

論文 150N/mm² 級超高強度コンクリートの付着特性に関する実験的研究

盛田 行彦^{*1}・日紫喜 剛啓^{*2}・一宮 利通^{*3}・平 陽兵^{*4}

要旨：超高強度コンクリートは普通強度コンクリートと比較して、圧縮強度が高いだけでなく付着強度も高いため、曲げひび割れ幅が小さくなること、定着長が短くできることなどが期待される。そこで、本研究では圧縮強度 150N/mm² 級の超高強度コンクリートを用いた場合のひび割れ幅および定着長の評価方法について実験的な検討を試みた。その結果、コンクリート強度の増加に伴いひび割れ幅が小さくなることが確認でき、合理的な評価を目的として曲げひび割れ幅算定式におけるコンクリートの品質に関する評価式を見直した。また、定着長については既往の算定式を用いた場合、安全側に評価できることが分かった。

キーワード：超高強度コンクリート，付着強度，ひび割れ幅，定着長

1. はじめに

近年、高性能減水剤の性能の向上やシリカフュームなどの混和材料の使用により、特別な養生なしで圧縮強度が 100 N/mm² を超える超高強度コンクリートの製造が可能となっている。圧縮強度の高い超高強度コンクリートをプレストレストコンクリート構造に適用することによって部材厚を薄くでき、軽量化を図ることができる。また、超高強度コンクリートは鉄筋とコンクリートとの付着特性が普通強度コンクリートと比較して優れている¹⁾という特徴がある。これにより、1)ひび割れ幅が抑制され、耐久性が向上すること、2)定着長を短くでき、配筋の簡略化、施工の省力化を図れること、などが期待される。これらの効果を設計に反映させるためには、材料特性を合理的に評価する算定式が必要である。

以上のことから、本研究では、150 N/mm² 級の超高強度コンクリートを用いた場合の曲げひび割れ幅および定着長の評価について実験的な検討を試みた。

2. 検討概要

高強度コンクリートを対象とした既往の設計

基準として土木学会コンクリート標準示方書²⁾

(以下、示方書)が挙げられる。示方書では 80N/mm² 以下のコンクリート部材を対象としているが、構造性能の評価式が圧縮強度の関数として示されているため、80N/mm² 以上の圧縮強度の場合の適用性を検討することが可能である。そこで、本研究では示方書の曲げひび割れ幅と定着長の算定式について、150 N/mm² 級の超高強度コンクリートへの適用性について検討した。

2.1 曲げひび割れ幅の算定式

式(1)に示方書の曲げひび割れ幅算定式を示す。

$$w = 1.1 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot \{4c + 0.7(c_s - \phi)\} \cdot \left[\frac{\sigma_{se} + \varepsilon'_{csd}}{E_s} \right] \quad (1)$$

ここで、 $k_2 = \frac{15}{f'_c + 20} + 0.7$ 、 $k_3 = \frac{5(n+2)}{7n+8}$

w はひび割れ幅(mm)、 k_1 は鋼材形状の影響を表す係数(異形鉄筋では、1.0)、 k_2 はコンクリートの品質の影響を表す係数、 f'_c はコンクリートの圧縮強度(N/mm²)、 k_3 は引張鋼材の段数の影響を表す係数、 n は引張鋼材の段数、 c はかぶり(mm)、 c_s は鋼材の中心間隔(mm)、 ϕ は鋼材径(mm)、 σ_{se} は鉄筋応力度の増加量(N/mm²)、 E_s は鉄筋のヤング係数(N/mm²)、 ε'_{csd} はコンクリートの収縮・ク

*1 鹿島建設(株) 技術研究所 土木構造グループ 研究員 工修 (正会員)

*2 鹿島建設(株) 技術研究所 土木構造グループ グループリーダー 工修 (正会員)

*3 鹿島建設(株) 技術研究所 土木構造グループ 主任研究員 工修 (正会員)

