

論文 コンクリートの品質が RC 部材のひび割れ幅に及ぼす影響

五角 亘^{*1}・下村 匠^{*2}・丸山久一^{*3}

要旨: コンクリートの品質が鉄筋コンクリート部材のひび割れ幅に及ぼす影響を系統的に調べ、その機構を明らかにするため、コンクリート強度を広範囲に変化させた鉄筋コンクリート供試体の一軸引張試験を行った。全強度範囲を通じて、強度の増大にともないひび割れ幅が減少することを示した。その主たる原因是、通常強度範囲では、強度の増大につれて鉄筋とコンクリートのすべりが抑制されるためであること、高強度範囲ではひび割れ分散性が向上するためであることを明らかにした。

キーワード: コンクリート強度、ひび割れ幅、ひび割れ間隔、引張剛性、付着

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の内部鋼材の腐食に対する抵抗性には、コンクリートのひび割れ幅が大きな影響要因となっている。それゆえ、曲げひび割れ幅算定式は、構造物の設計において重要な意味を持ち、使用材料や構造諸元の影響を的確に考慮できる算定式が必要とされる。

一方近年、高強度コンクリート、自己充填コンクリートが一般的になりつつある。これらの組織が緻密で均等質なコンクリートでは、普通コンクリートと比べ、鋼材との付着が優れていることが指摘されている¹⁾。このことから類推すると、ひび割れ幅も小さくなることが予想される。コンクリートの品質がひび割れ幅に及ぼす影響を正しく把握しておくことは、ひび割れ幅算定式の精度と適用性の向上のためだけでなく、高品质なコンクリートの特徴を生かした利用を進めるうえで十分興味深い。

本研究では、硬化コンクリートの品質を代表する指標として圧縮強度をとりあげ、強度レベルを広範囲に変化させたコンクリートを用いて作製した鉄筋コンクリート供試体の一軸引張試験を行い、以下の観点から検討を加える。

① コンクリートの品質が、ひび割れ幅に及

ぼす影響を系統的に明らかにする。

② ひび割れ幅への影響因子である、ひび割れ間隔、コンクリートのテンションスティフニング効果、鉄筋とコンクリートの付着の各要因について、実験結果より個別に抽出し、コンクリートの品質が及ぼす影響を検討し、①の結果が生じたメカニズムを明らかにする。

2. 実験概要

2.1 供試体

実験に用いた供試体は、図-1 に示すように、 $100 \times 100 \times 1000\text{mm}$ のコンクリート角柱の中心に D19 異形鉄筋（降伏強度 328.9N/mm^2 、弾性係数 $1.88 \times 10^5\text{N/mm}^2$ ）を 1 本埋め込んだものである。純かぶりは 40.5mm となる。本実験は、鉄筋に直接引張力を作用させる方法で加力するため、両端部において鉄筋を露出させている。

コンクリートの種類および打設方向の違いにより、表-1 に示す全部で 10 体の供試体を試験した。コンクリートの種類は、強度が広範囲に及ぶように計画した。表-1 には、載荷試験時ににおけるコンクリート強度の実測値を示しており、その値は圧縮強度 $16.7 \sim 100.2\text{N/mm}^2$ の範囲である。

*1 長岡技術科学大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (正会員)

*2 長岡技術科学大学助教授 工学部環境・建設系 博士 (工学) (正会員)

*3 長岡技術科学大学教授 工学部環境・建設系 Ph.D. (正会員)

表-1 供試体の水準

供試体名	圧縮強度 f'_c (N/mm ²)	引張強度 f_t (N/mm ²)	水セメント比 (%)	試験材齢 (日)	備考
Fc17	16.7	1.47	60	17	AE助剤を誤ってFc30の10倍使用したため強度が低くなった
Fc30	29.8	2.47	60	19	—
Fc30V					縦方向打設
Fc31	31.3	2.61	40	18	AE助剤を誤ってFc54の10倍使用したため強度が低くなった
Fc37	37.2	—	55	61	—
Fc54	54.1	3.37	40	20	—
Fc54V					縦方向打設
Fc80	80.5	—	26.9	62	自己充填コンクリート
Fc88	87.9	—	24.7	62	—
Fc100	100.2	5.60	23.6	17	—

