

# 論文 鉄筋とコンクリートの付着性状がRC部材のひび割れ性状に及ぼす影響について

岡本 大<sup>\*1</sup>・佐藤 勉<sup>\*2</sup>・早川健司<sup>\*3</sup>・黒岩俊之<sup>\*3</sup>

**要旨:** コンクリート～鉄筋間の付着特性に与える因子として、コンクリートの圧縮強度とブリーディング量を取り上げ、これらの因子がRC部材のひび割れ性状に及ぼす影響を調査するために一軸引張試験を実施した。検討の結果、ひび割れがほぼ定常状態に至った時点での最大ひび割れ幅は、コンクリートの圧縮強度特性に影響を受ける傾向にあり、ブリーディング量の減少による影響は比較的小さかった。

**キーワード:** ひび割れ, 付着, 高強度コンクリート, 高流動コンクリート

## 1. はじめに

RC部材の曲げひび割れ性状に及ぼす因子にはいくつかのものがある。その一つに鉄筋とコンクリートの付着性状が挙げられ、付着強度が大きいものほどひび割れ分散効果が高く、ひび割れ間隔は小さくなると考えられている。

一般に、高強度コンクリートは普通強度コンクリートに比べて圧縮強度が大きいために付着強度も大きくなると推定されるが、強度特性に加えて、高強度コンクリートの多くがノンブリーディングコンクリートであることも付着強度が大きくなる原因の一つと考えられる。

一方、高流動コンクリートは圧縮強度がそれほど大きくない場合でも、普通コンクリートと比較して粉体量が多いことからブリーディング量を減少、あるいはノンブリーディング化することが可能である。そのため、普通コンクリートと比較して付着強度が高くなると考えられる。

本検討では、コンクリート～鉄筋間の付着特性に与える因子として、コンクリートの圧縮強度とブリーディング量を取り上げ、これらの因子がRC部材のひび割れ性状に及ぼす影響を一軸引張試験によって調査した。

## 2. 実験の概要

### 2.1 試験体の形状および諸元

実験を行った試験体の諸元を、表 1 および図 1 に示す。

一軸引張試験によって平均応力を測定する場合には、測定区間にひび割れを多く含むように試験体の長さをなるべく長く取ることが望ましいことから、コンクリート部分を 2.5m とした試験体を製作した。断面はすべての試験体で断面幅  $b \times$  断面高さ  $h = 200 \times 120\text{mm}$  の矩形断面とし、断面図心位置に鉄筋を配置した。

実験のパラメータはコンクリートの種類および鉄筋径として、表 - 1 に示すような 9 体の試験体について実験を行った。

### 2.2 使用材料

実験に使用した鉄筋の規格は、SD490 のネジフシ鉄筋とした。通常の異形鉄筋ではひずみゲージを貼付する際にリブを削る必要があり断面欠損を生じるため、縦リブがなく鉄筋を削る必要がないネジフシ鉄筋を使用した。実験に使用した鉄筋の材料試験結果を表 - 2 に示す。なお、鉄筋の断面積はテストピースの水中重量を元にした実測値とした。

\*1 (財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造 工修 (正会員)

\*2 (財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造研究室長 工博 (正会員)

\*3 東急建設(株) 技術研究所 土木研究室 工修 (正会員)

表-1 試験体の諸元

試験体	鉄筋	コンクリート	
		種類	強度 (N/mm <sup>2</sup> )
N19	SD490-D19	通常	30
N25	SD490-D25		
N32	SD490-D32		
H19	SD490-D19	高強度	80
H25	SD490-D25		
H32	SD490-D32		
S19	SD490-D19	自己充填	30
S25	SD490-D25		
S32	SD490-D32		

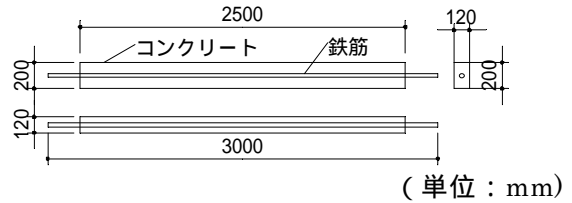


図-1 試験体形状

表-2 鉄筋の材料試験結果

鉄筋の種類	断面積 (mm <sup>2</sup> )	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> )
SD490 D19	280.3	540	628	186000
SD490 D25	498.8	505	609	186000
SD490 D32	779.2	492	595	185000