*4 鹿島建設(株) 東北支店 常磐自動車道前田川橋(PC上部工)JV 工修 (正会員)

リープ等によるひび割れ幅の増加を表す数値である。

示方書の改訂資料³⁾によると、係数 k_2 の評価は、五角ら⁴⁾が実施した圧縮強度が 17~100 N/mm² の鉄筋コンクリート（以下、RC）の一軸両引き実験結果に基づき決定されている。本研究では同様な一軸引張（一軸両引き）試験を実施し、150 N/mm² 級の超高強度コンクリートを用いた場合の式(1)の適用性について検討した。

2.2 定着長の算定式

式(2), (3)に示方書の引張鉄筋の基本定着長、コンクリートの付着強度の算定式を示す。

$$l = \alpha \cdot \frac{f_y}{4f_{bo}} \phi \quad (2)$$

$$f_{bo} = 0.28 \cdot f_c'^{2/3} \quad (3)$$

ここで、 l は基本定着長(mm)、 ϕ は主鉄筋の直径(mm)、 f_y は鉄筋の引張降伏強度(N/mm²)、 f_{bo} はコンクリートの付着強度(N/mm²)、 f_c' はコンクリートの圧縮強度(N/mm²)、 α はかぶりと横方向鉄筋により決定される係数であり、鉄筋間隔と横方向鉄筋量に関する係数 K_c の値に基づいて $\alpha = 0.6 \sim 1.0$ の値をとる。なお、 α については、鉄道構造物等設計標準・同解説（以下、鉄道標準）⁵⁾に示されている式(4)についても検討した。

$$\alpha_b = (0.75 / K_c) + 0.2 \quad (4)$$

伊藤ら⁶⁾は圧縮強度が 90N/mm² 程度のコンクリートについて、重ね継手部を有する RC 梁部材の曲げ載荷実験を実施し、定着長の評価に関する検討を実施している。本研究では 150N/mm² 級の超高強度コンクリートを用いて同様な実験を実施し、定着長の評価方法について検討した。

3. 実験概要

3.1 超高強度コンクリートの配合

一般に、超高強度コンクリートは水結合材比が極めて小さいため大きな自己収縮が生じ、耐力の低下や鋼材の拘束によるひび割れが生じる可能性がある。そこで、著者らは自己収縮を低減する方法として、人工軽量骨材と収縮低減剤を併用する方法を提案している⁷⁾。

表-1 に本実験に用いたコンクリートの配合を示す。配合 JLR は、自己収縮を低減した超高強度コンクリートで、水結合材比を 17% とすることにより 150 N/mm² 程度の圧縮強度が得られるものである。なお、自己収縮を低減しないものと比較して自己収縮は 30% 程度になっている。また、ひび割れ幅確認実験においては、比較用として普通強度コンクリート（配合 N）についても検討した。

3.2 ひび割れ幅確認実験

表-2 にひび割れ幅確認実験のケースを示す。ひび割れ幅確認実験時におけるコンクリートの圧縮強度は、配合 JLR では材齢 15 日で 133.8N/mm²、材齢 30 日で 150.0N/mm²、配合 N では材齢 15 日で 38.6N/mm² であった。

図-1 に供試体の形状寸法および計測位置を示す。供試体は、100×100×1,000 mm のコンクリート角柱の中心に D19-USD685（実験時降伏強度 687N/mm²）を 1 本埋め込んだものである。

表-2 ひび割れ幅確認実験ケース

試験体名	配合	鉄筋径	実験時コンクリート強度(N/mm ²)
JLR150	JLR	D19	150.0 (f'_{30})
JLR130			133.8 (f'_{15})
N	N		38.6 (f'_{15})

表-1 コンクリートの配合

記号	W/C (%)	空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)					SP 剤 (C×%)	RA 剤 (C×%)	強度レベル
			W	C	S	G	JL			
JLR	17.0	1.5	155	912 ^{※1}	622	638	108	1.5	0.5	超高強度
N	55.0	4.5	172	313 ^{※2}	819	988	—	0.5	—	普通強度

