

若材齢コンクリートの硬化過程を考慮した圧縮および付着挙動に関する実験的研究

Experimental Study on Compressive and Bond Behavior as Related to the Hardening Process of Early Age Concrete

伊藤 睦・イトウ アツシ・Itoh Atsushi／副田 周希・ソエダ シュウキ・SoedaSyuki

SUBJECT

若材齢コンクリート挙動の検討

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 durability of existing concrete structures, as well as for improving the precision of the capacity for structures with initial stress. This paper presents an experimental study on the uni-axial compressive behavior and bond behavior between concrete and reinforcement, including those for softening regions for early age concrete. Experimental results show the high correlation between the appearance of compressive strength and the compressive softening behavior, as well as the bond characteristics.

若材齢コンクリートの硬化過程を考慮した 圧縮および付着挙動に関する実験的研究

伊藤 睦, 副田 周希

Experimental Study on Compressive and Bond Behavior as Related to the Hardening Process of Early Age Concrete

Atsushi ITOH* and Syuki SOEDA*

(Received October, 2013)

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 durability of existing concrete structures, as well as for improving the precision of the capacity for structures with initial stress. This paper presents an experimental study on the uni-axial compressive behavior and bond behavior between concrete and reinforcement, including those for softening regions for early age concrete. Experimental results show the high correlation between the appearance of compressive strength and the compressive softening behavior, as well as the bond characteristics.

Keywords: Early age concrete, Compressive behavior, Bond behavior

1. 序論

昨今社会基盤構造物の老朽化が問題視されており、コンクリート構造物の維持管理が益々重要となっている。既設構造物の維持管理対策を検討するためには、任意時刻までに既設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評価することが求められる。

任意時刻における構造物の劣化・損傷状況を数値解析的に予測するためには、第一に、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かなければならない。初期応力問題とは、具体

的には水和や日射熱による温度変化、乾燥収縮および自己収縮等に起因するひび割れ問題であるが、これらはいずれも時間依存性であり、時間に関する微分方程式を解いて初期ひずみを算出し、その時点での材料特性に基づいて初期応力を解く（初期応力解析）ことになる。他方、任意時刻における構造性能照査（耐荷力解析）は、瞬間的な性能を評価するので、動的解析においても地震作用時間は極めて短いので、載荷速度依存性を除けば、材料特性に時間依存性は存在しない。

数値解析的に任意時刻の構造物の損傷状況ならびに構造性能を予測するためには、初期応力解析と耐荷力解析とを有機的に連成して解かなければならない。連成が必要となる主たる要因は、若材齢時コンクリート

* 都市建設工学科 (Department of Civil Engineering)

