

報告 材齢 1 年における超高強度コンクリート中の鉄筋の付着特性

佐藤 幸博^{*1}・高森 直樹^{*1}・寺岡 勝^{*2}

要旨：圧縮強度が 150N/mm² 級の超高強度コンクリートを用いた部材は、コンクリートの若材齢時の自己収縮の影響により、ひび割れを生じる危険性がある。前報では、若材齢時の主筋の付着特性実験を行い、その結果について報告した。本報は、前報に引き続き行った材齢 1 年の付着特性実験について報告するものである。実験の結果、1) 一軸拘束試験体に生じる拘束応力度は、鉄筋比にほぼ比例して増大する、2) 材齢 1 年の両引き付着実験における平均付着応力度の最大値は 12~15N/mm² 程度に達する、3) 模擬柱主筋の片引き付着強度は主筋位置の影響を受け、供試体による片引き付着実験の場合と大きく異なる、などの知見を得た。
キーワード：超高強度コンクリート、自己収縮ひずみ、材齢、主筋、付着特性

1. はじめに

圧縮強度が 150N/mm² 級の超高強度コンクリートの問題点の一つとして、若材齢時に大きな自己収縮ひずみが生じ、これが鉄筋で拘束されることによりひび割れが生じる危険性があることが指摘されている^{1),2),3)}。したがって、この種のコンクリート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、若材齢時の自己収縮応力などによるひび割れ発生要因の追求や、それが部材の長期構造性能に及ぼす影響の評価が重要である⁴⁾。

そこで、本研究では、圧縮強度が 150N/mm² 級の超高強度コンクリートを用いた RC 構造部材要素の主筋の付着特性について、昨年度に引き続き⁵⁾、材齢 1 年の主筋の付着特性実験を行った。本報告は、その実験結果について報告するものである。

2. 試験体製作および使用材料

2.1 試験体製作

試験体は、昨年度報告した⁵⁾若材齢試験体と同じ 2008 年 11 月 25 日に製作したものである。コンクリートの調合、フレッシュコンクリートの試験結果などの詳細については、昨年度の報告⁵⁾を参照されたい。

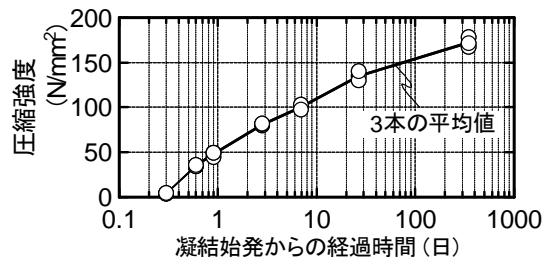
2.2 材齢 1 年までのコンクリート強度特性

材齢 1 年 (349 日) における素材試験結果を表-1 に、

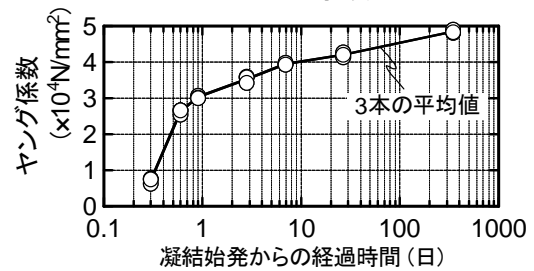
表-1 コンクリートの力学的性質

調査記号	材齢 (日)	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数* (×10 ⁴ N/mm ²)	圧縮強度時ひずみ度 (×10 ⁻⁶)	割裂引張強度 (N/mm ²)	ポアソン比*
F130	349	172	4.85	3831	6.88	0.26