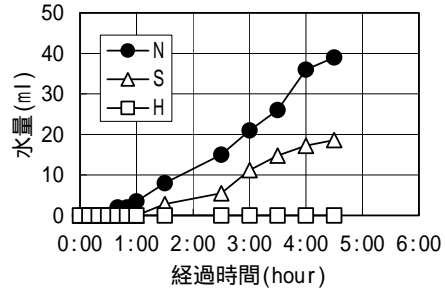


図-2 プリーディング率

表-3 コンクリートの示方配合

試験体	呼び配合	W/C %	W/P %	s/a %	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					
					W	C	L	S	G	Ad
Nシリーズ	24-12-20H	55.6	55.6	45.8	170	306	-	825	985	3.83
Hシリーズ	-	28.0	28.0	46.4	170	607	-	734	878	10.30
Sシリーズ	-	70.0	32.0	49.3	165	236	280	772	828	4.36

※L: 石灰石微粉末

※Ad: 混和剤, NシリーズはAE減水剤, HおよびSシリーズは高性能AE減水剤

コンクリートに用いた材料のうちセメントは、すべての試験体とも早強ポルトランドセメントを使用した。高流動コンクリートでは強度を普通コンクリートと同等とし、材料分離を防ぎ所定のフレッシュ性状を得るために不活性の石灰石微粉末を使用した。当初、高流動コンクリートはノンブリーディングとする計画であったが、試験練りの結果、セメントを置換した石灰石微粉末にセメントほどの保水性がないために、目標とした  $f'_c = 30\text{N/mm}^2$  程度の圧縮強度ではノンブリーディングとすることが難しく、図-2に示す様にブリーディング率を普通コンクリートの1/2程度に抑えるにとどまった。使用したコンクリートの示方配合を表-3に示す。また、各試験体の荷重時の材料試験結果を表-4に示す。

### 2.3 実験方法

荷重は図-3に示すように、試験体と荷重フレームを平坦な床に平置きし、試験体の一端を荷重フレームに固定し、他端にセンターホール

表-4 コンクリート材料試験結果

種類	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )
N19	34.3	28.4	2.66
S19	31.4	22.9	2.64
H19	89.8	41.7	4.44
N25	37.2	28.1	3.04
S25	33.2	29.3	2.85
H25	89.8	41.7	4.44
N32	37.2	28.1	3.04
S32	33.2	29.3	2.85
H32	89.8	41.7	4.44

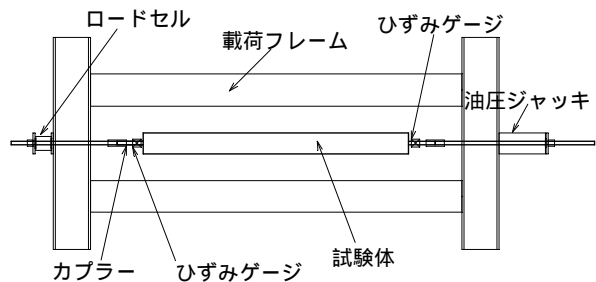


図-3 荷重方法

ジャッキによって引張力を加えた。荷重はセンターホール型のロードセルで測定し、図-3に

示す位置のひずみゲージの値をモニターしながら軸方向鉄筋が完全に降伏し、鉄筋がひずみ硬化域に達するまで単調載荷した。

計測項目は、載荷荷重の他にひび割れ幅、試験体全長の伸びおよび鉄筋ひずみとした。変位計測位置を図 - 4 に示す。

ひび割れ幅は、コンクリートの端部より鉄筋の定着長程度離れた区間を測長 100mm のパイ型変位計により測定した。

試験体の伸びは、コンクリート両端の位置の鉄筋に測定用のターゲットを取りつけ、この変位の差を取ることで求めた。

コンクリート内部の鉄筋ひずみは、基本的に試験体の中央より 5D (D = 鉄筋径) 間隔にひずみゲージを貼付して計測した。

なお、試験体はコンクリート打設後に湿布養生を行って乾燥収縮を生じないようにしたが、自己収縮の影響を含めた収縮に対するデータ補正を可能とする目的から、すべての試験体についてコンクリート打設後から載荷までに発生する鉄筋ひずみの経時変化を測定した。

