

論文 超高強度コンクリートの付着応力-すべり関係に及ぼす収縮量の影響

寺本 篤史*1・丸山 一平*2

要旨: 水結合材比 16%の超高強度コンクリートについて、膨張材及び収縮低減剤を使用して、ほぼ同一の強度発現性状で、異なる自己収縮履歴を有する2種類のコンクリートを作製し、若材齢から自己収縮が鉄筋-コンクリート界面の付着性状に及ぼす影響について実験的検討を行った。その結果、超高強度コンクリートに生じる自己収縮によって、超高強度 RC 部材の定着が十分でない区間にはすべりが生じること、自己収縮を低減することでわずかながら付着剛性が増大し、結果として RC プリズムの剛性が上昇する可能性があることが示唆された。

キーワード: 超高強度コンクリート, 自己収縮, 付着応力-すべり関係, 両引き試験

1. はじめに

著者らは、水セメント比 15%程度の超高強度 RC 部材において、卓越するコンクリートの自己収縮ひずみが鉄筋に拘束された場合、鉄筋周辺にひび割れが発生することを明らかにした¹⁾。これらのひび割れは、コンクリートの硬化過程において水和反応に伴って自発的に生じうるひび割れであり、ひび割れの発生を抑制するには膨張材、収縮低減剤等の自己収縮ひずみを減ずる対策が必要とされる。超高強度コンクリートの調合によっては、このような対策を施した場合でも、コンクリートに生じる拘束応力を完全に取り除くことは困難であり、超高強度 RC 部材中のコンクリートは多くの場合、拘束引張応力下にあると考えられる。

自己収縮に起因する拘束応力が部材性能に及ぼす影響については、比較的最近になって詳細が検討されはじめ、自己収縮ひずみ量の異なる高強度 RC 梁を使用した実験では、自己収縮ひずみ量の増大に伴い、曲げひび割れ発生モーメントの低下、ひび割れ幅の増大²⁾、せん断ひび割れ発生強度の低下³⁾等の影響を及ぼすことが明らかになってきている。

本検討では、同一材齢で、概ね等しい強度及び異なる自己収縮量を持つ2種類の超高強度コンクリートを作製し、自己収縮ひずみが水和の進行に伴って変化していく過程で両引き付着試験を実施することで、超高強度コンクリートの自己収縮ひずみが鉄筋-コンクリート界面の付着性状に及ぼす影響を明らかにすることを試みた。

2. 実験概要

2.1 使用材料及び調合

本実験で使用した結合材は、中庸熟ポルトランドセメントにシリカフェュームを混和した結合材である。細骨材には砕砂(吸水率:1.22%,表乾密度:2.68 g/cm³)、粗骨材には砕石(吸水率:0.56%,表乾密度:2.71 g/cm³)を使用した。水結合材比は、コンクリートの想定 28 日圧縮強度を 120MPa とし、16%に設定した。異なる自己収縮量を有するコンクリートを作製するため、一方には膨張材(石灰系)及び収縮低減剤(低級アルコールアルキレンオキシド付加物)を付与し(試験体記号-EX)、もう一方は無混和(試験体記号-PL)とした。本実験に使用した超高強度コンクリートの調合を表-1に示す。練混ぜは水平二軸型強制練りミキサ(実機)で行い、トラックアジテータで運搬(運搬時間およそ 30 分)した後、それぞれの型枠に打ち込んだ。

2.2 強度試験

所定の材齢に圧縮強度試験及び割裂引張強度試験を、それぞれ JIS A 1108, JIS A 1113 に準拠して行った。圧縮強度試験時には同時に JIS A 1149 に準拠して静弾性係数の測定も行った。試験体の養生条件は封緘養生であり、試験材齢は、注水時を材齢原点とし、12, 18, 24, 36, 48, 72, 168, 672 時間(±1 時間)とした。

2.3 自己収縮ひずみ

コンクリートの自己収縮研究委員会報告書⁴⁾を参考に、20°C一定条件において 100×100×400mm 試験体による自

表-1 調合

	水結合材比 (%)	単位量 (kg/m ³)						
		水	結合材	膨張材	細骨材	粗骨材	収縮低減剤	SP/B (%)
PL	16.0	155	969	—	525	848	-	1.30
EX	16.0	149	939	30	525	848	6	1.30