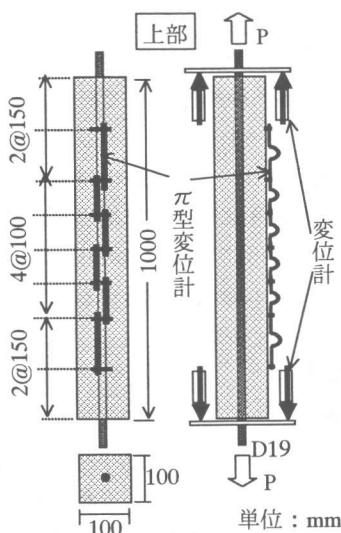


図-1 供試体形状、変位計設置位置

供試体Fc30VとFc54Vのみ縦方向(長軸方向)にコンクリートを打設し、他の供試体はすべて、横置きして打設した。打設方向の違いにより鉄筋との付着性状が変化し、ひび割れ幅が異なることがあるかどうかを実験的に調べるためにある。

打設後の供試体は、乾燥収縮を防ぐため、載荷試験時まで湿布養生を行った。

2.2 実験方法

供試体の両端からそれぞれ 150mm 内側の 700mm の区間をひび割れ幅測定区間とし、図-1 に示すように、載荷試験前にこの区間に π 型変位計を隙間なく設置した。

供試体の自重による曲げの影響を排除するために、供試体を反力フレーム内に垂直に設置し、鉄筋端部にくさびグリップを取り付け、荷重を伝達させた(図-2)。

荷重は加力側(上側)において、ロードセルにより測定した。鉄筋の平均ひずみは、図-1 に示すように、供試体両端部において鉄筋に取り付けたアルミ治具を介して鉄筋の変位を変位計により測定し、長さ変化を供試体長で除することにより求めた。ひび割れ間隔は鋼尺により測定した。載荷は単調載荷とした。

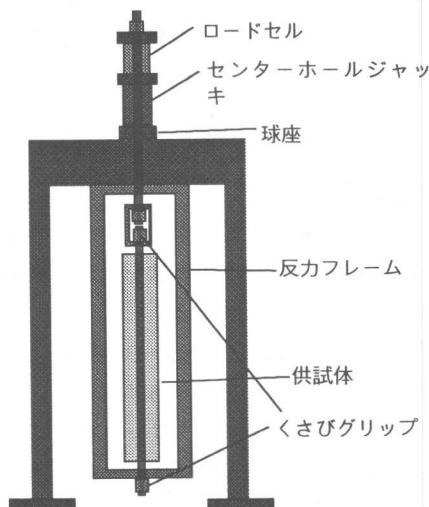


図-2 載荷方法

3. 実験結果

紙面の関係上、各供試体の詳細な実験結果を示すことはできないので、供試体Fc31を例に、

表-2 供試体の実験結果

供試体名	第1ひび割れ発生荷重(kN)	ひび割れ本数	平均ひび割れ間隔(mm)	最大ひび割れ間隔(mm)	平均ひび割れ幅(mm)	最大ひび割れ幅(mm)
Fc17	18.3	4	161	196	0.362	0.573
Fc30	39.4	5	153	195	0.303	0.396
Fc30V	37.3	5	179	215	0.235	0.404
Fc31	32.6	5	156	188	0.294	0.413
Fc37	38.3	5	154	211	0.244	0.469
Fc54	57.0	5	168	253	0.223	0.432
Fc54V	45.8	6	131	203	0.215	0.461
Fc80	62.0	8	92	142	0.166	0.498
Fc88	63.3	6	148	248	0.252	0.312
Fc100	60.4	7	101	154	0.213	0.408

注) ひび割れ本数、ひび割れ間隔、ひび割れ幅は荷重 90 kN 時の値である。

代表的な結果を図-3,4 に示す。図-3 は荷重と平均ひずみの関係を、図-4 は適当な載荷ステップにおけるひび割れ幅の分布を示したものである。

第1ひび割れ発生後、荷重の増加とともに順次ひび割れが発生する。新たなひび割れの発生は徐々に少くなりひび割れ間隔が定常状態に近づくが、本実験に用いた供試体では、鉄筋降伏後にもひび割れが発生する場合があり、完全な定常状態は得られなかった。また、ひび割れ