### 3. 実験結果と考察

#### 3.1 コンクリートの平均応力

図 - 5 ~ 図 - 7 に平均ひずみとコンクリートの平均応力の関係を示す。平均ひずみは試験体の伸びより計算し、コンクリートの平均応力は(1)式により算出した。

$$\sigma_{c,ave} = (P - A_s \cdot E_s \cdot \epsilon_{s,ave}) / A_c \quad (1)$$

ここに、

P: 載荷荷重,  $A_s$ : 鉄筋断面積,  $E_s$ : 鉄筋ヤング係数,  $\epsilon_{s,ave}$ : 平均ひずみ,  $A_c$ : コンクリート断面積

コンクリートの平均応力は、載荷までの収縮による影響を考慮する形で求めた。そのため、平均ひずみが 0 である時点で、コンクリートには載荷時点での収縮ひずみに対応した引張応力が発生している。

これらの図を見ると、鉄筋の平均ひずみが 750 ~ 1000  $\mu$  程度まではいずれの場合も高強度コン

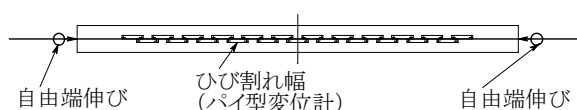


図-4 変位計測

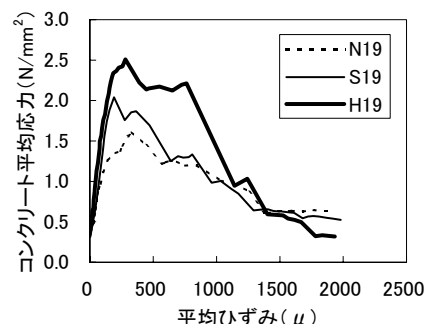


図-5 コンクリート平均応力 (D19)

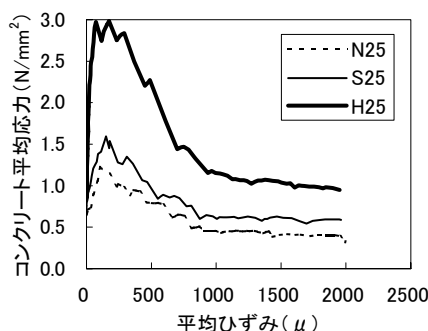


図-6 コンクリート平均応力 (D25)

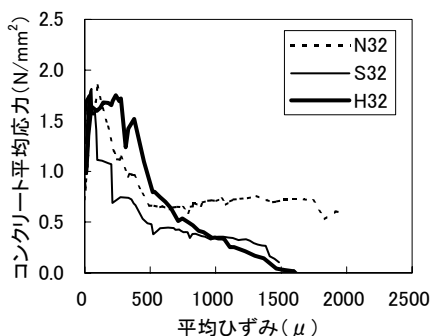


図-7 コンクリート平均応力 (D32)

クリートを用いたHシリーズに関してコンクリートの平均応力が他のシリーズに比べて大きな値を示しており、テンションスティフニング効果が大きいことが認められた。しかし、平均ひずみがこの範囲を越えるような領域では、鉄筋径によって大小関係が異なっており、コンクリートの相違による明確な傾向は観察されなかった。

高流動コンクリートを用いたSシリーズに関しては、鉄筋がD19とD25の場合には普通コンクリートを用いたNシリーズよりもテンションスティフニング効果が大きな傾向を示しているが、高強度コンクリートに比べるとその差は小さく、鉄筋がD32のものについては平均ひずみが比較的小さい領域においてもコンクリートの平均ひずみは逆転している。このことから、今回の実験に用いた高流動コンクリートのテンションスティフニング効果は、普通コンクリートと同様と見なすのが妥当と考えられる。

以上のことから、RC部材に作用している荷重が比較的小さい段階では、ひび割れが定常状態には至っていないため定量的な評価は難しいが、テンションスティフニング効果により同一荷重時の鉄筋の平均ひずみは高強度コンクリートの方が小さくなるので、ひび割れ幅が抑制される可能性がある。

### 3.2 ひび割れ間隔

表-5に各試験体のひび割れ本数とひびわれ間隔の一覧を、図-8に平均かぶりと最大ひび割れ間隔の関係を、図-9に平均かぶりと平均ひび割れ間隔の関係を示す。また、ひび割れ発生状況に関して、鉄筋径による相違は顕著ではなかったため、図-10には鉄筋にD32を用いた場合を例として示す。

