# 報告 若材齢時における超高強度コンクリート中の鉄筋の付着特性

高森 直樹\*1·寺岡 勝\*2

要旨: 圧縮強度が 150N/mm<sup>2</sup> 級の超高強度鉄筋コンクリート部材は、コンクリートの若材齢での自己収縮な どの影響でひび割れ発生の危険性がある。主筋周りに生じる微小なひび割れおよび断面に生じるひび割れが、 主筋の付着性能に与える影響の評価を目的に、鉄筋コンクリート構造部材要素についての若材齢時における 主筋の付着特性実験を行い、以下の知見を得た。鉄筋拘束一軸拘束実験において、鉄筋の歪分布および拘束 応力は、鉄筋端部の拘束の有無により若干の影響をうける。模擬柱主筋の片引き付着強度は、主筋位置によ り発現状況および強度への影響をうける。片引き付着強度は、材齢3日迄に急激に発現し、以降微増する。 キーワード: 超高強度コンクリート、若材齢、自己収縮ひずみ、主筋、付着特性

#### 1. はじめに

圧縮強度が 150N/mm<sup>2</sup>級の超高強度コンクリートは, 若材齢時に大きな自己収縮ひずみが生じ<sup>1)</sup>,それが鉄筋 により拘束されるとコンクリートに応力が生じ,ひび割 れの原因となる<sup>2)</sup>。また,水和熱に起因する温度応力が 加わり,ひび割れ発生の可能性がより一層増す<sup>2)</sup>。従っ て,超高強度を用いた鉄筋コンクリート構造(以下 RC 構造と略記)の実用化のためには,若材齢での自己収縮 応力などによるひび割れ発生原因の追究とそれが部材 の構造性能に及ぼす影響の評価が不可欠である。

片寄ら<sup>3)</sup>,丸山ら<sup>4,5)</sup>は,超高強度コンクリートを用 いた実大 RC 柱の模擬実験を行い,若材齢時のひび割れ 発生確認を行い,併せて発生条件の評価を試みている。

若材齢での自己収縮応力などによるひび割れ発生原 因の追求には、コンクリート打設直後からの力学特性を 把握しておくことが重要である<sup>6</sup>。また、それが部材の 構造性能に及ぼす影響の評価には、主筋周りに生じる微 小なひび割れおよび断面に生じるひび割れが、付着性能、 延いては部材構造性能に与える影響を評価することが 必要である。現状では、若材齢での超高強度コンクリー ト中での鉄筋の付着特性に関する実験データは極めて 少なく、超高強度コンクリートを用いた RC 部材の構造 性能の評価には、不十分な点があると思われる。

そこで、本研究では、圧縮強度が 150N/mm<sup>2</sup>級の超高 強度コンクリートを用いた RC 構造部材要素について、 若材齢時における主筋の付着特性のデータを得ること を目的にして実験を行った。具体的には、鉄筋拘束試験 体による一軸拘束、模擬柱試験体の主筋の引抜き付着実 験、および供試体による引抜き付着実験の各実験を行い、 その結果について報告する。

\*1 (株) フジタ 技術センター 工修 (正会員)

\*2 呉工業高等専門学校 建築学科 教授 博士(工学) (正会員)

# コンクリート使用材料とその若材齢における特性 コンクリートの使用材料および調合

表-1にコンクリートの調合を示す。水結合材比は 15%で,設計基準強度は F<sub>c</sub>130N/mm<sup>2</sup>である。コンクリ ートは,2008年11月25日に実機プラントで練り混ぜ, アジテータ車で実験場に運搬し,そのコンクリートから 採取して素材および RC 部材要素試験体を作成した。供 試体採取は,練混ぜ後約2時間で完了した。

#### 2.2 コンクリート材料試験結果

フレッシュコンクリートの試験は、スランプフロー (JIS A 1150),空気量(JIS A 1128),練上がり温度(JIS A 1156)および凝結試験(JIS A 1147)について行った。 表-2にフレッシュコンクリートの試験結果を示す。