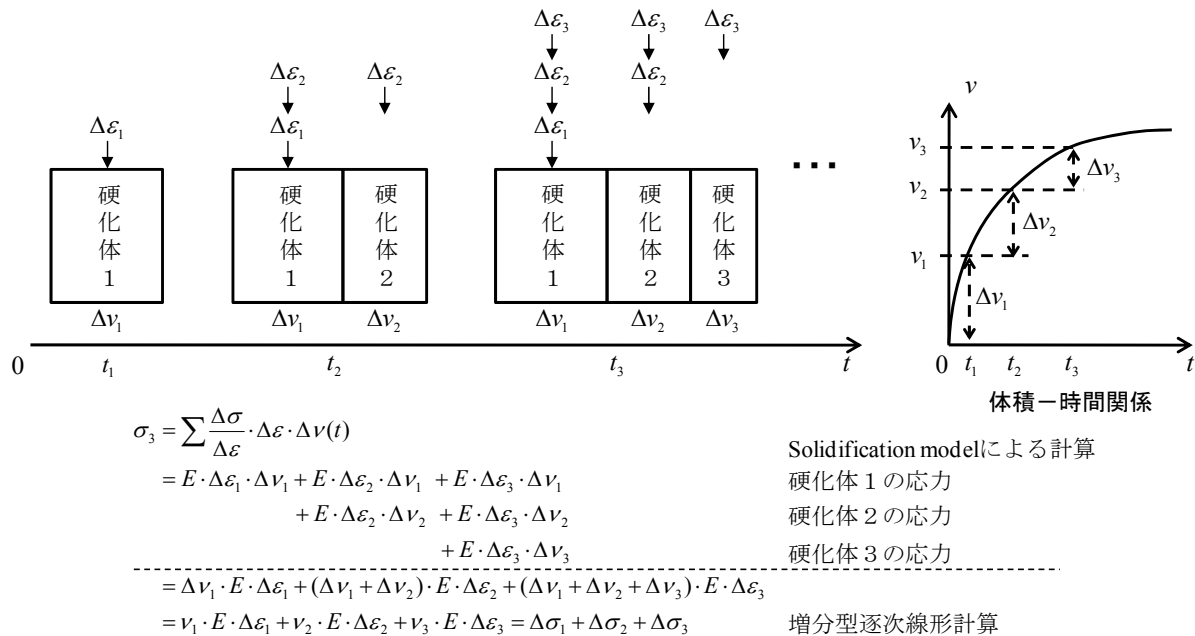


図-1 Solidification theory の概念に基づいた応力算定（弾性状態）

の物性が時間の経過とともに変化することに起因するので、初期応力解析と耐荷力解析との連成には、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。このため、著者は、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 theory¹⁾ 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行った³⁾。ここでは、硬化過程と載荷履歴を考慮した外力作用によるひび割れ載荷実験⁴⁾への適用および温度応力解析と耐荷力解析を連成された解析例を示すことで、解析手法の妥当性を示している。

しかしながら、若材齢時のコンクリート挙動に関する知見は、硬化したコンクリート挙動に比べて非常に少なく、構築した構成モデルの更なる精度向上には、若材齢時のコンクリート挙動に関する知見が必要である。既往の一軸圧縮挙動に関する研究では、既にヤング係数や圧縮強度に関する知見が得られており⁵⁾、本研究では、構成則に使用する Solidification concept の妥当性を検討するためにも、特にひずみ軟化挙動に着目した。また、鉄筋間との付着挙動に関する試験では、既往の研究では軟化域に至る評価がなされていない⁶⁾。

そこで本研究では、ひずみ軟化域までを含めたコンクリートの一軸圧縮挙動および軟化域も含めた若材齢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コンクリートの一軸圧縮試験および両引き試験を実施した。試験結果に基づき、各種挙動の材齢変化について考察を行うとともに、

若材齢コンクリートモデルへの Solidification concept 適用の妥当性について検討を行った。

2. Solidification concept の概要

Bažant らは、若材齢時コンクリートのクリープ挙動を表現するために、Solidification theory¹⁾を提案している。構成モデルへの Solidification theory の概念の導入は、クリープ関数を応力-ひずみ関係に置き換えるとともに、適当な体積と時間の関係を定義することで可能となる。なお、Bažant らのクリープ解析では、力の釣合い条件のみで問題を解くことが可能であるため、変形に関する制約条件を課していないが、時間の経過とともに随時生成される硬化体毎の応力依存性ひずみ増分を決定するためには、変形に関する制約条件が必要となる。そこで、ある時刻までに生成しているいくつかの硬化体に対して、ある時間 step 内で生じる応力依存性ひずみ増分は等しいとする Kinematic 的な制約条件^{4),7)}を仮定した。

図-1 に、Solidification concept を導入した弾性状態での一軸応力算定手順を示す。ここで、図中の式中の E は、完全硬化時コンクリートのヤング係数を意味する。図に示すように、時間の経過とともに次々と硬化体が生成される。各硬化体の体積割合 Δv_i は、別に規定した体積と時間の関係から求めることができる。前述の変形に関する制約条件を設けたことにより、各硬化体のある時間間隔内の応力依存性ひずみ増分が決定されるので、各硬化体の応力算定が可能となり、要素の応力は各硬化体の応力の和で求めることができる。また、図中の式に示すように、Solidification concept を使用し

表-1 コンクリートの示方配合表

水結合材比	細骨材率	単位量(kg/m ³)							
		水	セメント	高炉スラグ	膨張材	細骨材	粗骨材	混和材料	
W/(C+F+E)	S/a	W	C	F	E	S	G	混和材料	混和剤
50	45	175	270	80	—	787	1034	—	4.2