今回の実験では、引張力による主要なひび割れの他に、2次的な微細ひび割れが発生したため、視覚的には明確な定常状態が確認できなかった。そのため、ひび割れ間隔および本数については試験体を貫通するようなひび割れの増加が収束し、ほぼ安定した状態として鉄筋の平均ひずみが $2000\mu$ となった時点について示し、微細なひび割れは無視した。

表-5を見ると、この時点におけるひび割れ本数に関しては普通コンクリートを用いたNシリーズが若干少ない傾向にあるが、各試験体間の差はあまり見受けられない。図-8の最大ひ

表-5 ひび割れ間隔

	平均かぶり t(mm)	ひび割れ本数 (本)	ひび割れ間隔Lmax(mm)		
			LmaxCAL	LmaxEXP	EXP/CAL
N19	70.5	11	380.7	280	0.74
N25	67.5	14	364.5	250	0.69
N32	64.0	14	345.6	280	0.81
S19	70.5	15	380.7	280	0.74
S25	67.5	14	364.5	285	0.78
S32	64.0	17	345.6	250	0.72
H19	70.5	15	380.7	275	0.72
H25	67.5	16	364.5	250	0.69
H32	64.0	15	345.6	280	0.81

LmaxCAL：最大ひび割れ間隔の計算値  
LmaxEXP：最大ひび割れ間隔の実験値

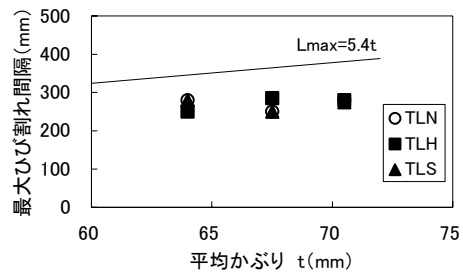


図-8 かぶりと最大ひび割れ間隔

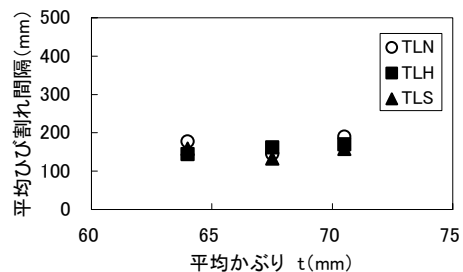


図-9 かぶりと平均ひび割れ間隔

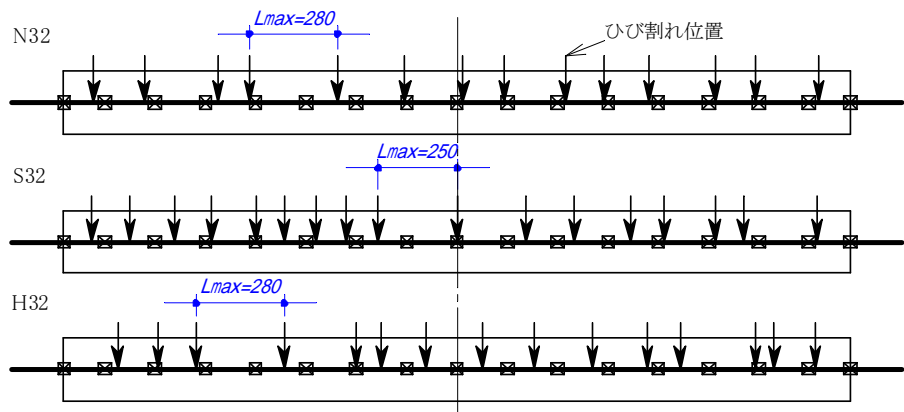


図-10 ひび割れ発生状況の例(鉄筋：D32)

び割れ間隔および図 - 9 の平均ひび割れ間隔についても同様な傾向となった。

また、各試験体の最大ひび割れ間隔  $L_{max}$  と平均ひび割れ間隔  $L_{ave}$  の比、 $L_{max} / L_{ave}$  は 1.5 ~ 1.9 であり、高強度コンクリートおよび高流動コンクリートに関しても概ね、普通コンクリートを対象とした趙らの研究<sup>1)</sup>による値と同様なものであった。