表-1 コンクリートの調合

水結		混和剤			
合材	-1~*1	結合材*2	砕砂*3	砕石*4	使用量
比(%)	<u>Ж</u> .				(B×%)
15	155	1033	466	824	1.775

\*1 混和剤込み

\*2 低熱ポルトランドセメント:シリカフューム=9:1
(質量比),密度 3.08g/cm<sup>3</sup>, B は結合材量を示す。

\*3 細骨材 富津産山砂,表乾密度 2.62g/cm<sup>3</sup>

\*4 粗骨材 桜川産砕石,表乾密度 2.64g/cm<sup>3</sup>

表-2 フレッシュコンクリートの試験結果

スランフ゜	70-1	時間	空気	コンクリート	気温	凝結	試験
70-	(利	»)	量	温度		始発	終結
(cm)	50cm	停止	%	°C	°C		
73.0	12.8	180	1.6	17.0	15.4	8 時間	10時間
		以上				50分	12分

-595-

コンクリート素材試験は, 圧縮特性(強度: JIS A 1108 試験法, ヤング係数: JIS A 1149 試験法), 割裂強度(JIS A 1113 試験法)について行った。測定は, 材齢1日未満, 1日,3日,7日および28日を基本とした。

図-1 に、圧縮強度、ヤング係数、ポアソン比および 割裂強度の各試験結果を始発からの経時時間と対応さ せて示す。各材齢での結果は、3 供試体の平均値である。 圧縮強度は、材齢7日で100 N/mm<sup>2</sup>を超え、28日で135 N/mm<sup>2</sup>となっている。ヤング係数は、材齢28日では4.2 ×10<sup>4</sup> N/mm<sup>2</sup>となっている。ポアソン比は、材齢1日で 0.2 を超え、その後材齢28日まで微増している。割裂強 度は材齢28日で7 N/mm<sup>2</sup>となっている。

図-2に、実験棟コンクリート打設場所の気温、模擬 柱(断面が 1000mm 角で厚さが 200mm (上下断熱)), 無 筋コンクリート中心 (断面が 200mm 角で長さが 1000mm), スパイラルフープ筋のみ有りのコンクリート 中心(断面が 200mm 角で長さが 1000mm)の各温度履歴





を示す。模擬柱は図-8 に示す位置で中心,中間,端部での計測を行い,模擬柱中心では,コンクリート練上がり 温度に対して約35℃温度が上昇し,また鉄筋拘束試験体 対応の200mm角断面中心では約15℃上昇している。

図-3に、部材中心(断面が200mm角で長さ1000mm) の自己収縮歪を示す。図中の歪は温度歪を含んだ値であ る。材齢28日で、無筋試験体では約500µ、フープ筋の み有りの試験体では約400µとなっている。



# 3. RC 構造部材要素の若材齡時付着特性実験

ここでは、1. 鉄筋拘束試験体による一軸拘束、2. 模擬柱試験体の主筋の片引き付着強度、および3. 片引 き付着強度、についての各実験概要とその結果を示す。 試験体は、いずれも表-1に示すコンクリートを用いた。 表-3に使用鉄筋の力学的特性を示す。主筋にはネジ節 鉄筋を使用した。型枠は、いずれも材齢2日で脱型した。

表-3 鉄筋の力学的性能

	降伏	降伏	ヤンク゛	引張	破断
呼び	点	点歪	係数	強度	伸び
名	$[N/mm^2]$	(µ)	$[10^5 \text{ N/mm}^2]$	$[N/mm^2]$	(%)
D41	711	3731	1.996	921	15.3
D29	736	3693	1.993	948	12.5
D22	774	4432	1.906	972	11.1
D13	323	1795	1.848	466	30.9
D6	309*	1774	1.555	492	22.1

注:\*は 0.2%耐力, 単位: σ, E[×10<sup>5</sup> N/mm<sup>2</sup>]