C：セメント，S：細骨材，G：粗骨材，JL：人工軽量骨材，RA：収縮低減剤，SP：高性能減水剤

※1 シリカフェームを混入したセメント ※2 普通ポルトランドセメント

荷重は、アムスラー型万能試験装置に供試体を鉛直に設置し、鉄筋の両端をつかんで単調に引張力を増加させた。計測項目は、引張荷重、鉄筋の平均ひずみ、ひび割れ幅およびひび割れ間隔とした。鉄筋の平均ひずみについては、図-1に示すように供試体両端面において鉄筋に取付けた治具を介して鉄筋の変位を変位計により計測し、長さ変化を供試体長で除することにより算出した。なお、取付治具は供試体両端面から30mm程度離れた位置に設置したため、鉄筋の露出部にひずみゲージを貼付して鉄筋の弾性変形分を補正した。また、ひび割れ幅についてはマイクロスコープにより計測し、ひび割れ間隔については鋼尺により測定した。

3.3 定着長確認実験

表-3に定着長確認実験のケースを示す。試験体は重ね継手長および横方向鉄筋の有無をパラメータとした計3体である。いずれの試験体も引張側の主鉄筋が降伏する前に、重ね継手部において破壊するように設計した。なお、定着長確認実験時におけるコンクリートの圧縮強度は、材齢28~32日で150~160N/mm²であった。

図-2に試験体の形状寸法を示す。試験体は、幅が200mm、高さが350mm、スパン長が2,400mmの矩形RC梁部材であり、引張側主鉄筋のスパン中央部に重ね継手を有するものである。コンクリートは表-1に示す配合JLRを使用した。また、主鉄筋にはD19-USD685(実験時降伏強度781N/mm²)、継手部の横方向鉄筋およびせん断補強

筋にはD6-USD785(実験時降伏強度1036N/mm²)を使用した。

荷重は、等曲げ区間に重ね継手部が含まれるような2点荷重とし、継手部が破壊するまで単調に荷重を増加させた。計測項目は載荷荷重、各計測位置の鉛直変位および主鉄筋、横方向鉄筋のひずみである。また、ひび割れ発生状況や破壊状況を観察した。

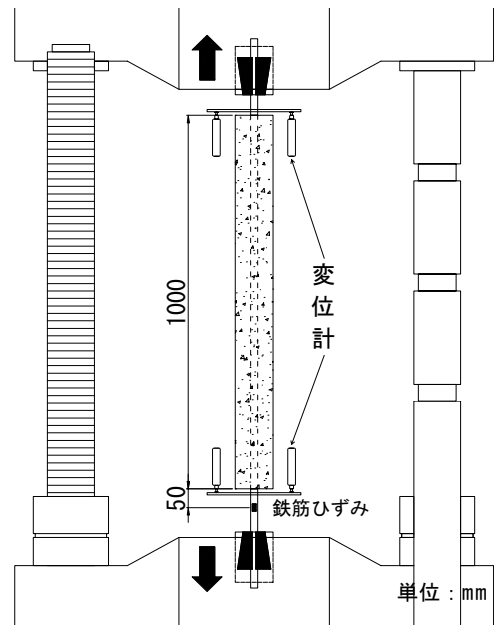


図-1 供試体の形状寸法および計測位置

表-3 定着長確認実験ケース

試験体名	主鉄筋径	重ね継手長 L (mm)	横方向鉄筋間隔(mm)
LAP250	D19	250	—
LAP350		350	—
LAP250-S		250	50