発生後もコンクリートのテンションスティーフニング効果により、同一荷重時における鉄筋の平均ひずみは、別途試験した単体鉄筋のひずみ(ひび割れ断面におけるひずみに相当)よりも小さいことが確認できた。

ひび割れ間隔とひび割れ幅はひとつの供試体の中でも値にばらつきがある。工学的に興味があるのは、平均値と最大値である。すべての供試体に共通して、最大ひび割れ幅は、概ね最大となるひび割れ間隔の隣において観察された。

全供試体の実験結果の総括を表-2 に示す。ひび割れ本数、ひび割れ幅、ひび割れ間隔は、荷重 90 kN 時の値を示している。これは実際の鉄筋コンクリート部材の使用状態よりも厳しい応力レベルにあるが、ひび割れ間隔が定常状態に近く、安定した相対比較ができることを優先して設定したものである。

図-5 は、コンクリートの圧縮強度と平均および最大ひび割れ幅の関係を示したものである。

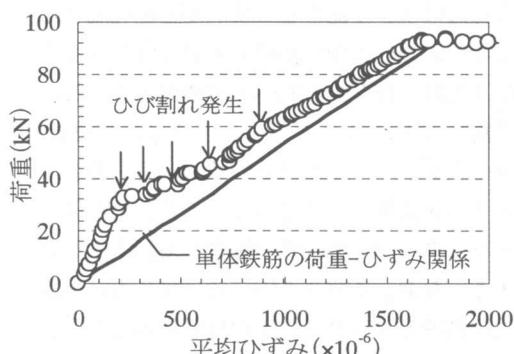


図-3 荷重と平均ひずみの関係（供試体 Fc31）

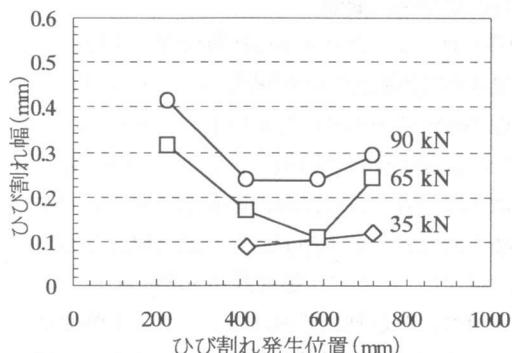


図-4 各荷重ステップにおけるひび割れ幅（供試体 Fc31）

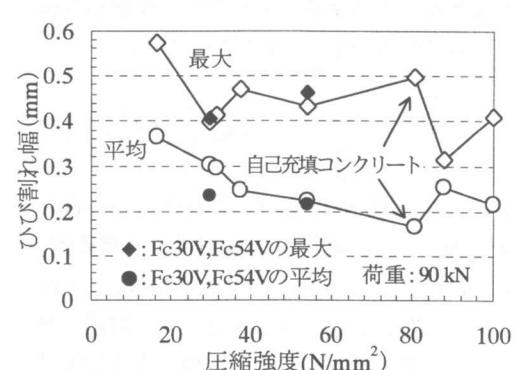


図-5 コンクリート強度とひび割れ幅の関係

圧縮強度 80N/mm^2 以上では、供試体間のばらつきが大きく、この範囲だけでは傾向が明確ではないが、全強度域を通じて見れば、平均ひび割れ幅は、コンクリート強度の増加にともない小さくなる傾向が認められる。縦方向に打設した供試体は、強度の低いケース (Fc30V) では、同じコンクリートで横方向打設の供試体よりも平均ひび割れ幅が小さくなつたが、強度の高いケース (Fc54V) では、打設方向による違いは小さかった。強度の低い範囲では、ブリーディングによる影響が大きく現れたものと考えている。

