

硬化過程のコンクリートと鉄筋間の付着応力-すべり関係の材齢変化

中部大学
中部大学 正会員 博(工)

○本田 直樹
伊藤 睦

Abstract : The development of a constitutive model related to the hardening process for early age concrete is necessary to allow for the prediction of thermal cracking of mass concrete structures and the drying shrinkage cracking, as well as for improving the precision of the capacity for structures with initial stress. Therefore the time-dependent concrete constitutive model with solidification concept is under development. This paper presents an experimental study on the bond characteristics between the early age concrete under the hardening process and deformed bars by the axially loaded tension test in order to develop the time-dependent bond stress-slip model. Experimental results show the high correlation between the compressive strength and the bond strength. The slip at bond strength is almost same of 0.4mm up to 8 days, but changes to 0.2mm at 28 days. It therefore is considered the modification of the solidification concept is necessary in the case of its application to the bond model.

Key words : Bond-slip relation , Early age concrete , Solidification concept

1. はじめに

PC 桁に温度応力や乾燥収縮などを原因とするひび割れが生じることで、施工中や供用期間中の安全性が懸念される事例が生じることがある。このため、安全性を照査する任意時刻までにコンクリート構造物に生じた材料劣化・損傷状況を適切に評価した上で、その時刻に構造物が保有する構造性能を適切に予測できる数値解析手法の構築が必要と考えられる。

この種の解析手法の構築において、非破壊検査などで確認されたひび割れ幅やひずみなどの情報を解析モデルに反映させることができれば良いのだが、観察された損傷情報を、力の釣合いと変形の適合条件を満足して解析モデルに反映させることは非常に難しい。そのため、任意時刻における構造物の劣化・損傷状況下の構造性能を予測するためには、コンクリート打込み後から硬化するに至る若材齢時の初期応力問題を適切に解く（初期応力解析）必要があり、その上で、構造性能照査（耐荷力解析）を実施する必要がある。このため、コンクリート打込み後から硬化に至るまでの挙動を統一的に表現可能な構成則の開発が必要となる。著者らは、Bažant らがコンクリートのクリープ問題を解くために提案した **Solidification theory**¹⁾ の概念を、主に硬化コンクリート用に開発を進めている構成モデルである格子等価連続体モデル²⁾ に導入することで、材齢依存型 3次元構成則の開発を進めている³⁾。

しかしながら、温度応力などによるひび割れ幅予測の更なる精度向上には、若材齢時のコンクリートと異形鉄筋間の軟化域に至るまでの付着挙動に関する知見が必要である。そこで本研究では、軟化域も含めた硬化過程のコンクリートと鉄筋間の付着挙動に関する知見を得るために、載荷材齢を変化させた両引き試験を実施した。試験結果に基づき、付着応力-すべり関係の材齢変化について考察を行うとともに、材齢依存型構成則に使用している **Solidification concept** 適用性について検討を行った。

2. Solidification conceptの概要

石川らは、ひずみ軟化挙動と材齢経過に伴う硬化挙動を統一的に取り扱うことができる概念として **Solidification concept** を提案⁴⁾している。この概念では、図-1に示すように、コンクリートは複数本の硬化体からなる柱の集合体でモデル化される。これらの柱は時間の経過とともに生成され、応力に抵

抗できるまでに成長した後から応力を負担することができる。このように、Solidification conceptは、材齢の経過とともに応力を負担できる柱が増えていくことで硬化過程を表現するものであり、弾性計算の場合には、逐次弾性計算と等価になる。また、個々の柱の体積割合 Δv_i は、コンクリートの圧縮強度発現式など別途仮定する体積割合と時間の関係から定めることができる。ここで、応力を負担できる硬化体柱に生じるひずみ増分 $d\varepsilon$ はすべて等しいとするkinematicな制約条件を仮定することにより、コンクリート全体に生じる応力増分 $d\sigma_g$ は、次式で求められる。

$$d\sigma_g = \sum d\sigma_i = \sum \Delta v_i \frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon}(\varepsilon_i) d\varepsilon \tag{1}$$

ここで、 $\partial \sigma / \partial \varepsilon$ は応力ひずみ勾配である。このように、現状のSolidification conceptを使用した構成則では、全ての硬化体柱に使用する応力-ひずみ関係は等しいと仮定しており、これは、各材齢の各種応力-ひずみ関係は、体積割合に応じて応力軸方向にのみ変化し、ひずみ軸方向には変化しないことを暗に意味している。コンクリートが材齢極初期に大きな損傷を受けた場合、その後生成される硬化体柱の応力-ひずみ関係に損傷理論を導入する必要性は考えられるが、Solidification conceptを導入したコンクリート構成則は、載荷履歴と載荷材齢を変化させたコンクリート単体の圧縮挙動⁴⁾および引張挙動⁵⁾を妥当な精度で予測可能であることが確認されている³⁾。そこで本研究では、付着応力-すべり関係においても、Solidification conceptが使用可能かを確認するために、試験材齢を変数とした両引き試験を実施したのである。