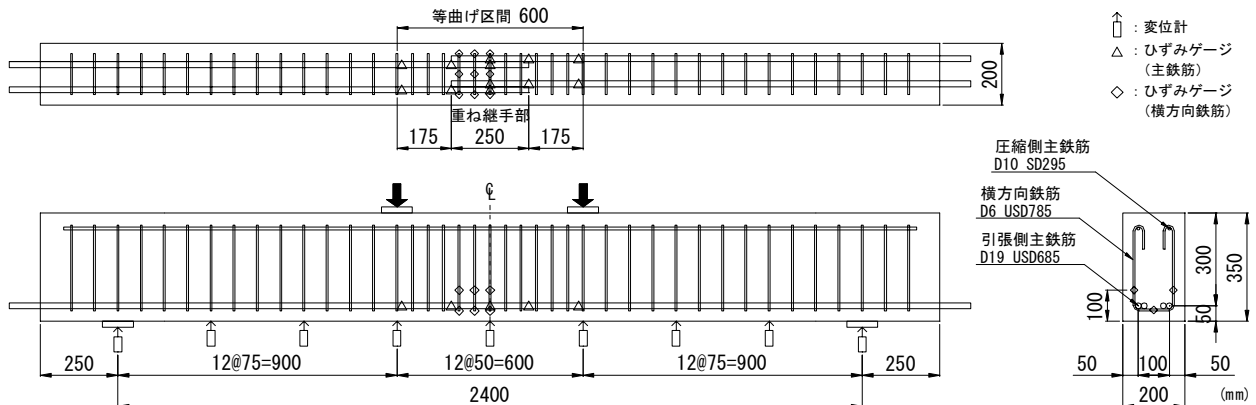


図-2 定着長確認試験体の形状寸法 (LAP250-S 試験体)

4. 実験結果および考察

4.1 ひび割れ幅確認実験

(1) コンクリート強度とひび割れ幅の関係

図-3 にコンクリート強度と平均および最大ひび割れ幅の関係を示す。なお、文献 4)と比較検討するため鉄筋応力度が 300 N/mm^2 時の値を示している。

文献 4)によれば、圧縮強度 $80 \sim 100 \text{ N/mm}^2$ の供試体間のばらつきが大きいものの、平均および最大ひび割れ幅は、コンクリート強度の増加に伴い減少傾向にあるとしている。一方、圧縮強度 150 N/mm^2 級の本実験結果と併せて全強度領域を見ると、圧縮強度の増加に伴い、平均および最大ひび割れ幅は小さくなる傾向にあることがより明確に認められる。

(2) ひび割れ幅への影響要因の検討

RCにおけるコンクリートは、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分担する。この効果（テンションスティフニング効果）が高いほど、同一荷重時におけるひび割れ幅が小さくなる。ここでは、文献 4)と同様にテンションスティフニング効果の影響について検討した。

図-4 にコンクリートの平均応力と鉄筋の平均ひずみとの関係を示す。なお、コンクリートの平均応力は下式(5)により算出した。

$$\sigma_{c,av} = \frac{P - A_s E_s \varepsilon_{s,av}}{A_c} \quad (5)$$

ここで、 $\sigma_{c,av}$ はコンクリートの平均応力 (N/mm^2)、 P は荷重 (N)、 A_s は鉄筋の断面積 (mm^2)、 $\varepsilon_{s,av}$ は鉄筋の平均ひずみ ($\times 10^{-6}$)、 A_c はコンクリートの断面積 (mm^2) である。

図-4 より、超高強度コンクリートを用いた場合は、普通強度コンクリートと比較して負担する引張応力が相対的に大きくなっていることが分かる。JLR130 の場合が JLR150 に比べて平均応力が大きくなる結果となっているが、これは、供試体における引張強度のばらつき、本載荷方法では曲げの影響を完全に排除できなかったことによるものと考えられる。本実験におけるテ