た弾性状態での応力算定は、一般的な増分型の逐次線形計算と等価になる。このように、Solidification conceptを用いた一軸応力算定は、材料非線形も踏まえて次式のように記述できる。

$$\Delta\sigma_n = \sum_i \Delta v_i F_i (\Delta\epsilon_n) \quad (1)$$

ここで、 i は硬化体の番号であり、 Δv 、 F はそれぞれ硬化体の体積割合、応力-ひずみ関係である。式(1)において決定すべき関数は、 v と F であるが、それぞれの関数は、次を満足する必要がある。関数 v は、十分に時間が経過した際は、 $v=1.0$ である必要がある。関数 F は、初期ひずみによる損傷がゼロの場合には、実験で求められる硬化コンクリートの応力-ひずみ関係に一致する必要がある。関数 v には、既往の強度発現式等を用いることが可能であるが、例えば、圧縮強度と引張強度の強度発現には差異が見られることから、モデルの高精度化のためには、関数 v を材料物性値毎に設定する必要があるかもしれない。なお、 Δv と $\Delta\{e\}$ は時々刻々と変化するもので、式(1)は、厳密には積分形式で記述される必要があるのだが、ここでは時間間隔が十分に小さいものとして、和の形で表現している。このように、Solidification conceptを使用する利点は、各硬化体に仮定する F に時間項が含まれない点である。その一方で、時間の経過とともに次々と硬化体が生成されるので、計算量と記憶量が多くなる点が難点である。本研究では、材齢ごとの軟化域までを含めた圧縮挙動および付着挙動に関する知見を得るとともに、各硬化体に仮定する各種関数 F が、材齢によらず定義できるかについても検討することを目的とする。

3. コンクリート一軸圧縮挙動の材齢変化

3.1 圧縮試験概要

硬化過程がコンクリートの一軸圧縮挙動に及ぼす影響を探るために、材齢を変化させた圧縮試験を実施した。コンクリートは、設計基準強度を24N/mm²として、表-1に示す示方配合を用いた。脱型を材齢1日で実施し、養生は気中養生とした。これは、別途実施した同一コンクリートで作製されたRCはり試験体と養生条件を同一とするためであり、養生期間中の室温はおおよそ30℃であった。試験変数は載荷材齢であり、本研究では、載荷材齢を1日、2日、7日、15日および28日として、各材齢につき3体の圧縮試験を行った。

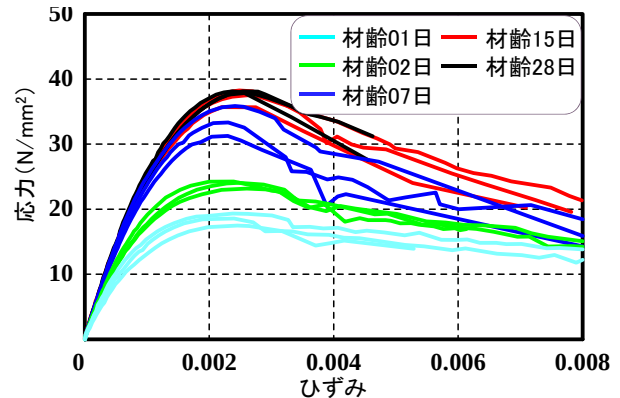


図-2 各材齢の圧縮応力-ひずみ関係

ひずみの計測にはコンプレッソメータを使用し、荷重載荷速度をおおよそ20μ/s程度でひずみ軟化域に至るまで載荷を行うことで、各材齢のヤング係数、圧縮強度、圧縮強度時のひずみおよびひずみ軟化勾配を評価した。なお、ヤング係数は、応力が各試験体の圧縮強度の1/3に至るまでの応力-ひずみ関係を線形補間した勾配とし、軟化勾配は、図-2に示す試験により得られた応力-ひずみ関係の圧縮強度点からひずみが8000μに至る点までの応力-ひずみ関係を線形補間した勾配と定義した。