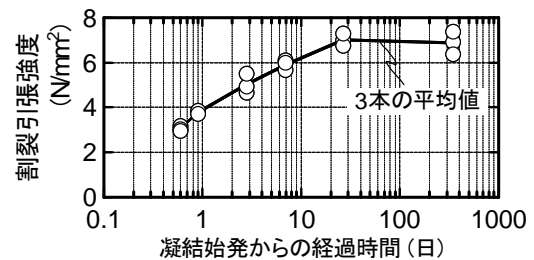
※圧縮強度の 1/3 時の値



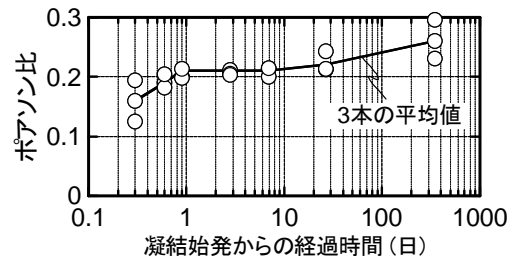
(a) 圧縮強度



(b) ヤング係数



(c) 割裂引張強度



(d) ポアソン比

図-1 コンクリートの素材試験結果

*1 (株)フジタ 技術センター 主任研究員 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)

圧縮強度、ヤング係数、ポアソン比および割裂引張強度と材齢との関係を図-1にそれぞれ示す。なお、材齢は、別途実施したJIS A 1147:2007に準拠したコンクリートの凝結試験による始発時間からの材齢である。また、圧縮強度試験はJIS A 1108:2006に、割裂引張強度試験はJIS A 1113:2006にそれぞれ準拠して実施し、供試体にはいずれもφ100×200mmの円柱供試体を用いた。

圧縮強度は、材齢7日で100N/mm²を超え、28日で135N/mm²、1年で172N/mm²となっている。ヤング係数、ポアソン比も材齢28日から1年にかけて増大している。これらに対し、割裂引張強度は、材齢28日で7N/mm²となり、材齢1年ではわずかに低下している。

3. RC 構造部材要素の付着特性実験

3.1 付着特性実験の概要

本研究では、材齢1年の主筋の付着特性に関し、以下の3種類の実験を行った。

- 1) 鉄筋拘束試験体によるコンクリート打設直後から約1年間の一軸拘束実験および材齢1年での両引き付着実験
- 2) 模擬柱試験体による主筋の片引き付着実験
- 3) 供試体による主筋の片引き付着実験

試験体を用いた鉄筋（主筋）の機械的性質を表-2に示す。なお、コンクリートは、いずれの試験体ともに、表-1に示したものをを用いた。次節より、上記3種類の実験概要および実験結果について述べる。

3.2 鉄筋拘束試験体による一軸拘束実験および両引き付着実験

(1) 実験概要

超高強度コンクリートの自己収縮応力などによるひび割れ発生要因を調べるために、鉄筋拘束試験体を用いて主筋による拘束ひずみの発現状況を、若材齢時から材齢1年まで長期計測した。

試験体一覧を表-3に、試験体形状を図-2にそれぞれ示す。試験体は計6体で、実験因子は主筋の径（鉄筋比）および試験体主筋の端部拘束の有無である。試験体断面は200×200mm、長さは2000mmである。主筋の付着区間は1900mmとし、試験体両端部50mmの範囲はコンクリートとの縁を切り、無付着区間とした。断面中心に配した主筋の周りには、スパイラル筋をD6@30で配して割裂補強した。主筋には、100mm間隔でひずみゲージを貼付し、コンクリート打設直後から約1年間、拘束ひずみの経時変化を計測した。

約1年間、拘束試験体の経時変化を計測した後、同一試験体を用い、主筋端部を拘束した試験体は拘束を解除した上で、両引き付着実験を行った。

(2) 鉄筋拘束による経時実験の結果

鉄筋による一軸拘束ひずみの経時変化の一例として、

鉄筋種類D41およびD22の試験体の各材齢における主筋ひずみ度分布を図-3に示す。いずれの試験体とも、材

表-2 主筋の機械的性質

種類	降伏点 (N/mm ²)	弾性係数 (×10 ⁵ N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)
D41	711	1.996	921	15.3
D29	736	1.993	948	12.5
D22	774	1.906	972	11.1

注) 試験法: JIS Z 2241:1998, すべてネジ節鉄筋

表-3 鉄筋拘束試験体一覧

鉄筋種類	D41	D29	D22
鉄筋比 (%)	3.35	1.61	0.97
端部拘束なし	D41自由	D29自由	D22自由
端部拘束あり	D41拘束	D29拘束	D22拘束