3. 試験材齢を変数とした両引き試験

3.1 試験概要

鉄筋には、付着応力-すべり関係における軟化域までを評価するために、図-2 に示す降伏強度の高い異形 PC 鋼棒 (D22 : 公称直径 $D=22.2\text{mm}$) を使用した。なお、図中の D_1 、 D_2 、 D_3 および P は、それぞれ 24.8mm 、 21.4mm 、 20.6mm および 12mm である。また、鉄筋の引張試験の結果、本研究で使用した使用鋼棒の降伏強度は 1000MPa 以上であり、ヤング係数は約 200GPa であった。

試験体の概要を図-3 に示す。コンクリートは $150\text{mm} \times 150\text{mm} \times 150\text{mm}$ の立方体であり、その中央に鉄筋を配置した。試験体中央の鉄筋リブに 2mm の塑性ひずみゲージを2枚添付し、コーティング剤にて表面を保護した。コンクリートには材齢28日での圧縮強度が約 30N/mm^2 となるように、図-4 中の配合を使用した。全ての試験体を同一コンクリートで作製したのち、室温 20°C 、湿度 80% の恒温恒湿室にて養生した。なお、脱型は試験当日に行った。また、別途実施した圧縮試験の結果、本研究で

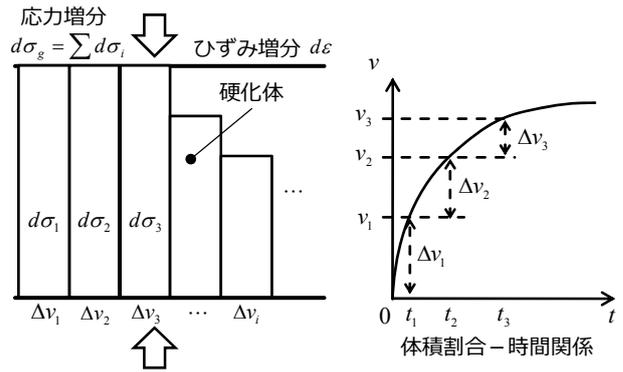


図-1 Solidification conceptによる
応力計算の模式図

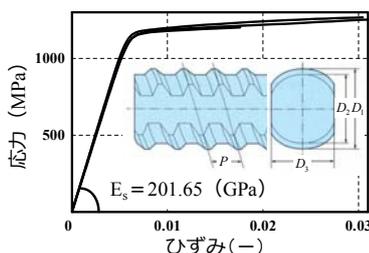


図-2 鉄筋の応力-ひずみ関係

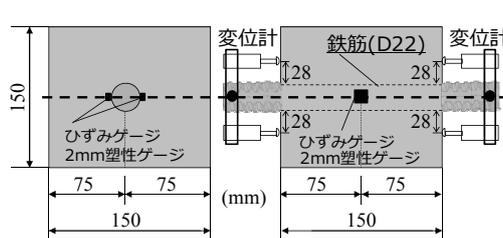


図-3 試験体概要

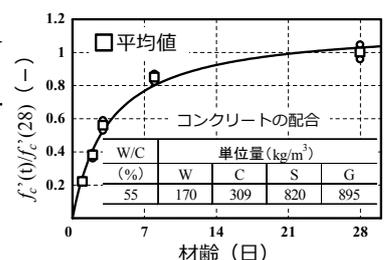


図-4 圧縮強度発現

使用したコンクリートの圧縮強度発現状況は、**図-4** に示すようであった。両引き試験は、山梨大学で実施された実験⁶⁾を参考に実施した。クリープの影響を低減するために、載荷速度（鉄筋ひずみ：13 μ/s）を一定として、鉄筋が降伏しない最大荷重まで載荷し、早期に試験を終了させた。計測項目は、コンクリートに埋め込まれた鉄筋中央のひずみ ϵ ，引張荷重 P およびコンクリート上下面で計測したコンクリートの伸び量 δ である。なお、変位計により計測したコンクリートの伸び量は、鉄筋表面から 28mm 離れた位置で計測している。本研究では、付着応力 τ (N/mm²) とすべり量 s (mm) を次式にて評価した。

$$\tau = A_s(\sigma_{s1} - \sigma_{s2}) / ul, \quad s = \delta - \Delta \quad (2)$$