一方、最大ひび割れ幅は、平均ひび割れ幅よりも供試体間のばらつきが大きく、明確な傾向は認められない。これは、個々の供試体中の最大ひび割れ幅の意味を考えると当然であつて、最大値は平均値よりも統計的なばらつきの影響を大きく受けるからである。しかし、概ね最大ひび割れ幅もコンクリート強度の増加にしたがい、同等または減少の傾向があるといえる。

4. ひび割れ幅への影響因子に関する検討

4.1 ひび割れ幅算定式

ひび割れ幅算定式は、多くの鉄筋コンクリート構造物の設計基準においてさまざまな形式で取り入れられているが²⁾、いずれも基本的には、ひび割れ間の変形適合条件に基づき、(ひび割れ幅) = (係数) × (ひび割れ間隔) × (鉄筋のひずみ) という形式でひび割れ幅を評価するものである。土木学会コンクリート標準示方書では、以下の式が採用されている³⁾⁴⁾⁵⁾。

$$w = k \left\{ 4c + 0.7(c_s - \phi) \right\} \left(\frac{\sigma_{se}}{E_s} + \varepsilon'_{csd} \right) \quad (1)$$

ここに、 w : ひび割れ幅、 k : 鋼材の付着性状を表す係数、 c : かぶり、 c_s : 鋼材の中心間距離、 ϕ : 鋼材径、 σ_{se} : 鉄筋応力度の増加量、 E_s : 鉄筋の弾性係数、 ε'_{csd} : コンクリートの収縮・クリープ等によるひび割れ幅の増加を表す数値である。

式(1)の右辺の $\{4c + 0.7(c_s - \phi)\}$ は、ひび割れ間隔を表す。 σ_{se}/E_s は鉄筋のひずみを表す項であり、示方書式では、簡単のため、コンクリートのテンションスティフニング効果を陽な形では考慮せず、ひび割れ断面での鉄筋ひずみを用いることとしている。係数 k は、鉄筋とコンクリートの付着性状がひび割れ幅に及ぼす影響を表す定数であり、本来は付着性状がひび割れ間隔に及ぼす影響を表していると考えられる²⁾。ただし、付着が劣る場合、仮にひび割れ間隔が同一であつても、鉄筋とコンクリートのすべりにより、ひび割れ幅が増大することもあると考えられる。係数 k は、そのような効果を表現する役割も担っていると考えられる。

以上のように、ひび割れ幅算定式は、簡便ではあるが、ひび割れ幅に及ぼす各要因を合理的に取り込んだ性格を有している。したがって、高品質なコンクリートを用いた場合、ひび割れ幅が小さくなる効果をひび割れ幅算定式に導入するためには、上記のどの要因がどの程度変化するのかについて明らかにしておく必要がある。

以下では、ひび割れ幅への影響因子である、ひび割れ間隔、テンションスティフニング効果、鉄筋とコンクリートの付着性状の影響を表す係数の 3 つを実験結果より抽出し、それそれに及ぼすコンクリートの品質の影響を検討することにする。なお、これら 3 因子はいずれも、微視的には鉄筋とコンクリートの付着特性に起因すると考えられるものである。

4.2 ひび割れ間隔

図-6 は、コンクリートの圧縮強度と平均および最大ひび割れ間隔の関係を示したものである。荷重 90kN 時の値を示している。全体的には、ひび割れ幅の場合と同様に、コンクリート強度の増加につれ、ひび割れ間隔が漸減する傾向が認められたが、その傾向はひび割れ幅ほども明確ではない。とくに圧縮強度が 50N/mm^2 以下の範囲では、ひび割れ間隔はコンクリート強度によらずほぼ一定となった。 50N/mm^2 以上の高強度域では、ひび割れ間隔がやや小さくなっている。

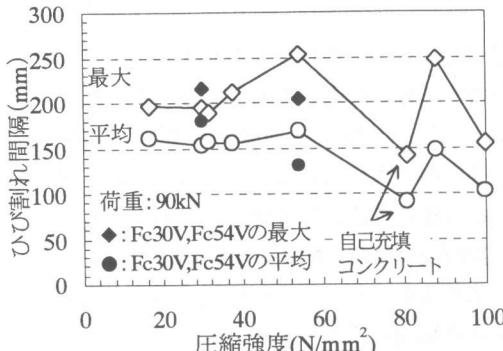


図-6 コンクリート強度とひび割れ間隔の関係

る。ひび割れ間隔は、鉄筋とコンクリートの付着特性だけでなく、コンクリートの引張強度の影響も受けないと考えられる。付着特性と引張強度とでは、圧縮強度の影響が同じではないので、強度域によってひび割れ間隔に及ぼす圧縮強度の影響が異なったと考えられる。