鉄筋比=主筋の公称断面積/試験体断面積

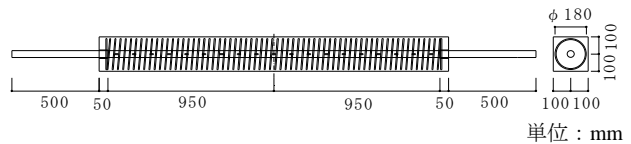


図-2 鉄筋拘束試験体形状

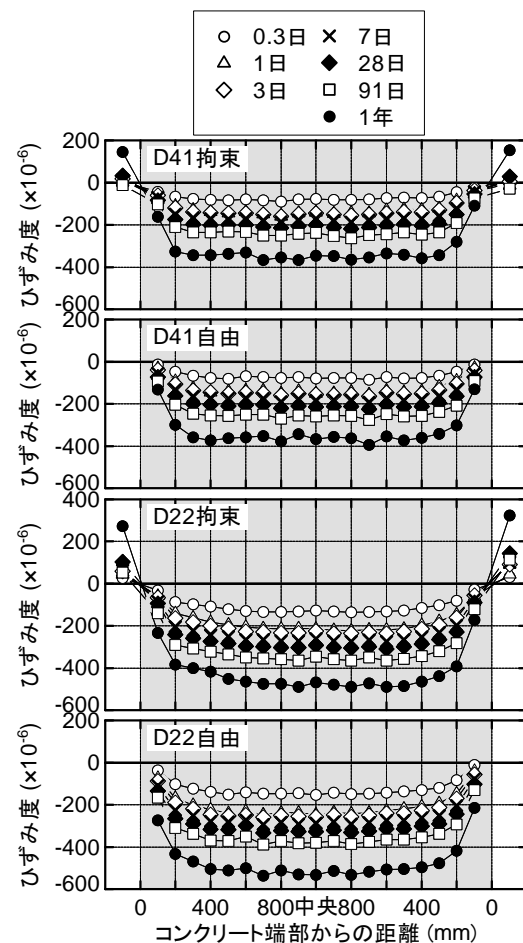


図-3 各材齢における主筋ひずみ度分布の例

齢1年目においても、試験体コンクリート表面に、主筋拘束によるひび割れの発生は観察されなかった。主筋径および主筋端部の拘束の有無に関わらず、拘束主筋のひずみ度は、材齢1日までの間で急増しており、コンクリートの自己収縮ひずみ増大と対応している。材齢1年での試験体中央部の主筋ひずみ度は、D41主筋では -350×10^{-6} 程度、D22主筋では $-500 \sim -550 \times 10^{-6}$ 程度である。

試験体中央断面における拘束応力度と材齢との関係を図-4に、各材齢の拘束応力度と鉄筋比との関係を図-5にそれぞれ示す。拘束応力度は、主筋のひずみ度より、断面内の力の釣合条件から算出した。拘束応力度は、いずれの主筋種類とも、材齢1日までに急増した後も徐々に増大し、材齢1年では、D41試験体(鉄筋比:3.35%)