ここで、 A_s ：鉄筋公称断面積(mm²)， u ：鉄筋公称周長(mm)， $\sigma_{s1} = P / A_s$ ：試験体の載荷端の応力(N/mm²)， $\sigma_{s2} = E\epsilon$ ：試験体中央の鉄筋の応力(N/mm²)， ℓ ：試験体コンクリート半分の長さ 75mm， Δ ：コンクリート表面から変位計が取り付けられている位置までの鉄筋の伸び量(mm)である。この結果、本研究により得られる付着応力-すべり関係は、ひび割れ間の挙動を評価するものであり、試験体中央から半分の領域で空間的に平均化された付着応力-すべり関係となる。試験パラメータは載荷材齢であり、本研究では載荷材齢を 1 日、2 日、3 日、8 日および 28 日とし、各材齢においてそれぞれ 3 体の両引き試験を行った。

3.2 試験結果

図-5 に、各材齢の付着応力-すべり関係を示す。なお、本試験では 1 回の試験により、ひずみ計測値 2 個×変位計測値 4 個の最大 8 個の付着応力-すべり関係（式(2)参照）が得られるが、**図**には、ひずみゲージの接着不良等によると思われる、ひずみ計測値が明らかに他の計測値と乖離している場合を取り除いた試験結果を平均した 3 体の試験結果の内、類似な 2 本を示している。また、**表-1** に各材齢での圧縮強度 f'_c ，付着強度 τ_m とその材齢ごとの平均値 $\tau_{m,Ave}$ および付着強度時のすべり s_m とその平均値 $s_{m,Ave}$ の一覧を示す。**図-6** に、各材齢の付着強度を材齢 28 日での付着強度で除した値と材齢との関係を示す。本試験では、材齢 08 日の付着強度が最も高くなる結果が得られたが、**図-4** の圧縮強度発現状況と比較をすると、付着強度はより早期に発現する傾向にある。なお、材齢 28 日時の鉄筋に錆が発生した。乾燥収縮や錆が 28 日の付着強度に影響した可能性がある。**図-7** に各材齢の付着強度を各材齢の圧縮強度の 1/2 乗と 2/3 乗で除した値と各材齢の圧縮強度の関係を示す。既往の硬化したコンクリートと鉄筋間の付着強度では、 $\tau_m / f'_c{}^{2/3} - f'_c$ 関係がほぼ一定になることが報告されている⁷⁾が、本試験結果では、 $\tau_m / f'_c{}^{2/3} - f'_c$ 関係は緩やかに低下する傾向を示し、 $\tau_m / f'_c{}^{1/2} - f'_c$ 関係がほぼ一定となる結果が得られた。また、**図-8** に材齢の付着強度時のすべりと圧縮強度との関係を示す。**図**より、材齢 08 日までは、圧縮強度の変化によらず付着強度時のすべり量はほぼ一定であるが、材齢 28 日では、材齢 08 日までの値と比較して約半分のすべり量で強度に達している。材齢 08 日の圧縮強度は、材齢 28 日の圧縮強度に対して約 85%まで強度発現していることから、付着強度時のすべり量は、圧縮強度と相関が弱く、材齢に依存するものと考えられる。

図-9 に、各材齢の付着応力-すべり関係において、付着応力のみ**表-1** に示す各材齢の $\tau_{m,Ave}$ で無次元化した関係を示す。得られた付着応力を各材齢の $\tau_{m,Ave}$ で無次元することにより、材齢 08 日まで

表-1 試験結果

材齢 (日)	f'_c (N/mm ²)	τ_m (N/mm ²)	$\tau_{m,Ave}$ (N/mm ²)	s_m (mm)	$s_{m,Ave}$ (mm)
1	6.493	1.550	1.448	0.386	0.389
		1.347		0.392	
2	11.200	2.252	2.248	0.420	0.398
		2.245		0.376	
3	16.487	2.328	2.424	0.420	0.398
		2.520		0.376	
8	25.055	3.187	3.156	0.359	0.394
		3.124		0.429	
28	29.513	2.846	2.902	0.180	0.201
		2.957		0.222	