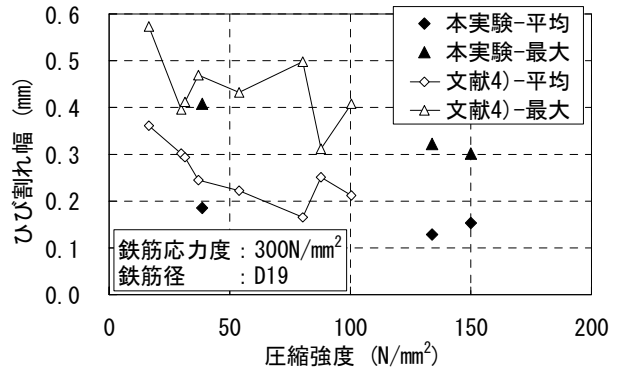


図-3 コンクリート強度とひび割れ幅の関係

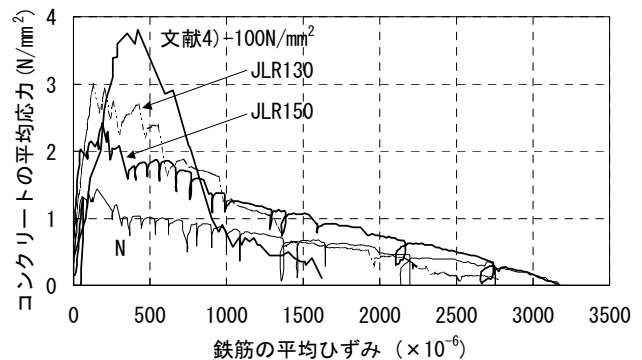


図-4 コンクリートの平均応力と鉄筋の平均ひずみ関係

ンションスティフニング効果は文献 4)における圧縮強度が 100 N/mm^2 のケースと同等かそれ以下であった。このことから、文献 4)と同様に、 150 N/mm^2 級の超高強度コンクリートについてもコンクリートのテンションスティフニング効果は、鉄筋応力度が 300 N/mm^2 (鉄筋平均ひずみ 1500×10^{-6} 程度) の場合では普通強度コンクリートと同程度であるため、図-3 のひび割れ幅が小さくなる要因ではないものと考えられる。

次に、図-5 にコンクリート強度と平均および最大ひび割れ間隔の関係を示す。なお、図の表示は図-3 と同様に示している。

圧縮強度 150 N/mm^2 級の本実験結果のひび割れ間隔は、平均で 120 mm 程度、最大で 170 mm 程度であり、文献 4)の 100 N/mm^2 の実験結果と近いものであった。文献 4)によれば、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て、ひび割れ間隔が漸減する傾向が認められること、特に圧縮強度 50 N/mm^2 以上の範囲では、

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するとしている。本実験結果においても、ひび割れ幅の大小がひび割れ間隔の大小と一致する結果であった。したがって、本コンクリートを用いた場合においても、ひび割れ分散性の向上により、ひび割れ幅が抑制されているものと考えられる。

(3) コンクリートの品質を表す係数の提案

式(1)におけるコンクリートの品質を表す係数 k_2 は、文献 4)の実験結果に基づいて 100N/mm^2 以下の高強度コンクリートの場合でも過大評価にならないように配慮して定式化されたものである³⁾。ここでは、圧縮強度 150N/mm^2 級の本試験結果を考慮したより合理的な係数 $k_{2,exp}$ として下式(6)を提案する。

$$k_{2,exp} = \frac{25}{f'_c + 15} + 0.45 \quad (6)$$

提案式(6)は、式(1)におけるコンクリートの品質を表す係数 k_2 と同様に、圧縮強度が 30N/mm^2 のデータを $k_{2,w} \doteq 1.0$ として、圧縮強度 150N/mm^2 級の本試験結果と併せて最小二乗法で求めた式を簡略化したものである。

図-6 にコンクリートの品質を表す係数について、示方書式と提案式を比較したものを示す。これより、提案式(6)を用いることによって、 100N/mm^2 以上の超高強度領域に対応した曲げひび割れ幅に及ぼすコンクリートの品質をより合理的に評価できるものと考えられる。しかしながら、試験データに限りがあるため、今後 100N/mm^2 以上の超高強度領域の試験データを収集して検討する必要がある。