※SP:高性能減水剤 B:結合材+膨張材

*1 名古屋大学 環境学研究科都市環境学専攻 日本学術振興会特別研究員 DC (正会員)

*2 名古屋大学 環境学研究科都市環境学専攻 准教授 博(工) (正会員)

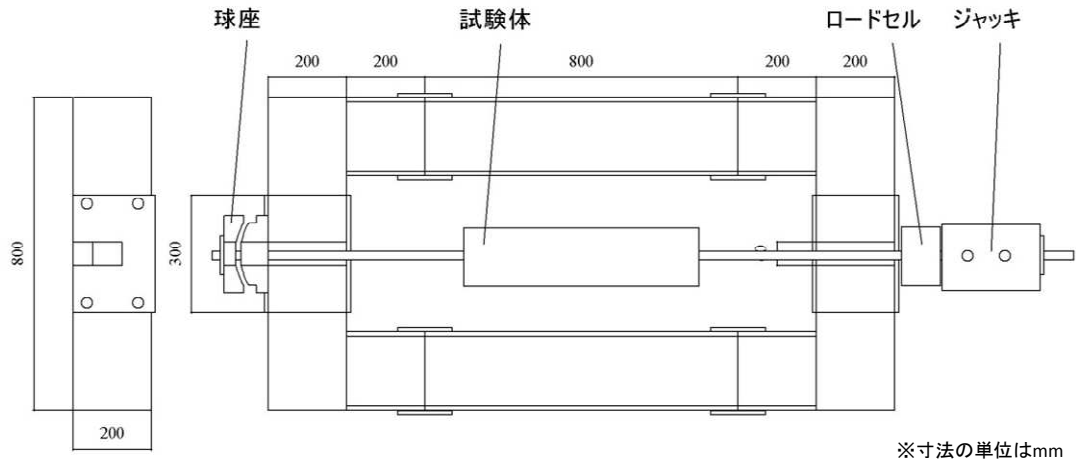


図-1 両引き試験装置概要

己収縮ひずみの測定を実施した。ひずみの測定には、2種類の埋込型ひずみ計（記号-PMFL: 標点間距離 60mm, KM: 標点間距離 100mm）を使用した。

2.4 両引き試験

コンクリートに自己収縮が生じ、鉄筋がそれを拘束する場合、鉄筋には圧縮応力、コンクリートには引張応力が導入される。本実験では、自己収縮によるコンクリートと鉄筋の相対変位方向を保ちながら付着応力-すべり関係を得るために両引き付着試験を行った。

本実験で実施した両引き付着試験の概要は、150×150×600mmの超高強度コンクリート試験体に、D22鉄筋を埋設し、両端面に張り出した鉄筋にセンターホールジャッキで引張力を導入し、その間、センターホールロードセル（最大荷重:500kN）によって荷重を計測するというもので、載荷に際し、載荷端部には球座を設けることで、荷重の偏心にとまなう曲げ応力の作用を極力小さくした。実験に使用した両引き試験装置を図-1に示す。

本実験に使用した試験体の端部には、自由端から50mmまでをブチルゴム系テープによって被覆することで非定着部分を設け、試験体の定着部分は500mmとした。また、定着部中央から両側に60mmピッチで9か所において、リブの裏表面を必要最小量研磨し、各距離に

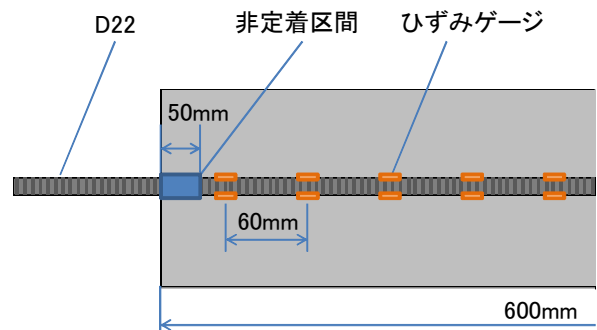


図-2 両引き試験体概要

裏表2枚、計18枚のひずみゲージを貼付した。ひずみゲージを貼り付けた後、防水のため、リード線の下側およびひずみゲージの上側を2種類のブチルゴム系コーティングテープで2重に覆った。両引き試験体の概要を図-2に示す。