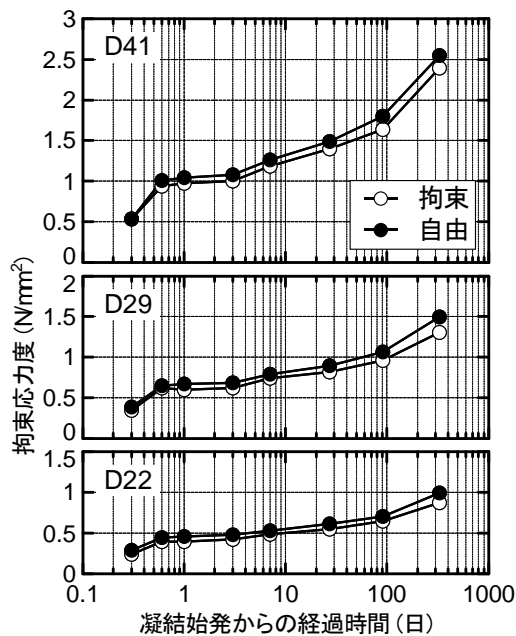


図-4 拘束応力度と材齢との関係

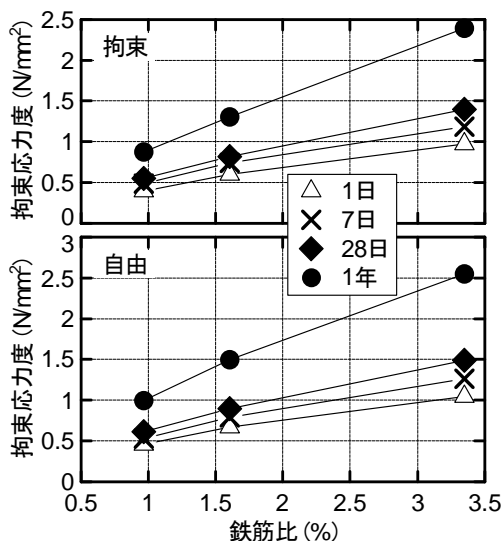
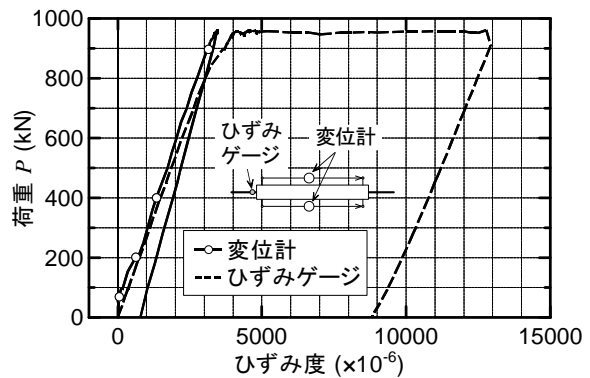
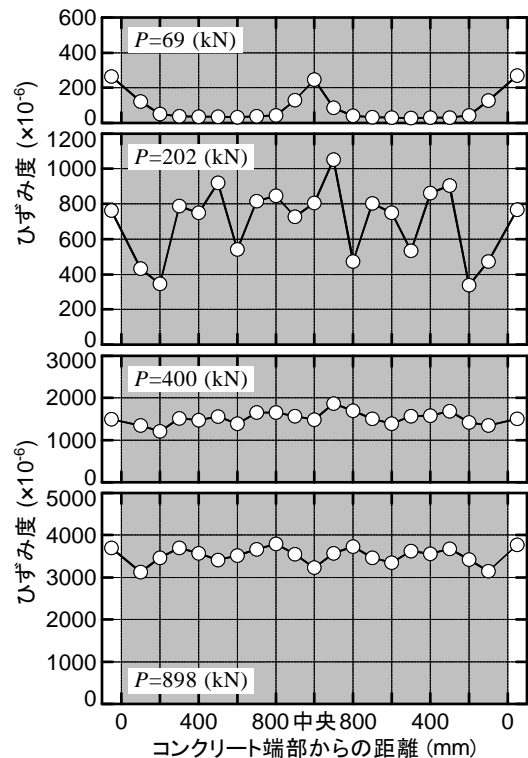


図-5 拘束応力度と鉄筋比との関係

で 2.5 N/mm^2 程度、D29試験体(鉄筋比:1.61%)で 1.5 N/mm^2 程度、D22試験体(鉄筋比:0.97%)で 1.0 N/mm^2 程度となっている。また、拘束応力度は、いずれの材齢時においても、鉄筋比に比例して大きくなっている。さらに、拘束応力度の大きさを端部拘束の有無で比較すると、「拘束」試験体よりも「自由」試験体が若干大きく、



(a) 両引き荷重～ひずみ度関係



(b) 主筋のひずみ度分布

図-6 両引き付着実験における荷重～ひずみ度関係およびひずみ度分布例(「D41拘束」)