4.2 定着長確認実験

(1) 荷重-変位関係

図-7 に各試験体の荷重-変位関係を示す。いずれの試験ケースにおいても、主鉄筋が降伏する前に継手部において破壊に至った。横方向鉄筋を配置していない LAP350, LAP250 では、重ね継手部の下縁かぶりコンクリートが剥落したと同時に、耐力が急激に低下した。一方、横方

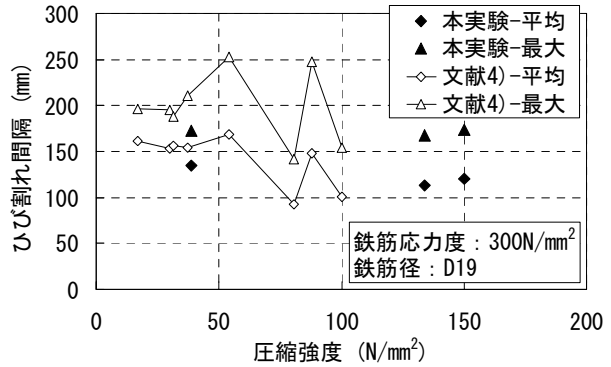


図-5 コンクリート強度とひび割れ間隔の関係

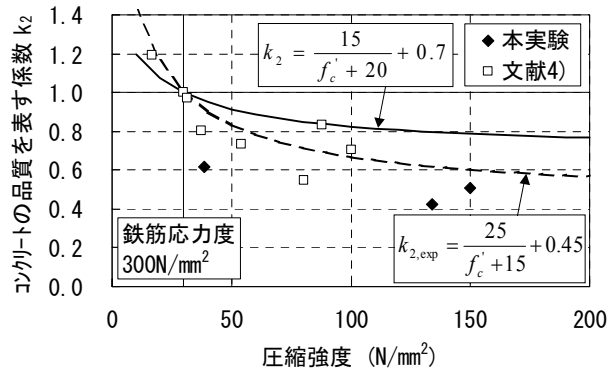


図-6 コンクリートの品質を表す係数

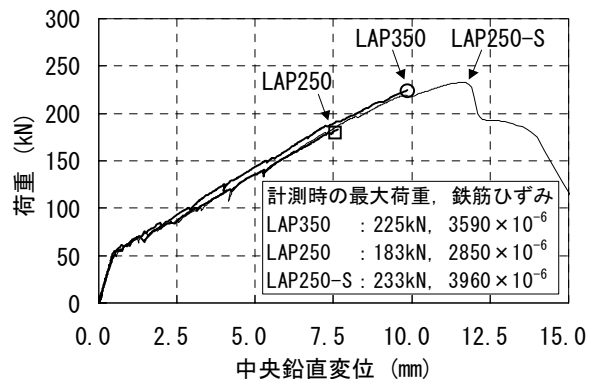
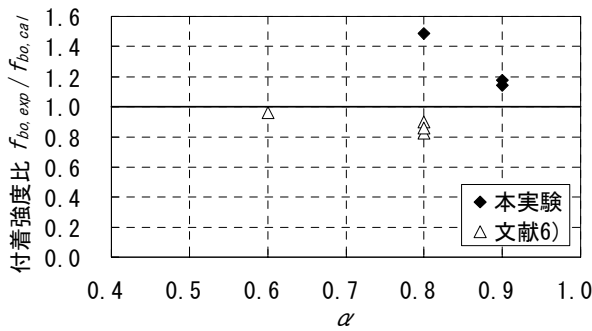