最大ひび割れ間隔の実験値に対して、土木学会コンクリート標準示方書<sup>2)</sup>の基となっている角田による研究<sup>3)</sup>に示される(2)式で最大ひび割れ間隔を求め、図 - 8 に合わせて示した。

$$L_{max} = 5.4t \quad (2)$$

ここに、

$L_{max}$  : 最大ひび割れ間隔、 $t$  : 平均かぶり

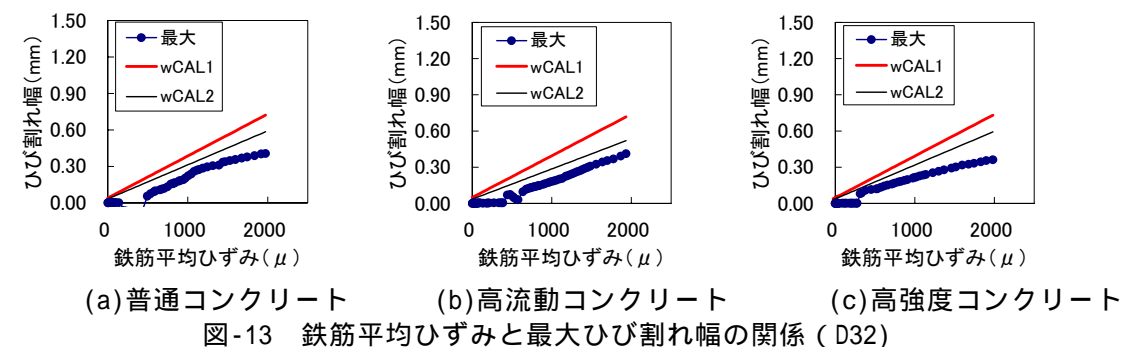
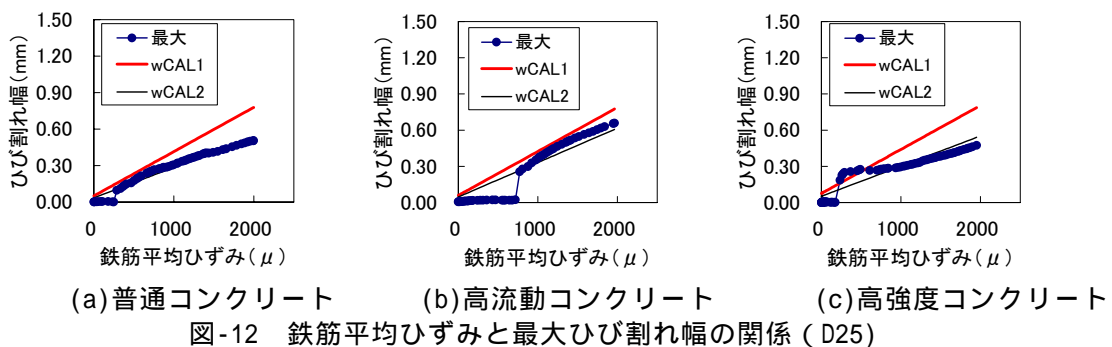
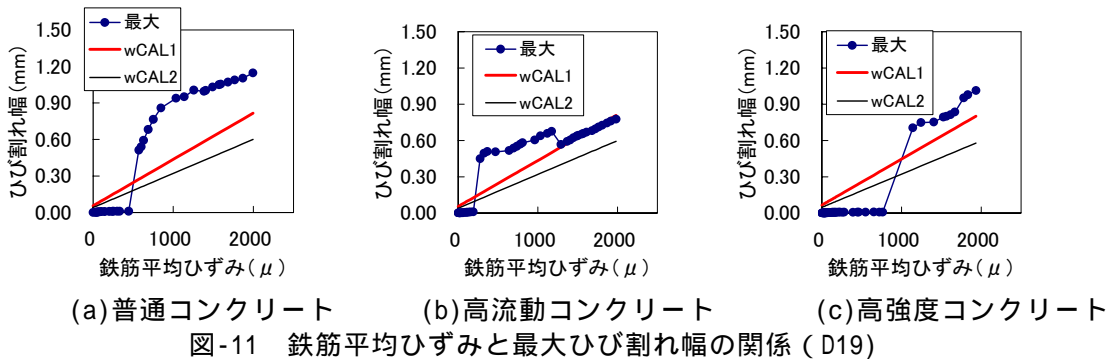
最大ひび割れ間隔に関しては、いずれのシリ