本結果より、少なくとも圧縮強度 50N/mm^2 以下の範囲では、強度の増大につれひび割れ幅が減少した原因是、ひび割れ分散性が向上したためではないと考えられる。一方、図-5 と図-6 とを比較すると、高強度域では、ひび割れ幅の大小がひび割れ間隔の大小に一致しており、ひび割れ分散性の向上がひび割れ幅抑制に寄与していることがわかる。

4.3 テンションスティフニング効果

鉄筋コンクリート中のコンクリートは、ひび割れ間における鉄筋との付着により、ひび割れ発生後も平均的には引張力を負担する。換言すれば、鉄筋周辺のコンクリートが鉄筋の伸びを拘束することになる。この効果（テンションスティフニング効果）が高いほど、同一荷重時のひび割れ幅が小さくなるといえる。示方書式(1)では、この効果を陽な形では考慮していないが、コンクリートの品質を広範囲に変えた場合、この効果がどの程度変わるか、本研究ではあらためて検討を加えることとした。

図-7 に、鉄筋の平均ひずみとコンクリートの負担する平均引張応力との関係を、代表的な供試体 Fc17, Fc31, Fc100 について示した。コンクリートの平均応力 $\sigma_{c,av}$ は次式により求めた。

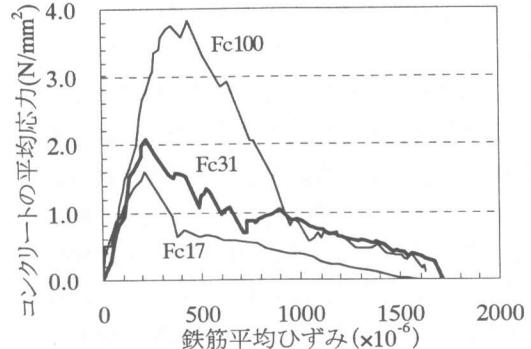


図-7 鉄筋の平均ひずみとコンクリートの平均応力の関係

$$\sigma_{c,av} = \frac{P - A_s E_s \varepsilon_{s,av}}{A_c} \quad (2)$$

ここに、 P ：荷重、 A_s ：鉄筋の断面積、 $\varepsilon_{s,av}$ ：鉄筋の平均ひずみ、 A_c ：コンクリートの断面積である。ただし、式(2)は鉄筋降伏前にのみ成立する。図-7 に明らかなように、圧縮強度が高いコンクリートほど、負担する引張応力も大きく、その効果は鉄筋のひずみが小さい範囲において顕著である。逆にひずみが大きい範囲（図-7 では概ね 1000×10^{-6} 以上）では、コンクリートの違いによる差は小さくなっている。

図-8 は、同一荷重時における各供試体の鉄筋の平均ひずみを、3 つの荷重段階で描いたものである。荷重 60kN の段階では、強度が高いコンクリートほど鉄筋のひずみが小さくなっている。一方、荷重が高い 75kN と 90kN の段階では、

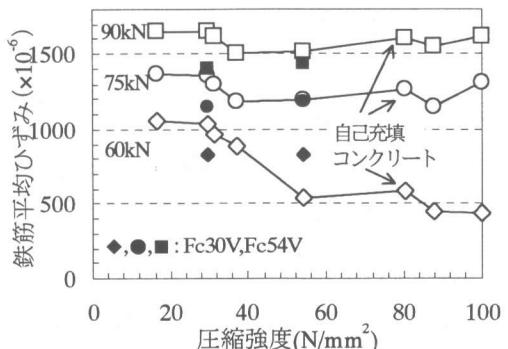


図-8 コンクリート強度と同一荷重時における鉄筋の平均ひずみの関係

もはや供試体間の差は小さくなっている。この結果より、コンクリートのテンションスティフニング効果は、荷重が高い図-5の段階におけるひび割れ幅の違いの原因ではないが、通常の使用荷重の範囲ではひび割れ幅を抑制する原因となり得ると考えられる。ただし、本実験の範囲では、このことを直接確認できない。単調載荷を行ったため、荷重が低い段階ではひび割れ本数が定常となっておらず、ひび割れ幅が安定していないからである。