3 実験結果

3.1 強度性状

各材齢におけるコンクリートの強度試験結果を図-3に示す。左図の圧縮強度の経時変化から、材齢672時間まで、EXがPLを若干下回っているものの、膨張材、収縮低減剤の影響はごくわずかであった。しかしながら、

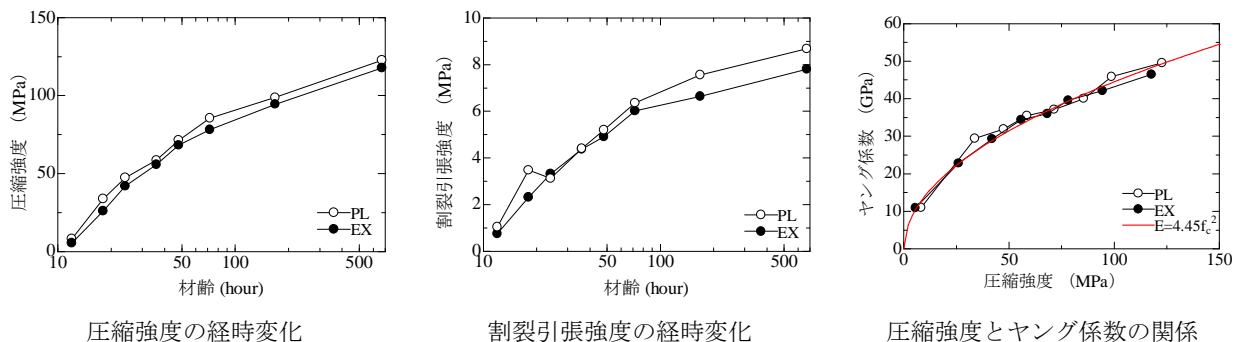


図-3 強度試験結果

本実験では、EX の凝結時間が PL より 1 時間程度遅かったため、材齢 12、18 時間といった極若材齢では、圧縮強度差が相対的に大きくなっている。割裂引張強度も圧縮強度と同様に、材齢 672 時間まで EX が PL を若干下回っているものの、その差異は大きくはない。また、圧縮強度とヤング係数の関係についても、PL、EX によらず若材齢から同一曲線で表現可能であり、各材齢においてほぼ同一強度を有するコンクリートが作製できていたものと考えられる。

3.2 自己収縮ひずみ

2 種類の埋込型ひずみ計から得られた各調合の自己収縮ひずみの測定結果を図-4 に示す。ここで、自己収縮ひずみの導出に際し、 $100 \times 100 \times 400 \text{mm}$ の試験体中心部で最大 6.3°C の温度上昇がみられたが、この温度ひずみについては線膨張係数を $10 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ として補正を行った⁴⁾。

図に示されるように、2 種類の埋込型ひずみ計による自己収縮ひずみを比較すると、いずれの調合においても、PMFL を使用した場合のほうが若材齢の自己収縮ひずみが大きくなる結果であった。この自己収縮ひずみ差の大半は材齢 12 時間以前に生じたものであり、コンクリートのヤング係数が発現する過程で生じる自己収縮ひずみの測定には、測定手法によって誤差が生じる可能性が示された。一方で、図-4 の試験結果に示されるように、材齢 24 時間以降、672 時間までは、両者のひずみ履歴に大きな差異はみられない。

図-5 に、PMFL によって得られた PL、EX の自己収縮ひずみの経時変化を示した。また、図中には参考のため強度試験、両引き付着試験を行った材齢を点線で示した。

図-5 によると、膨張材と収縮低減剤を付与した EX は、材齢 12 時間以前までは、無混和の PL と同様のひずみ履歴を示しており、材齢 12 時間以降に膨張材が効果を発揮し始めていることが分かる。EX ではその後、材齢 36 時間まで膨張が継続し、材齢 36 時間以降は再び緩やかな収縮を示したが、材齢 672 時間において、概ね 320×10^{-6} の自己収縮を低減可能であった。

3.3 両引き付着試験以前の付着応力-すべり関係

両引き付着試験体に埋設した鉄筋には、周辺のコンクリートの自己収縮ひずみによって、両引き試験に供する以前からひずみが生じる。図-6、図-7 に PL 及び EX の両引き付着試験体において、各鉄筋位置のひずみ分布の推移を示した。