3.2 圧縮試験結果

図-2に試験により得られた各材齢の圧縮応力-ひずみ関係を示す。また、表-2に、各応力-ひずみ関係の圧縮強度 f_c' 、圧縮強度時のひずみ ϵ_0 、ヤング係数 E_c および軟化勾配 Ed を示すとともに、各値を材齢28日でのそれぞれの物性値で無次元化した値を示す。図-3から図-6には、それぞれ圧縮強度-有効材齢関係、圧縮強度時ひずみ-載荷材齢関係、各材齢のヤング係数-圧縮強度関係および各材齢の軟化勾配-圧縮強度関係を示す。なお、図-3では、本研究での養生方法は、気温30℃の気中養生であったことから、土木学会の圧縮強度発現式と比較するために、横軸を有効材齢とし、図中に実際に載荷を行った実材齢を示している。また、図には、図中の式で実験値を近似した関数を示している。

図より、本試験結果は圧縮強度発現状況やヤング係数と圧縮強度の関係は、土木学会式と良い一致を示している。表-1において、圧縮強度の試験値が、材齢7日と28日で差異がないのは、養生時の気温が高いため

表-2 圧縮試験結果

番号	材齢	f_c'	f_c'/f_{c28}	ε_0	$\varepsilon_0/\varepsilon_{028}$	E_c	E_c/E_{c28}	E_d	E_d/E_{d28}
	(日)	(N/mm ²)	(-)	(-)	(-)	(N/mm ²)	(-)	(N/mm ²)	(-)
1-1	1	17.47	0.46	0.00245	0.98	19143	0.64	-1370	0.35
1-2	1	18.56	0.49	0.00240	0.95	22417	0.74	-1001	0.25
1-3	1	19.33	0.51	0.00238	0.95	24235	0.80	-945	0.24
2-1	2	23.15	0.61	0.00261	1.04	25366	0.84	-1392	0.35
2-2	2	24.04	0.63	0.00247	0.98	26445	0.88	-1726	0.44
2-3	2	24.26	0.64	0.00239	0.95	26578	0.88	-1974	0.50
7-1	7	35.85	0.94	0.00242	0.96	30897	1.03	-3581	0.91
7-2	7	31.27	0.82	0.00230	0.91	28860	0.96	-2647	0.67
7-3	7	33.32	0.88	0.00231	0.92	29542	0.98	-2365	0.60
15-1	15	35.67	0.94	0.00220	0.88	29359	0.97	-3508	0.89
15-2	15	38.23	1.00	0.00248	0.99	31319	1.04	-3546	0.90
15-3	15	37.59	0.99	0.00271	1.08	30332	1.01	-3118	0.79
28-1	28	37.91	1.00	0.00263	1.04	29890	0.99	-3340	0.85
28-2	28	38.11	1.00	0.00254	1.01	29063	0.96	-3497	0.89
28-3	28	38.11	1.00	0.00238	0.95	31438	1.04	-4976	1.26
平均値	1	18.45	0.48	0.00241	0.96	21932	0.73	-1105	0.28
平均値	2	23.82	0.63	0.00249	0.99	26130	0.87	-1698	0.43
平均値	7	33.48	0.88	0.00234	0.93	29766	0.99	-2864	0.73
平均値	15	37.17	0.98	0.00246	0.98	30337	1.01	-3390	0.86
平均値	28	38.05	1.00	0.00251	1.00	30130	1.00	-3937	1.00

