さと高さの比が Collins等の実験では1/8~1/10と細長く終局時に鉄筋の座屈が顕著なので、本実験では1/4と比較的太短い試験体とした寸法的性状の違いが影響していると思われる。水平力と軸力が同時に作用し周辺フレームが壁板の広がり拘束する耐震壁では、ひび割れ発生後の応力状態は純せん断よりも圧縮力が支配的な二軸引張-圧縮状態になると考えられる。また耐震壁では、平板の様に鉄筋が面外へ座屈することはなく、コンクリートが圧壊することが多い。これらのことから、Collins 等の算定式から得られる値をそのまま用いると耐力を過小評価する可能性があると思われる。そこで本研究では、Collins 等の提案式を基に平均引張ひずみを用いて、ひび割れ履歴を受けることによるコンクリートの圧縮強度低下の推定式を求めた。

$$\lambda = \frac{f_{c2}}{f_c'} = \frac{1}{0.27 + 0.96 \cdot (\epsilon_{1u}/\epsilon_0)^{0.167}} \quad (\leq 1)$$

ϵ_{1u} : 圧縮破壊時平均引張ひずみ

ϵ_0 : シリンダー圧縮強度時軸ひずみ

5. まとめ

既往の平板実験よりも簡単な実験装置による小型RC平板の二軸荷重実験により、ひび割れたコンクリートの圧縮強度低下の影響因子について検討し、圧縮強度低減係数λの算定式を求めた。

【謝辞】 本研究は、文部省科学研究費補助金（総合研究A、研究課題番号 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：森田司郎京都大学教授）を受けて行った。

《参考文献》

- [1] Vecchio, F.J. and Collins, M.P. : The Modified Compression-Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear, ACI Journal, Proceedings Vol. 83, pp. 219~231, March-April 1986. [2] 白井 伸明, 白石 一郎, 村上 利憲 : RC耐震壁の終局強度に関する既往のマクロモデルについて、RC耐震壁のマクロモデルとFEMミクロモデルに関するパネルディスカッション論文集、日本コンクリート工学協会, pp. 5~20, 1988. 1. [3] 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（昭和63年度科学研究費補助金（総合研究A）、研究者代表 森田司郎京都大学教授）研究成果報告書、平成元年3月。[4] 角 一行, 川股 重也 : 面内純せん断応力下の鉄筋コンクリート平板におけるコンクリートの力学的特性、コンクリート工学論文 Vol. 26 No. 10, pp. 97~110, 1988. 10. [5] Kupfer, H., Hilsdorf, H.K. and Rusch, H. : Behavior of Concrete under Biaxial Stress, ACI Journal, Title No. 66-52, pp. 656~666, August 1969. [6] 宮原 長久, 川上 泰司, 前川 宏一 : ひびわれを含む鉄筋コンクリート板要素の一軸圧縮応力下における非線形挙動、土木学会論文集, pp. 249~258, No. 3 78/V-6, 1987. 2. [7] 瀬谷, 谷口他 : 複合面内力を受けるRC平板の弾性挙動、コンクリート工学年次論文報告集, pp. 571~576, 1988. 10.

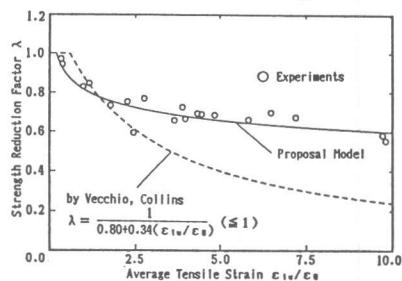


図-11 既往の実験結果との比較