4.4 付着性状を表す係数

ひび割れ幅算定式(1)に導入されている、鉄筋とコンクリートの付着性状がひび割れ幅に及ぼす影響を表す係数 k と類似した以下の指標 s を実験結果より導出し検討する。

$$s = \frac{w_{av}}{l_{av} \varepsilon_{s,av}} \quad (3)$$

ここに、 s : 付着性状を表す係数、 w_{av} : 平均ひび割れ幅、 l_{av} : 平均ひび割れ間隔、 $\varepsilon_{s,av}$: 鉄筋の平均ひずみである。 s は、ひび割れ幅算定式(1)における係数 k と異なり、ひび割れ間隔の影響を分離している。 s の値が大きいほど、同一ひび割れ間隔、同一鉄筋ひずみ時のひび割れ幅が大きいということになる。すなわち、 s の物理的意味は、鉄筋とコンクリートのすべり（抜け出し）のひび割れ幅への寄与を表すことになる。ただし、本実験におけるひび割れ幅の測定原理からすれば、厳密にすべりを抽出したことには

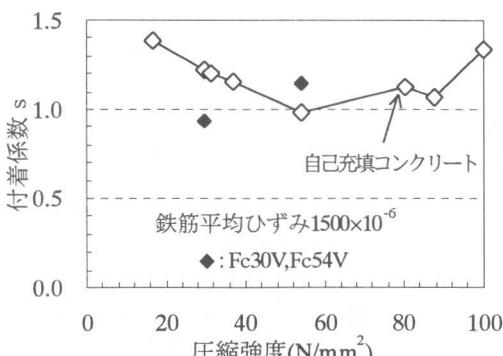


図-9 コンクリート強度と鉄筋とコンクリートの付着性状を表す係数の関係

ならない。

図-9は、鉄筋の平均ひずみが 1500×10^{-6} における各供試体の係数 s を示したものである。

コンクリート強度が 50N/mm^2 以下の範囲では、強度の増大にともない s の値が小さくなつた。この範囲では、付着性状の向上によるすべりの抑制がひび割れ幅減少の原因となっていると考えられる。しかし、それ以上の強度範囲では、その傾向が認められなかつた。

5. 結論

本研究の範囲で以下の結論を得た。

1. コンクリートの圧縮強度 $17\sim100\text{N/mm}^2$ の範囲において、強度の増大にともない平均ひび割れ幅は同等または減少傾向にあることが確認された。
2. 圧縮強度 50N/mm^2 以下の範囲で、強度の増大にともない平均ひび割れ幅が減少する原因是、主として鉄筋とコンクリートのすべりが抑制されるためであると考えられる。
3. 圧縮強度 50N/mm^2 以上の範囲で、強度の増大にともない平均ひび割れ幅が減少する原因是、主としてひび割れ分散性が向上するためであると考えられる。

参考文献

- 1) 山本晴人、伊藤 始、三島徹也、島 弘：高強度材料を用いた RC 部材の鉄筋付着特性に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.22, No.3, pp.1249-1254, 2000.7.
- 2) 趙 唯堅、丸山久一：鉄筋コンクリートはりの曲げひび割れ幅算定式の再評価、土木学会論文集、No.490/V-23, pp.147-156, 1994.5.
- 3) 土木学会：[平成 8 年制定] コンクリート標準示方書 [設計編]，1996.3.
- 4) 土木学会：コンクリート標準示方書（昭和 61 年制定）改訂資料、コンクリートライブライアーリー第 61 号, pp.200-206, 1986.10.
- 5) 角田興史雄：鉄筋コンクリートの最大ひび割れ幅、コンクリートジャーナル、Vol.8, No.9, pp.1-10, 1970.9.