# 3.1 鉄筋拘束試験体による一軸拘束応力

ここでは,鉄筋拘束試験体を用いて若材齢時における 鉄筋による拘束応力の発現状況の実験結果を示す。

#### (1) 実験概要

試験体は**表**-4に示す6体で,実験因子は試験体鉄筋 の端部拘束の有無および鉄筋(主筋)の径(41mm, 29mmm および22mmの3種類)である。試験体形状を 図-4に示す。断面は200mm×200mmで,長さが 2000mmである。断面中心に主筋を配し,スパイラル筋 D6-@30で割裂補強をしている。主筋には,100mmピッ チに歪ゲージを貼付し,コンクリート打設時からの拘束 応力の増加を計測した。また試験体コンクリート全長の 経時的変化を測定した。試験体端部拘束は、**写真-1**に 示す装置を用いて鋼板とナットにより行った。主筋の付 着区間は 1900mm とし,試験体両端部の各 50mm の範囲 には無付着の処置を施した。

鉄筋呼び名	D41	D29	D22
鉄筋比(%)	3.35	1.61	0.97
端部拘束有り	D41 拘束	D29 拘束	D22 拘束
端部拘束無し	D41 自由	D29 自由	D22 自由

表一4 鉄筋拘束試験体一覧

鉄筋比=主筋の有効断面積/試験体断面積





写真-1 試験体端部拘束装置

#### (2) 実験結果

図-5に、鉄筋 D41 および D22 の試験体を例に取り, 各材齢の主筋歪分布を示す。図-6に,材齢 28 日まで の試験体中央部断面の拘束応力の発現状況を示す。コン クリートに生じる拘束応力は,鉄筋歪と鉄筋のヤング係 数を評価し,力の釣合条件から算出した。ひび割れの発 生は,材齢 28 日までの間では,いずれの試験体表面に おいても観察されなかった。

拘束主筋の歪は材齢1日までで急激に大きくなってい る。即ち、コンクリートの自己収縮歪の増加とともに大 きくなっている。試験体中央部分の主筋歪は、端部拘束 の有る場合に比べて、無い場合が若干大きい値を示して いる。即ち、主筋端部の拘束の影響が見られる。また、 鉄筋比の小さい試験体ほど歪が大きい値となっている。

試験体中央部断面の拘束応力は,鉄筋比に比例して大きくなり,材齢28日において D41鉄筋を用いた試験体では約 1.5N/mm<sup>2</sup>, D22鉄筋を用いた試験体では約 0.6N/mm<sup>2</sup>,となっている。

図-7に、主筋 D41 を用いた試験体での変位計による コンクリート全長の経時的変化を示す。計測値から線膨 張係数を 10µ/℃として温度変形を減じた。図中に図-5の歪の積分値が全長さ変化として計算した値を示す。 材齢 28 日のコンクリート全長の縮み量は、端部自由試 験体はばらつきがあるが約 0.5mm であるのに対して、拘 束試験体では自由試験体の約 80%の縮み量となり、端部 拘束の影響がみられる。歪の積分による計算値は、拘束 試験体の縮みは自由試験体に比べて若干小さくなった。

# 3.2 模擬柱試験体の主筋の引抜き付着実験

ここでは,若材齢時からの模擬柱の主筋の付着強度の 発現状況を調べるために,模擬柱主筋の引抜き実験を行 った結果を示す。

(1) 実験概要

試験体は、図-8に示す1体で、断面が1000mm角で、 厚さが200mmの模擬柱である。図中に温度測定位置(中心、中間、端部)を示す。コンクリート打設直後から





上下断面は断熱材による養生を,また主筋は保温養生を 行い,実大柱の温度状態を模擬した状態になるように配 慮した。主筋には 20 本の D41 ネジ節鉄筋を用い,横補 強筋には D13 を用いた。付着長さは, 200mm の上下各 40mm を無付着の処理を施した残りの 120mm である。