(a) 「D41自由」試験体



(b) 「D22自由」試験体

図-7 ひび割れ状況例(実験終了時)

端部拘束の影響が見られる。

(3) 両引き付着実験の結果

「D41 拘束」試験体を例に採り、両引き荷重～ひずみ度関係および代表的な荷重段階での鉄筋ひずみ度分布を図-6に示す。また、「D41 自由」試験体および「D22 自由」試験体の実験終了時のひび割れ状況を図-7に示す。なお、図-6の荷重～ひずみ度関係上には、露出部の鉄筋に貼付したひずみゲージより計測したひずみ度と荷重との関係を併記した。また、主筋のひずみ度分布の各荷重段階は、荷重～ひずみ度関係上の○に対応している。図-6より、荷重 (P) = 69kN で試験体中央部に初ひび割れが生じ、その後、ひび割れの増加に伴い、 $P=202$ kN 時の様にひずみ分布に乱れが生じている。ひび割れ本数の増加が落ち着く $P=400$ kN では、ひずみ度分布の乱れは滑らかとなり、この状態のままひずみ度の値が増加している。この傾向は、ほかの試験体でも共通であった。

初ひび割れ強度と鉄筋比との関係を図-8に示す。なお、初ひび割れ強度は、試験体に最初にひび割れが生じたときの荷重をコンクリート断面で除した値である。同図中には、表-1に示したコンクリートの割裂引張強度のレベルを破線で併記した。初ひび割れ強度は、割裂引張強度よりもかなり小さく、また、鉄筋比が大きい試験体ほど小さくなる傾向を示している。すなわち、拘束応力度の大きさに応じて初ひび割れ強度が低下していることがわかる。初ひび割れ強度には、「拘束」試験体と「自由」試験体で明確な差は見られなかった。

「拘束」試験体を例に採り、主筋の平均付着応力度分布を図-9に示す。図中の平均付着応力度は、主筋に100mm 間隔で貼付したひずみゲージによるひずみ度計測値より算出した100mm 区間の平均付着応力度の絶対値であり、ひずみ度分布の勾配の向きは考慮されていない。なお、いずれの試験体の付着応力度分布も、平均付着応力度がほぼ最大となった時点のものである。平均付着応力度の最大値は、12~15N/mm² 程度となっており、主筋径が小さい試験体ほど平均付着応力度の最大値が若干大きい値を示している。

平均ひび割れ間隔と鉄筋比との関係を図-10に示す。なお、ここで示す平均ひび割れ間隔は、試験体全長を、実験終了時までに試験体表面に観察された4面中3面のひび割れ総本数で除して求めた値である。平均ひび割れ間隔は、鉄筋比が大きい試験体ほど大きくなる傾向を示した。また、平均ひび割れ間隔を「拘束」試験体と「自由」試験体とで比較すると、「自由」試験体の方が、若干、平均ひび割れ間隔が大きくなる傾向を示した。