図-6、図-7 を比較すると、材齢 672 時間まで自己収縮が継続して進展する PL では、いずれの材齢、いずれの鉄筋位置でも鉄筋ひずみは圧縮側に推移している。また、十分に定着がとれていない部材両端付近では鉄筋ひずみの変化量は部材中央部と比較して小さく、端部付近ですべりが生じていることを表している。一方、膨張材、

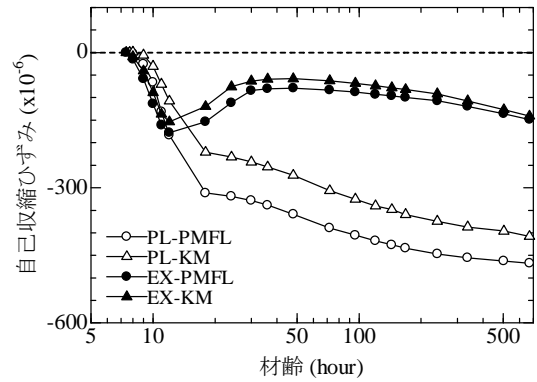


図-4 埋込型ひずみ計による自己収縮ひずみの相違

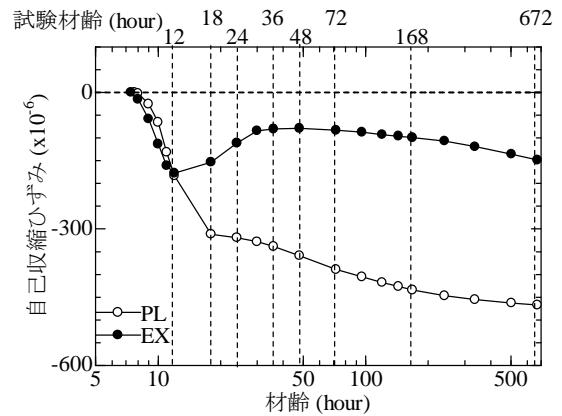


図-5 自己収縮ひずみの経時変化

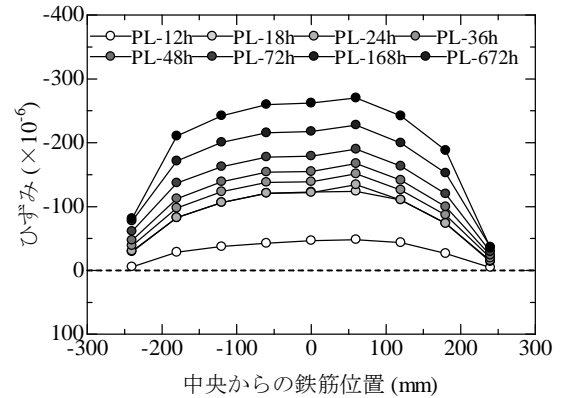


図-6 PL の鉄筋ひずみ分布

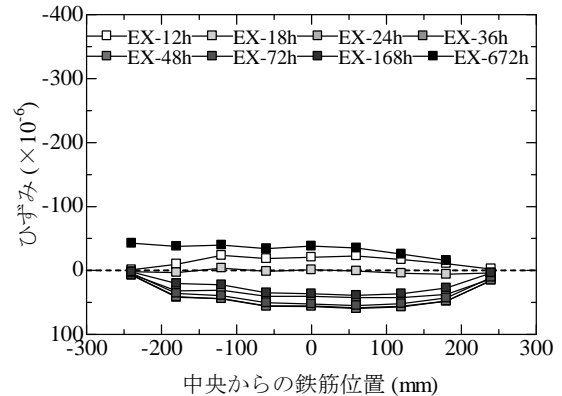


図-7 EX の鉄筋ひずみ分布

収縮低減剤により自己収縮量を低減した EX では、材齢 12 時間に PL と同様圧縮ひずみを示した後、膨張材の効果によってその後は徐々に引張側へと推移し、材齢 48 時間の中央部で最大 59×10^{-6} の引張ひずみを示した。つまりこの間、周辺コンクリートには微量のプレストレスが付与されているものと考えられる。その後再び進展する自己収縮によって材齢 672 時間の鉄筋ひずみは再度圧縮ひずみを示したが、PL の材齢 672 時間の値と比較して 200×10^{-6} 以上小さいものであった。このように自己収縮量を低減することで、中央部の鉄筋ひずみの変化量を低減することは可能であったが、圧縮側・引張側いずれの場合においても、材齢 18 時間、672 時間を除き、部材端部と中央部のひずみ差は解消し切れてはおらず、EX でも部材端部付近ですべりが生じていることが分かる。