ーズも実験値の方が計算値よりも小さい値であった。今回の検討ではデータ数が少ない上に、平均かぶりの差は鉄筋径から生ずるものでありその差が小さいため、最大ひび割れ間隔に与えるかぶりの影響を定量的に示すまでには至らないが、角田の研究にも同様な傾向が見られるように、定性的には平均かぶりが大きくなると算定式は実験値よりも大き目の値を与えられられる。

### 3.3 最大ひび割れ幅

図 - 11 ~ 図 - 13 に、各試験体毎の鉄筋平均ひずみと最大ひび割れ幅の計算値と実験値の比較を示す。これらの図は、鉄筋の平均ひずみが 2000  $\mu$  以下の場合について示している。

鉄筋の平均ひずみは、計測した鉄筋ひずみの値を元に計算した。実際の鉄筋のひずみは、こ



これらの測点間で直線的に変化するのではなく、滑らかな曲線状に分布すると考えられる。そのため、各測点の隣り合う3点間を結ぶ連続した2次曲線を求め、この曲線を積分することにより鉄筋の平均ひずみを求めた。

最大ひび割れ幅の計算値は角田の研究<sup>3)</sup>を参考にして式(3)に示すように、鉄筋の平均ひずみに最大ひび割れ間隔を乗ずる形で算出した。このとき、コンクリート収縮ひずみの値には、各試験体の載荷までに発生した収縮による鉄筋ひずみの値を用いた。なお、計算値のうちwCAL1は最大ひび割れ間隔の計算値を用いた場合でwCAL2は最大ひび割れ間隔の実験値を用いた場合である。

$$w_{\max} = (\varepsilon_{s,AVE} - \varepsilon_{\phi}) \cdot L_{\max} \quad (3)$$

ここに、

$\varepsilon_{s,AVE}$  : 鉄筋の平均ひずみ、 $\varepsilon_{\phi}$  : 載荷時のコンクリートの収縮による鉄筋ひずみ、 $L_{\max}$  : 最大ひび割れ間隔

以上の図を見ると、鉄筋がD19の場合にはいずれの場合も計算値は実験値を過小評価する傾向が見られ、実験値と計算値の乖離は普通コンクリートの場合が最も大きかった。鉄筋にD19を用いた場合、鉄筋比 $p_s = 1.17\%$ であり(D25=2.08, D32=3.25)、RC部材の有効引張鉄筋比としては小さいため、ひび割れが発生すると同時にひび割れ発生断面の鉄筋ひずみが急増し、鉄筋の平均ひずみとの差が過大になったことが考えられる。特に、鉄筋の平均ひずみが約1000 $\mu$ 以下の段階で、普通コンクリートを用いた試験体が他の試験体に比べて実験値との乖離が大きかったのは、テンションステイフィング効果の違いによるものと考えられる。

一方、D25の場合について見ると、概ねひび割れ幅の実験値はひび割れ幅に実験値を用いた場合の計算値に一致しており、D32の場合は幾分計算値よりも小さくなる傾向にあった。

コンクリートの種類による違いを鉄筋にD32を用いた場合に関して見ると、高流動コンクリートの最大ひび割れ幅は普通コンクリートと同様な傾向を示したが、高強度コンクリートは実験値と計算値の比を取った場合に、他の試験体に比べて小さい値を示す傾向にあった。

#### 4. まとめ

コンクリートの付着性状に影響を与える因子として、圧縮強度およびブリージング量を取り上げ、高強度および高流動コンクリートに関するひび割れ性状について検討を行った。今回実験を行ったパラメータの範囲において以下のことが確認できた。

- (1) ひび割れがほぼ定常状態に至った時点でのひび割れ本数、ひび割れ間隔はコンクリートの種類によらずほぼ同一であった。
- (2) 所定以上の鉄筋比が確保されている場合において、RC部材の最大ひび割れ幅はコンクリートの圧縮強度が大きくなると小さくなる傾向を示した。
- (3) 高流動コンクリートを用いた場合でもブリージングを抑制した程度では、最大ひび割れ幅を抑制する効果は小さかった。比較的低強度で完全にノンブリージングとした場合のひび割れ性状については今後の検討課題と考える。

#### 参考文献

- 1) 趙唯堅, 丸山久一: 鉄筋コンクリートはりの曲げひび割れ算定式の再評価, 土木学会論文集, No.490/V - 23, pp.147~156, 1994.5.
- 2) 土木学会編: 平成8年制定・コンクリート標準示方書(設計編), 1996
- 3) 角田與史雄: 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.