3.3 模擬柱試験体主筋の片引き付着実験

(1) 実験概要

若材齢時から材齢1年までの模擬柱の主筋の付着強度

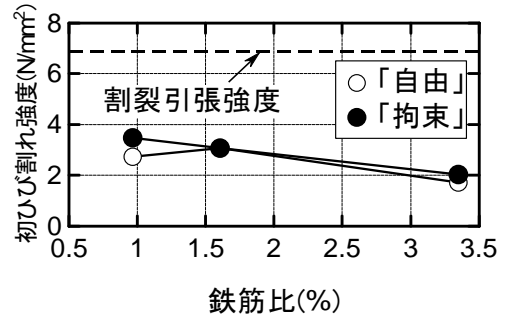


図-8 初ひび割れ強度と鉄筋比との関係

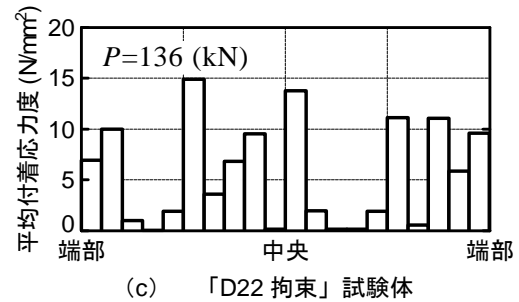
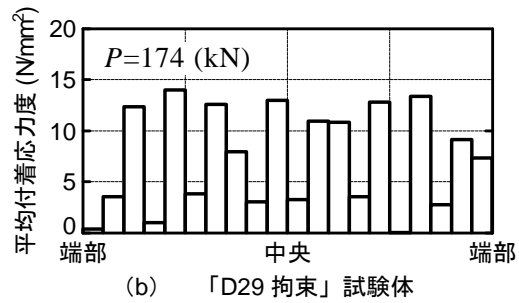
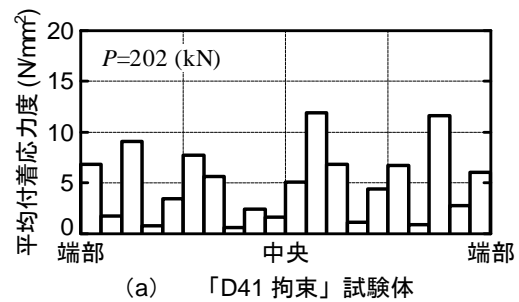


図-9 平均付着応力度（絶対値）分布の例

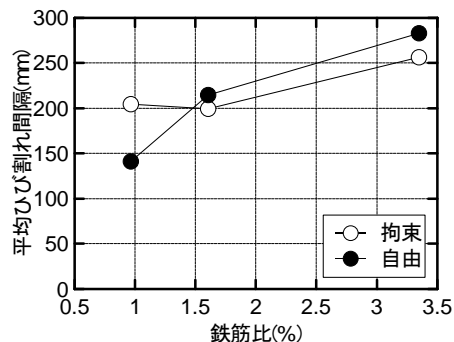


図-10 平均ひび割れ間隔～鉄筋比関係

の発現状況を調べるために、模擬柱試験体による主筋の片引き付着実験を行った。試験体形状および加力状況写真を図-11に示す。試験体は、1000mm角で厚さ200mmの模擬柱である。コンクリート打設直後から、コンクリート断面上下を断熱材養生、鉄筋を保温養生し、実大柱の温度状態を模擬した。主筋には20本のD41(SD685)ネジ節鉄筋を用い、横補強筋にはD13(SD295A)を用いた。試験体厚さ200mmの上下各40mmの間の主筋は、コンクリート端面における付着状態の乱れを避ける⁶⁾ため、鉄筋の溝を鑿で埋め、その上からビニルテープを巻き付けて節の凹凸を無くし、無付着となるよう処理した。したがって、付着長さは残りの120mmである。

実験は、図-11中に示すように、1200kNのセンターホールジャッキを用い、材齢1日、3日、7日、27日および1年で4箇所の主筋を引き抜いた。測定は、荷重のほか、荷重端側および自由端側の鉄筋の抜き出し量を変位計により、付着長さ中央の主筋のひずみ度をひずみゲージにより、それぞれ測定した。

(2) 実験結果

模擬柱主筋の片引き付着実験より得られた付着強度の発現状況(○印)を主筋位置ごとに図-12に示す。同図中には素材試験による圧縮強度の発現状況(●印)を併せて示した。「隅筋」の付着強度は、7日まで増大し、その後若干低下している。「中筋」の付着強度は、材齢3~27日の間にほとんど変化が見られないが、材齢1年では増大している。「側筋」の付着強度発現状況は、「中筋」に類似している。「側中筋」の材齢1年の付着強度は「側筋」に比べて小さい。

3.4 供試体による片引き付着実験

(1) 実験概要

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に、供試体による片引き付着実験を行った。

供試体形状を図-13に示す。供試体は、厚さ200mmで200mm角のコンクリート断面中央に主筋が1本配置されたものである。主筋にはD41(SD685)のねじ節鉄筋を用い、スパイラル筋D6@30(SD295A)により割裂補強を施している。付着長さは、模擬柱試験体と同一であり、厚さ200mmの上下各40mmを無付着処理した残