以上から、自己収縮の卓越する超高強度コンクリートでは、両引き付着試験を実施する以前に、鉄筋とコンクリートの界面にすべりが生じていることが確認された。本研究ではこのすべり量の経時変化を以下の手法で導出した。

すなわち、鉄筋全域のひずみ分布曲線 $\epsilon(x)$ を、隣接する 3 点を通る 2 次曲線を順次組み合わせることによって仮定し、局所すべり量を以下の式によって算定した。

$$S_i(x) = S_{i-1}(x) + \int_{x_{i-1}}^{x_i} \epsilon(x) dx \quad (1)$$

ここで、 x : 試験体中央からの距離 (mm), $S_i(x)$: x 位置におけるすべり量 (mm) である。

図-8 に PL, EX の鉄筋各位置における鉄筋径に対するすべり量の割合 (S/D) の経時変化を示した。図からすべり量の絶対値は、部材中央から遠ざかるほど大きくなるが、PL では材齢の経過に伴って概ね一様に増大していくのに対し、EX ではコンクリートの自己収縮挙動に対応して、複雑な挙動を示している。特に、材齢 18 時間から 24 時間、材齢 168 時間から 672 時間の間では、コンクリートの膨張、収縮に伴って、すべりの方向が逆転していることがわかる。

次に、式 (2) によって局所付着応力を導出し、鉄筋位置 240mm における付着応力-すべり関係の経時変化を得た。

$$\tau = \frac{D \cdot E_s}{4} \cdot \frac{d\epsilon_s}{dx} \quad (2)$$

ここで、 τ : 局所付着応力 (MPa), D : 鉄筋径 (mm), E_s : 鉄筋のヤング係数 (MPa) である。

図-9 に示すように、PL のようにすべり方向が正側に一様であれば、すべり量の増大に伴って付着応力の増大を示し、付着応力-すべり曲線は下に凸の形状となる。これは、コンクリートの水和の進行に伴って付着剛性が増

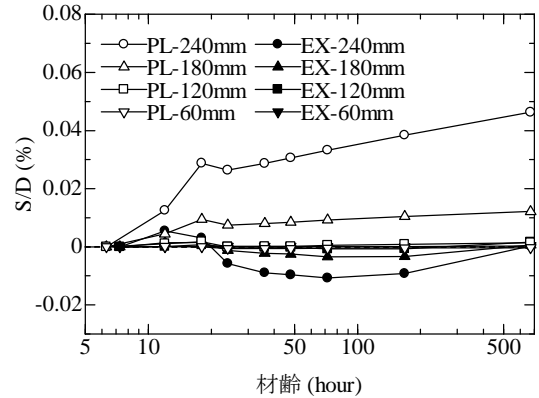


図-8 各鉄筋位置におけるすべり量の経時変化

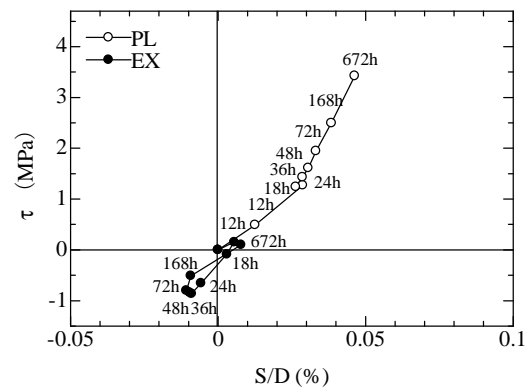


図-9 自己収縮によって生じた 240mm 位置における付着応力-すべり関係

大していくためである。一方、材齢によってすべり方向が逆転する EX では複雑な挙動を示している。この複雑な挙動の中で注目すべき点は、材齢 168 時間から材齢 672 時間であり、この間 PL と EX ではほぼ同程度のすべり量の増加を示しているにもかかわらず、両者の付着剛性は PL > EX となっている。つまり、EX では収縮、膨張を繰り返すことで、正負の最大すべり量の間では、付着性能が低下している可能性が考えられる。