図-7 重ね継手実験の荷重-変位関係

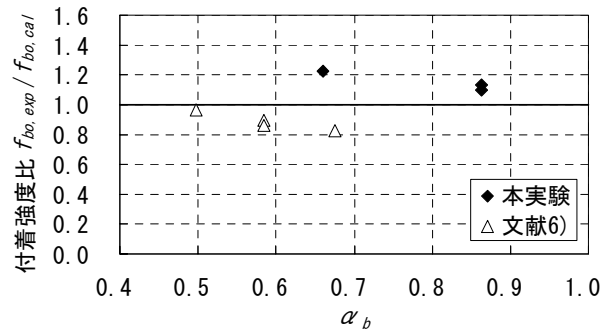
表-4 付着強度の比較

試験体名	実験値 $f_{bo,exp}$ (N/mm^2)		計算値 $f_{bo,cal}$ (N/mm^2)
	括弧内は α		
	土木学会	鉄道総研	
LAP350	8.76 (0.9)	8.40 (0.86)	7.67
LAP250	9.75 (0.9)	9.34 (0.86)	8.27
LAP250-S	12.04 (0.8)	9.92 (0.66)	8.10

向鉄筋を配置した LAP250-S では、横方向鉄筋の拘束効果によって LAP250 よりも耐力が向上し、最大荷重後もかぶりコンクリートが剥落することなく耐力が徐々に低下した。



(1) 示方書式



(2) 鉄道標準式

図-8 付着強度比

(2) 付着強度の検討

表-4 に各試験体のコンクリート付着強度の実験値と計算値を示す。なお、実験値は実験より得られた主鉄筋の最大応力を f_y に代入して式(2)から逆算し、計算値は式(3)を用いて算出した。

図-8 に横方向鉄筋とかぶりに関する係数 α と付着強度比(実験値/計算値)の関係を示す。また、図には伊藤らの実験結果⁶⁾も併せて示している。

図より、示方書式および鉄道標準式のどちらを用いた場合でも、本実験結果は安全側に評価され、鉄道標準式で算定した場合の方がより精度良く評価できることが分かった。一方、伊藤らの実験結果⁶⁾は本実験結果と異なり、多少危険側の評価となっている。これは、本コンクリートではシリカフュームを混入しているため、これにより鋼材とペーストの境界面が強化され付着強度が高くなった⁸⁾ためと考えられる。

以上のことから、本研究で用いた超高強度コンクリートの定着長の算定に当たっては、示方書および鉄道標準の算定式を拡張して適用しても安全側に評価できると言える。

5. まとめ

本研究の範囲内で得られた知見をまとめると、以下のとおりである。

- 1) コンクリート強度の増加に伴い、ひび割れ幅が小さくなることが確認できた。これは、コンクリートの高強度化によりひび割れ分散性が向上したためと考えられる。
- 2) 示方書の曲げひび割れ幅算定式におけるコ

ンクリートの品質を表す係数 k_2 について、圧縮強度が 150N/mm^2 程度までの超高強度領域を考慮した算定式(6)を提案した。

- 3) 定着長の算定に当たっては、示方書および鉄道標準の算定式を拡張して適用しても概ね安全側に評価できると言える。

参考文献

- 1) 日紫喜剛啓ほか: 超高強度コンクリートのプレテンション部材への適用性に関する実験的研究, 材料学会, vol.53, No.6, pp.678-685, 2004
- 2) 土木学会: コンクリート標準示方書 [2002 年制定] 構造性能照査編, 2002
- 3) 土木学会: 2002 年版コンクリート標準示方書改訂資料, コンクリートライブラリー108, 2002
- 4) 五角 亘ほか: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.3, pp.1333-1338, 2001
- 5) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説-コンクリート構造物, 1992
- 6) 伊藤 始ほか: 自己充填高強度コンクリートと高強度鉄筋を用いた部材の基本定着長に関する研究, 土木学会第 55 回年次学術講演会講演概要集, 第 5 部, pp.1156-1157, 2000
- 7) 高田和法ほか: 自己収縮を低減した超高強度コンクリート (150N/mm^2 級) の開発, 鹿島技術研究所年報, Vol.51, pp.79-86, 2003
- 8) 土木学会: シリカフュームを用いたコンクリートの設計・施工指針 (案), コンクリートライブラリー80, 1995