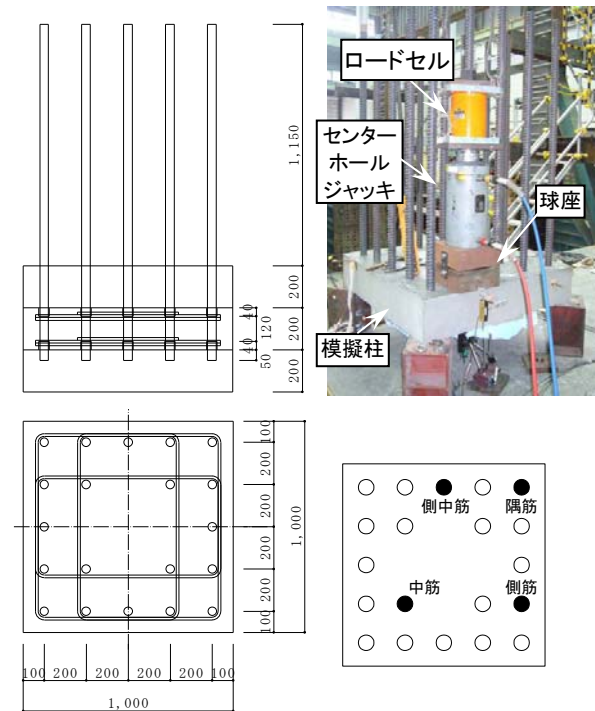


図-11 模擬柱試験体形状および実験状況写真

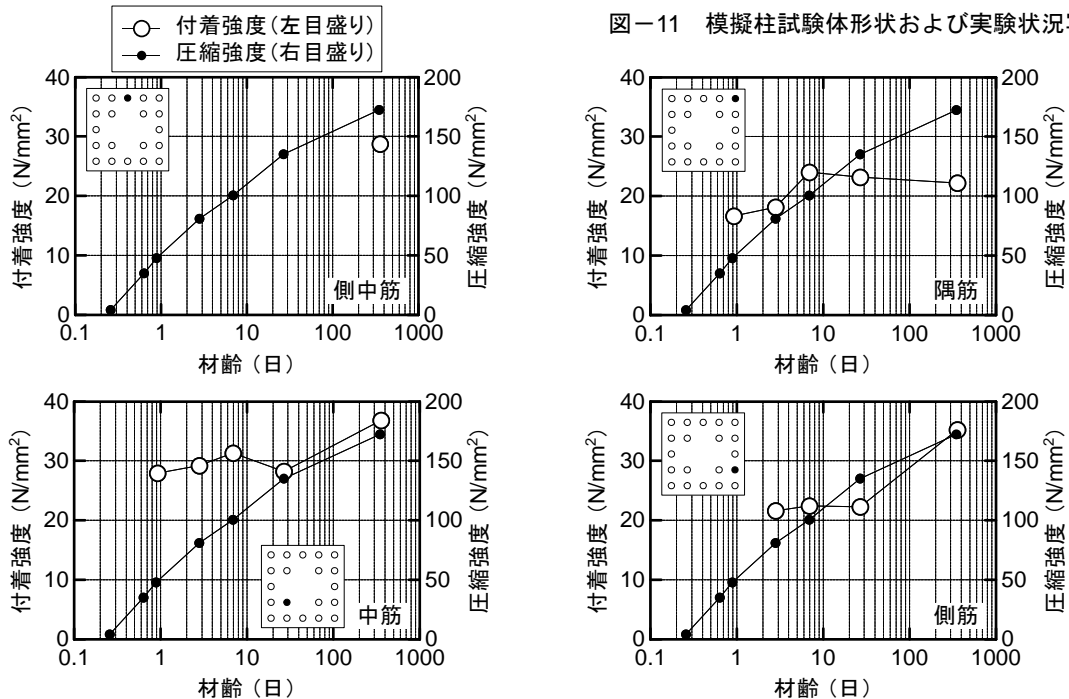


図-12 模擬柱主筋の付着強度の発現状況

りの 120mm である。供試体は 1 材齢につき 3 体とした。加力は、1200kN センターホールジャッキによる片引き載荷とした。測定は、荷重のほか、荷重端側および自由端側の鉄筋の抜きし量を変位計により、付着長さ中央の鉄筋のひずみ度をひずみゲージにより、それぞれ測定した。