3.4 両引き付着試験結果

3.3 節で述べた前条件のもと、各材齢において両引き付着試験を実施した。

図-10 及び図-11 に、両引き試験によって PL 及び EX 試験体に生じた鉄筋全区間の平均ひずみと荷重の関係を示す。図には参考として鉄筋単体のひずみ - 荷重関係を併せて示した。図-10 及び図-11 から、いずれの調合についても材齢 12 時間では、鉄筋単体の剛性に近い値を示しており、コンクリートの強度が十分に発現していない状態では、付着拘束がほとんど働かないことを示している。その後材齢の経過に伴い、鉄筋からコンクリートに応力が伝達されるようになると、部材全体の剛性は向上していくことが確認できる。

平均ひずみ 200×10^{-6} 以下の領域でこの傾きを算出し、

EX の PL に対する比率を取ったものが図-12 である。この値が 1 より大きい場合には、EX の方が部材の応力伝達性能が高いことを意味している。図-12 をみると、材齢 18 時間を除き、EX の方が PL と比較して傾きがやや大きくなっていることが分かる。材齢 18 時間で PL が EX を上回った原因は同一材齢におけるコンクリート強度の差が相対的に大きかったこと (PL : 33.8MPa, EX:26.0MPa) によるものと推察される。

この結果は、自己収縮を低減することで鉄筋-コンクリート界面の付着性状が改善され、結果として部材全体の剛性が上昇することを示唆するものであるが、その改善の程度はいずれの材齢でも概ね 5%程度であり、本実験の範囲程度の鉄筋量、自己収縮量であれば、自己収縮が RC 部材の付着剛性に及ぼす影響は大きくはない。

次に、各材齢における両引き付着試験から、式(1)、(2)を使用して、鉄筋各位置における付着応力-すべり関係を得た。各鉄筋位置において付着応力-すべり関係を比較したところ、同一調査ではいずれの鉄筋位置についてもほぼ同様の付着応力-すべり曲線上にあることが確認されたため、図-13 に各材齢の代表値として鉄筋位置 240mm の点における付着応力-すべり関係を示した。

ここで、局所すべり、局所付着応力の原点は厳密には図-9 に示した各点であるが、本論文では一般的な整理方法に倣って、荷重開始時点を実原点とした。また、材齢や調合によるコンクリート強度の影響を取り除くため、山尾らの研究⁵⁾にならい、付着応力は圧縮強度の (2/3) 乗で基準化した。参考として、図-13 中には普通強度領域の付着応力-すべり関係の一例である式(3)に示す島らの提案式⁹⁾を併せて示した。

$$\tau = 0.9f_c^{2/3} \{1 - \exp(-40(S/D)^{0.6})\} \quad (3)$$

ここで、 $f_c^{2/3}$: 圧縮強度の (2/3) 乗 (MPa) である。

図-15 に示されるいずれの材齢においても、付着剛性の実験値は島らの提案式を上回っており、既往の研究^{たとえ⁷⁾}にみられるように超高強度コンクリートは普通コンクリートと比較して優れた付着性能を有していることが確認される。また、PL, EX について比較すると、材齢 24 時間、36 時間という EX の自己収縮挙動において膨張を示していた材齢において、EX が PL を上回っており、その後の材齢についても、若干ながら EX のほうが上回る結果であった。この結果は、図-12 に示した傾向と符合している。その後、材齢の経過に伴ってその差異は小さくなっているが、この間のすべり-付着応力関係をみると、EX では材齢によってほとんど変化していないのに対し、PL で材齢 48 時間以降、付着剛性が改善されていることによるものである。