実験は、写真-2中の写真に示すように、1200kNの センターホールジャッキによる引抜きを行った。実験は、 試験体の各角部の4箇所を、材齢1日、3日、7日およ び27日で行った。その際、荷重端側および自由端側の 鉄筋の抜出し量を、変位計を用いて測定した。また、付 着長さ中央で鉄筋の歪を測定した。

# (2) 実験結果

図-9に模擬柱主筋の付着強度試験結果を示す。図中 には、各材齢(1D, 3D, 7D, 27D)に対応する4角部の



実験結果と主筋位置ごとの付着強度発現状況とを示す。 付着強度は、隅筋では材齢7日まで増大し、その後若干 低下しているのに対して、側筋では材齢3~27日の間に 殆ど付着強度の変化が見られない。中筋の付着強度発現 状況は、隅筋のそれに類似しているが、拘束が大きいた めに付着強度は隅筋に比べて大きくなっている。また、 材齢7日から28日までの強度低下が大きく、材齢28日 の付着強度は材齢1日のそれとほぼ同じになっている。 この現象には、鉄筋周りの自己収縮および温度応力によ る影響も考えられる。詳細な検討は今後の課題としたい。

図-10に、模擬柱隅主筋を例に取り、材齢ごとに、 付着長さでの平均付着応力と自由端の抜出し変位との 関係を示す。最大付着強度を発揮する時の自由端抜出し 変位量は、若材齢ほど大きく、7日以降では0.2mm 程度 のほぼ一定値になっている。

図-11に、模擬柱主筋の付着実験後のコンクリート ひび割れ状況を示す。材齢1日を除き、著しい付着割裂 を伴った破壊状況を示している。この破壊状況には横補



図-11 模擬柱付着実験後のひび割れ状況



図ー13 供試体の付着強度の発現状況

強筋を引っ掻き出す影響が含まれていると考えられる。 付着割裂によるにひび割れが隣接する鉄筋まで達した 場合もあり,引抜き順によるひび割れ相互の影響も考え られる。詳細な検討は今後の課題としたい。

# 3.3 供試体による片引き付着実験

ここでは,若材齢時からの主筋の付着強度の発現状況 を調べるため,供試体による引抜き付着実験結果を示す。

#### (1) 実験概要

試験体形状を図-12に示す。コンクリート寸法は 200mm角で、厚さ200mmである。主筋はD41(SD685) のねじ節鉄筋で、スパイラル筋D6@30(SD295A)を割 裂補強に施している。付着長さは、厚さ200mmの上下 各40mmを無付着の処理を施した残りの120mmであり、 模擬柱主筋の付着長さに対応させている。試験体は1材 齢につき3体で、材齢は1日、3日、7日および28日 である。加力は、1200kNのセンターホールジャッキに よる片引き載荷を行った。その際、荷重端側および自由 端側の鉄筋の抜出し量を、変位計を用いて測定した。ま た、付着長さ中央で鉄筋の歪を測定した。

(2) 実験結果

図-13に、付着強度と材齢との関係を示す。付着強 度は材齢3日で20 N/mm<sup>2</sup>を超え、その後は微増する。 本実験での付着強度発現傾向は、模擬柱の隅、側および 中主筋のいずれの付着強度発現状況とも異なっている。 この原因として、供試体は模擬柱と温度履歴や拘束状況 が異なることが影響していると考えられる。

図-14に、各材齢での同じ平均付着応力時の鉄筋歪 分布を示す。図中のτbは荷重を(付着長さ×周長)で 除した平均付着応力を示す。図-16に、材齢1日、3 日および7日の付着実験終了後のひび割れ状況を示す。 材齢が小さいうちは、荷重端と中央の歪差が小さく、荷 重端側での鉄筋の抜出しが考えられる。これは、ひび割 れ状況が荷重端の鉄筋周りのコンクリートの損傷が大 きく鉄筋の抜出すモードであったことと一致する。また、