(2) 実験結果

平均付着応力度と抜きし変位との関係例を図-14 に、付着強度 (○印) と材齢との関係例を図-15 にそれぞれ示す。図-15 中には、素材試験による圧縮強度 (●印) を併せて示した。付着強度の 3 体の平均値は、材齢 3 日で 20N/mm^2 を超え、その後もコンクリートの圧縮強度に依存して付着強度が徐々に増大している。このような付着強度の発現状況は、図-12 に示した模擬柱試験体と大きく異なっており、模擬柱試験体と片引き付着実験供試体とは、主筋周りの拘束条件および自己収縮ひずみの影響度合が異なるものと推察される。

4. まとめ

圧縮強度 150N/mm^2 級のコンクリートを用いた RC 構造部材要素の主筋に関し、若材齢時から材齢 1 年かけて付着特性実験を行った結果、以下の知見が得られた。

- (1) 一軸拘束実験において、主筋のひずみ度分布に、主筋端部の拘束の有無の影響が若干見られた。拘束応力度は、鉄筋比にほぼ比例して増大した。
- (2) 材齢 1 年での両引き付着実験において、長さ 100mm 区間の平均付着応力度の最大値は、 $12\sim 15\text{N/mm}^2$ 程度であった。平均付着応力度の最大値に、鉄筋比の影響が若干見られた。
- (3) 模擬柱試験体の主筋の付着強度発現状況に、主筋位置 (隅, 側および中) の影響が見られた。
- (4) 供試体による片引き付着強度の発現状況は、模擬柱試験体と大きく異なった。

謝辞

本研究の一部は、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

- 1) 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, pp.1181-1186, 2006
- 2) 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



図-13 片引き付着実験供試体形状

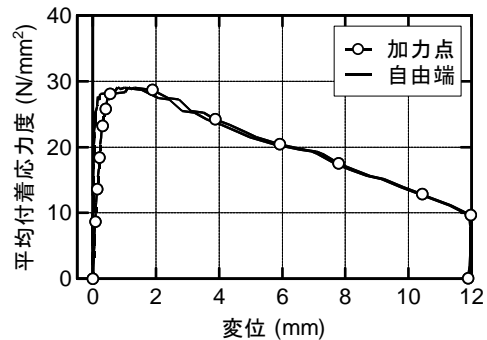


図-14 平均付着応力度～抜きし変位関係例 (材齢 1 年)

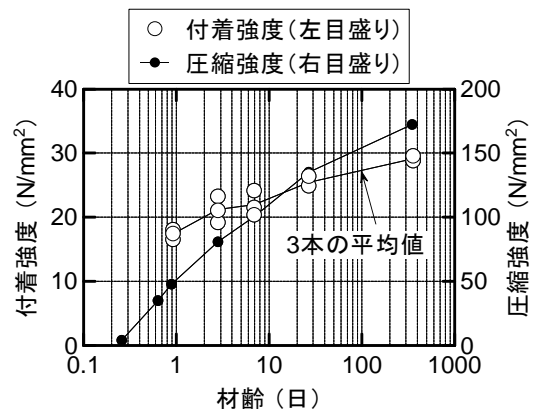


図-15 供試体による付着強度の発現状況

見, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 617 号, pp. 1-7, 2007.7

- 3) 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 1-1, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 629 号, pp. 1035-1042, 2008.7
- 4) 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, pp.363-366, 2005.9
- 5) 高森直樹, 寺岡勝: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.2, pp.595-600, 2009
- 6) 森田司郎, 角徹三: 繰返し荷重下における鉄筋とコンクリート間の付着特性に関する研究, 日本建築学会論文報告集, 第 229 号, pp.15-24, 1975.3