著者らは、自己収縮量の異なる 2 種類の超高強度 RC

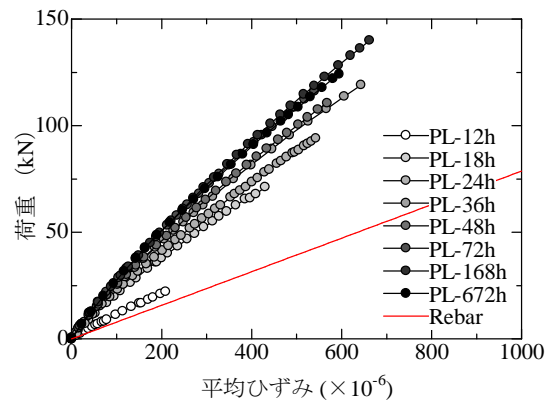


図-10 PL の鉄筋ひずみ-荷重関係

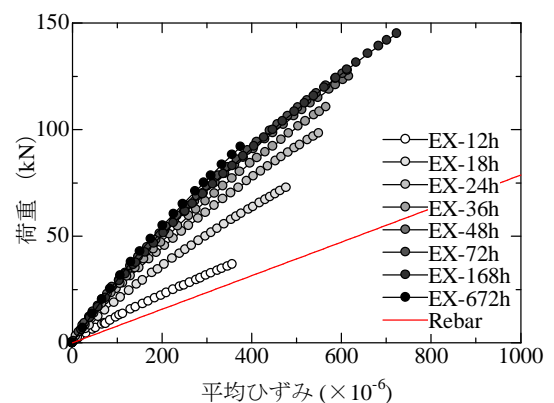


図-11 EX の鉄筋ひずみ-荷重関係

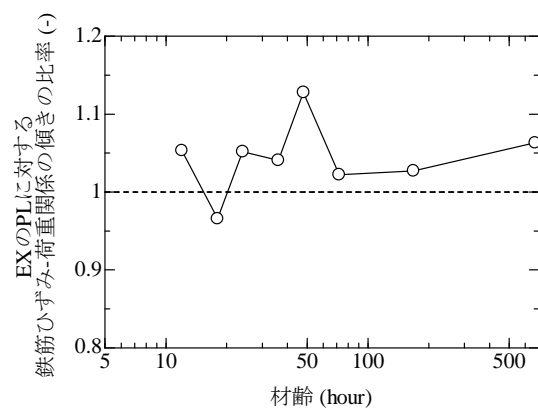


図-12 EX の PL に対する鉄筋ひずみ-荷重関係の傾きの比率

短柱を用いたせん断試験において、超高強度コンクリートの自己収縮量を低減した場合に RC 短柱の初期せん断剛性が改善することを実験的に明らかにしている⁸⁾が、本検討において、この現象は付着性能の向上によるものであることが示唆された。