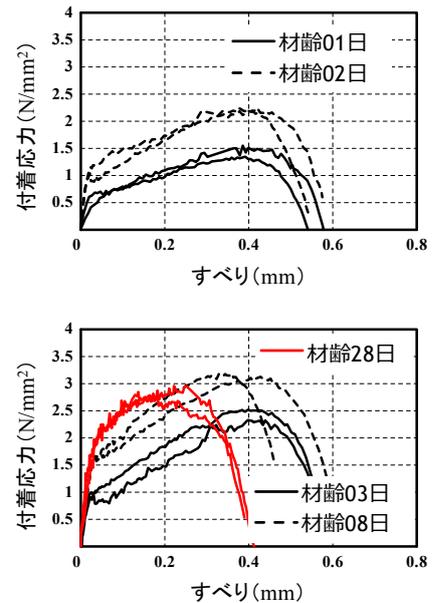


図-5 付着応力-すべり関係

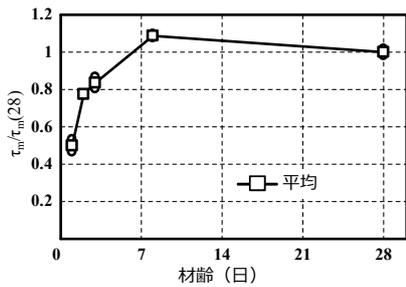


図-6 $\tau_m / \tau_m(28)$ - 材齢関係

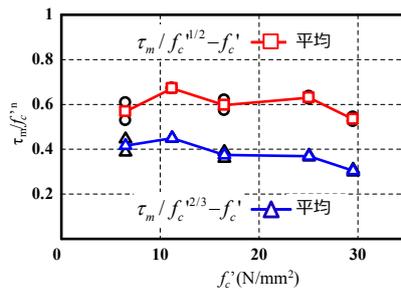


図-7 $\tau_m / f_c'^n - f_c'$ 関係

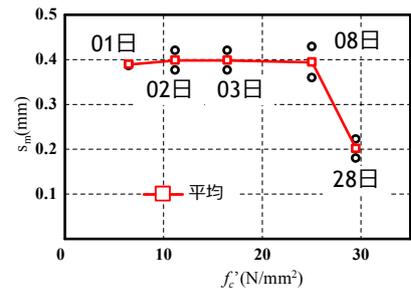


図-8 $s_m - f_c'$ 関係

は、ほぼ同一の付着応力-すべり関係となっている。すなわち、 $\tau_{m,Ave}$ の約半分程度で初期付着剛性が低下し、すべりが約 0.4mm で付着強度に到達後は急激に付着応力が低下し、おおよそ 0.55mm のすべり量で付着応力がゼロになっている。その一方で、材齢 28 日での付着応力-すべり関係では、 $\tau_{m,Ave}$ の約 6 割程度で初期付着剛性が低下し、 $\tau_{m,Ave}$ 到達後は、約 0.4mm のすべり量で付着応力を失っている。本試験結果からは、材齢経過により付着応力-すべり関係が、応力軸のみならず、すべり軸方向にも変化する結果が得られた。しかしながら、本研究では、材齢 08 日から 28 日までの間に試験を実施していないことから、付着強度時のすべり量の経時変化についてさらに検討を要する。

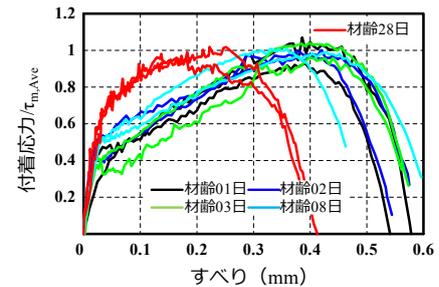


図-9 付着応力/ τ_m -すべり関係

4. おわりに

試験材齢を変化させた両引き試験の結果、本研究範囲内では以下の知見を得た。各材齢の付着強度と圧縮強度の間には相関があり、付着強度時のすべりは、圧縮強度の変化によらず材齢に依存する傾向がある。材齢 08 日程度までの付着応力-すべり関係の形状は、応力軸方向にのみ相似的に変化するが、材齢 28 日のそれは、初期付着剛性が低下する付着応力点など、応力軸およびひずみ軸方向に変化する結果が得られた。このため、硬化体柱に仮定する応力-ひずみ関係を材齢依存型にするなど、Solidification concept の修正が必要と考えられる。

謝辞：本研究に科学研究費補助金 (25820197) の助成を得た。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) Bažant, Z. P. and Prasannan, S.: Solidification theory for concrete creep I: Formulation, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol.115, No.8, pp.1691-1703, 1989.
- 2) 田辺忠顕ほか：初期応力を考慮した RC 構造物の非線形解析法とプログラム，技法堂出版，pp.201-314, 2004.3
- 3) 伊藤 睦・石川靖晃・上田尚史・田辺忠顕：初期応力を考慮した RC 構造物の耐荷力解析手法の構築，コンクリート工学年次論文集，Vol.34, No.2, pp.19-24, 2012.
- 4) Ishikawa, Y. et al.: Modeling of uni-axial constitutive law in early age concrete based on solidification concept, Proc. of Concreep7, pp.393-398, 2005.
- 5) 國枝 稔ほか：若材齢コンクリートの硬化過程および載荷履歴を考慮したひび割れ構成則に関する研究，土木学会論文集 E, Vol.63, No.1, pp.127-142, 2007.2
- 6) 寄特隆宏・檜貝 勇・斎藤成彦：異形鉄筋の付着応力-すべり関係に及ぼすかぶり厚と鉄筋直径の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.27, No.2, pp.757-762, 2005.
- 7) 山尾芳秀・周 礼良・二羽淳一郎：付着応力-すべり関係に関する実験的研究，土木学会論文報告集，第 343 号，pp.219-228, 1984.3