材齢が大きくなるにつれ、荷重端から自由端までの付着 区間でのひずみの勾配から付着応力の負担が一様に近 づいている。これはひび割れ状況で材齢3日では鉄筋の 抜出しによる鉄筋周囲の損傷と割裂によるひび割れが 伴う破壊になり、材齢7日以降では割裂によるひび割れ が顕著になっていたことと一致する。

図-16に、材齢ごとに、付着長さでの平均付着応力と 自由端の抜出し変位との関係を示す。各材齢の試験結果 共に、自由端抜出し変位が約0.2mmに達すると、抜出し 変位が急激に増加している。この傾向は、模擬柱主筋で 測定された平均付着応力と自由端の抜出し変位との関 係と明らかに異なる。これは、破壊状況を比較すると、 模擬柱の方が、材齢の小さい段階から抜出しよる鉄筋周 囲の損傷が少なく付着割裂によるひび割れが顕著であ り、抜出し量が小さいことと一致する。



自由端抜出し変位関係

#### 4. まとめ

圧縮強度が 150N/mm<sup>2</sup>級の超高強度コンクリートを用 いた鉄筋コンクリート構造部材要素についての若材齢 時における付着特性の実験結果より,以下の知見を得た。

- (1)若材齢時における使用コンクリートの基礎物性(圧縮強度、ヤング係数、ポアソン比、割裂強度、自己収縮歪)の発現のデータを得た。
- (2) 鉄筋拘束試験体による一軸拘束実験において,鉄筋 の歪および拘束応力分布は,鉄筋の端部の拘束の有

無により,若干の影響をうける。コンクリートの収 縮を拘束する鉄筋比が大きくなるほど,発生する内 部応力は大きくなることが確認できた。

- (3) 模擬柱試験体の主筋の片引き付着強度の発現は、主筋位置(隅,側および中)による影響を受ける。この原因として、主筋位置による自己収縮および温度応力の違いと主筋拘束の違いの影響が考えられた。
- (4)供試体の引抜き付着強度は、材齢3日迄に急激に発現し以降微増となる。破壊モードは、模擬柱試験と同様に、材齢3日以降では割裂を伴うモードになった。
- (5) 模擬柱の引抜き付着強度の発現状況は, 模擬柱の隅, 側および中のいずれの主筋とも異なっていた。この 原因として,試験体種類による主筋周りのコンクリ ートの自己収縮および温度応力の違い,および拘束 の違いが影響したものと考えられた。

謝辞 本研究の一部は、平成 20 年度科学研究費補助金
(基盤 A)(研究代表 田中仁史,課題番号:20246090),
(基盤 B)(研究代表 河野進,課題番号:20360252)の
補助を受け実施した。関係各位に記して謝意を表する。

# 参考文献

- 田澤栄一,宮沢伸吾:コンクリートの自己収縮ひずみの予測法に関する研究,土木学会論文集, No.571/V36, pp.211-219, 1997
- 今本啓一,大谷博:超高強度鉄筋コンクリート架構 試験体に生じたひび割れに関する一検討,日本建築 学会論文報告集,No.495, pp.1-8, 1997
- 片寄哲務,高森直樹,西田浩和,寺岡勝:高強度コンクリートの若材齢時における力学特性と自己収縮挙動,コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1,2006
- 丸山一平,佐藤良一:超高強度コンクリートを用いた RC 部材中の鉄筋近傍における微細ひび割れの発見,日本建築学会構造系論文報告集,第617号,pp. 1-7,2007.7
- 5) 丸山一平,鈴木雅博,中瀬博一,佐藤良一:温度履 歴が RC 柱の初期応力・初期欠陥に及ぼす影響に関 する実験的検討,一超高強度コンクリートを用いた RC 柱の初期応力・初期欠陥に関する研究 その 1 一,日本建築学会構造系論文報告集,第 629 号, pp. 1035-1042,2008.7
- 6) 寺岡勝,高森直樹,片寄哲務ほか:超高強度コンク リートの若材齢における力学特性に関する実験的 研究 その 1,その2,日本建築学会大会学術講演 梗概集,A-1,pp363-366,200