4. まとめ

水結合材比 16%の超高強度コンクリートについて、膨張材及び収縮低減剤を使用して、ほぼ同一強度発現性状

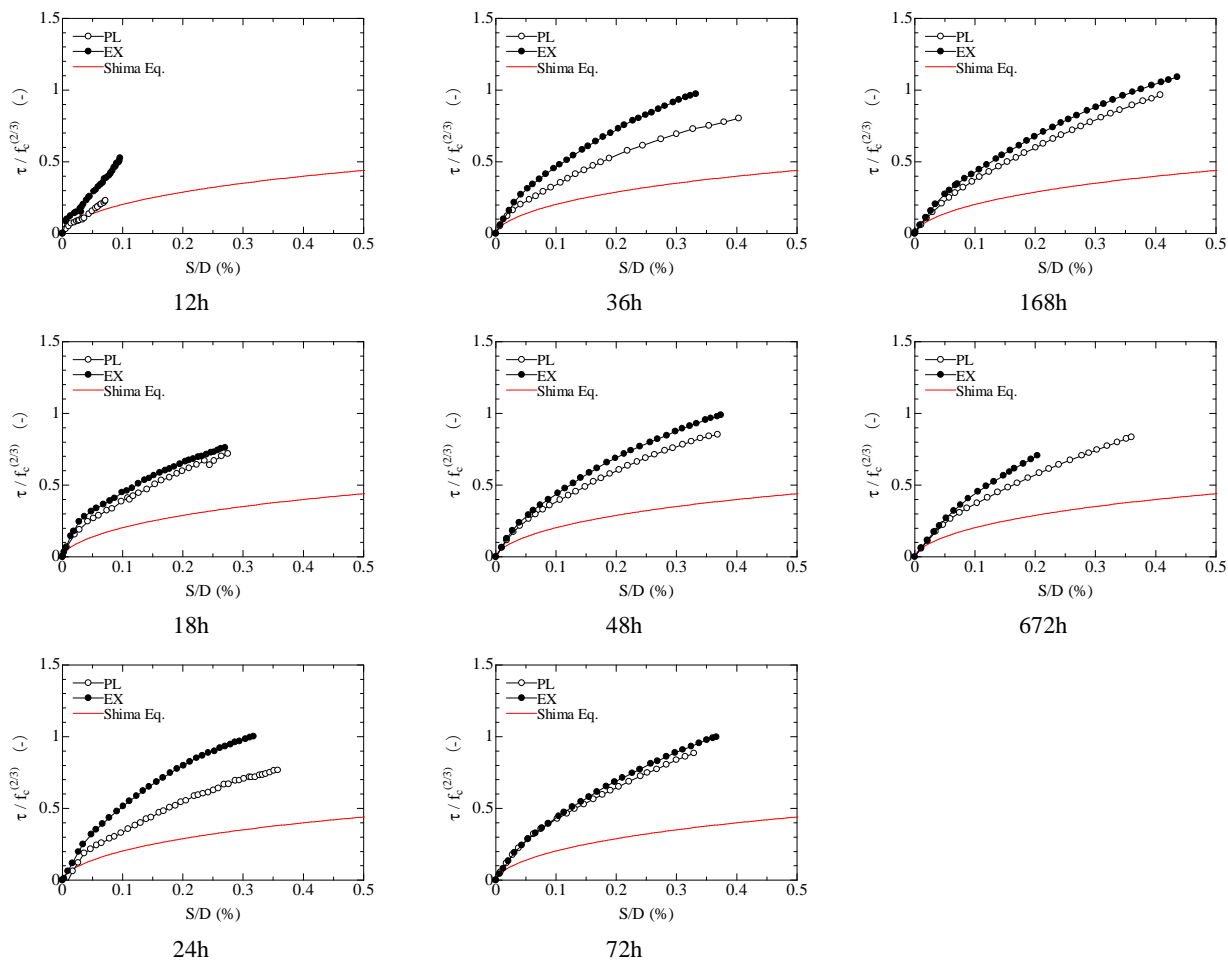


図-13 各材齢における PL 及び EX の付着応力-すべり関係

で、異なる自己収縮履歴を有するコンクリートを作製し、若材齢から、自己収縮が鉄筋-コンクリートの付着性状に及ぼす影響について実験的検討を行った。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) 超高強度コンクリートに生じる自己収縮によって、超高強度 RC 部材の定着が十分でない区間にはすべりが生じること、すべり方向は自己収縮、自己膨張に依存することが確認された。
- (2) 自己収縮を低減することで、わずかながら付着剛性が増大し、結果として両引き試験体において、RC プリズムの剛性が上昇する可能性が示された。

参考文献

- 1) 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集, 第 617 号, pp. 1-7, 2007.7
- 2) 谷村充ほか: 若材齢時長さ変化を考慮した RC 曲げ部材のひび割れ・変形の一般化評価方法, 土木学会論文集, No.760/V-63, pp.181-195, 2004
- 3) R. Sato, and H.Kawakane, : A New Concept for the Early

Age Shrinkage Effect on Diagonal Cracking Strength of Reinforced HSC Beams, Journal of Advanced Concrete Technology Vol.6, No.1, pp.45-67, 2008.2

- 4) 日本コンクリート工学会: 自己収縮研究委員会報告書, 1996
- 5) 山尾芳秀ほか: 付着応力-すべり関係に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.343, pp.219-228, 1984
- 6) 島弘ほか: マッシュなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着応力-すべり-ひずみ関係, 土木学会論文集, No.378, pp.165-174, 1987
- 7) O. E. Gjorv, et. al. : Effect of Condensed Silica Fume on the Steel-Concrete Bond, ACI Materials Journal, Vol.87, Issue 6, pp.573-580, 1990.11
- 8) 丸山一平ほか: 超高強度コンクリートの自己ひずみが RC 柱の構造挙動に及ぼす影響についての基礎検討, 高性能膨張コンクリートの性能評価とひび割れ制御システムに関する研究委員会報告書, pp.385-392, 2011.9