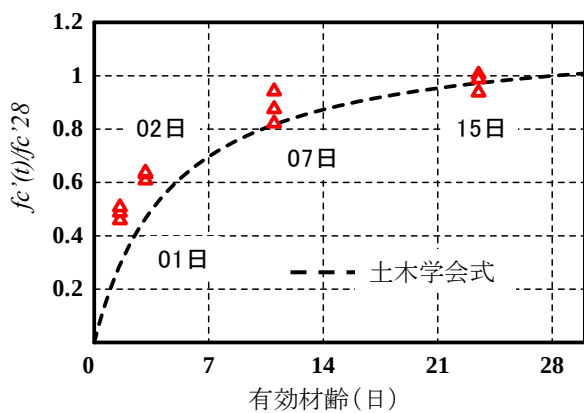


図-3 圧縮強度－有効材齢関係

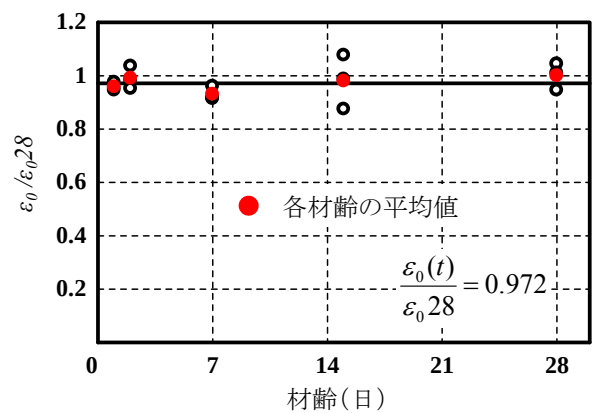


図-4 圧縮強度時はずみー載荷材齢関係

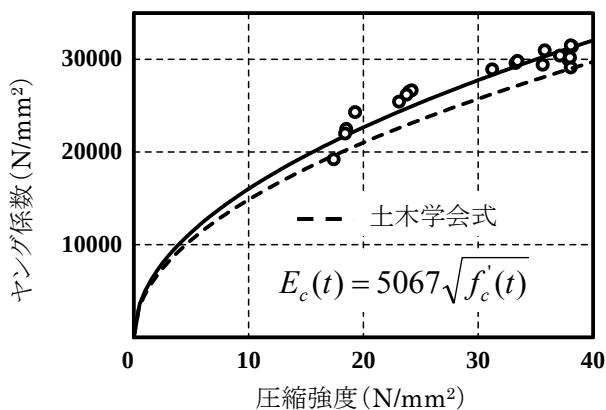


図-5 各材齢のヤング係数－圧縮強度関係

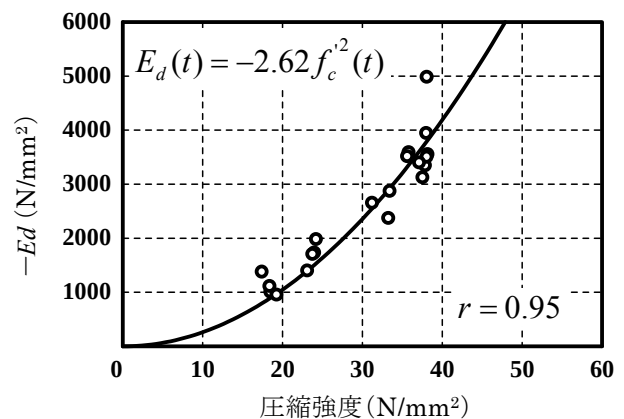


図-6 各材齢の軟化勾配－圧縮強度関係

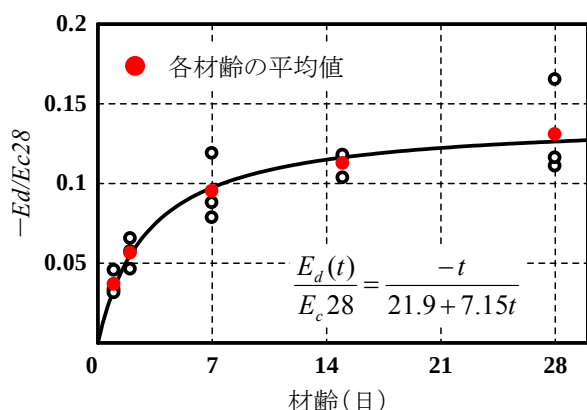


図-7 各材齢のヤング係数と軟化勾配の関係

早期に硬化が進行したものと考えられる。

図-6 よりひずみ軟化勾配は、本研究範囲内では、圧縮強度の発現に伴い急勾配となることが確認された。またその傾向は、各材齢の圧縮強度に対して 2 次関数で近似できる傾向が得られた。この傾向は、硬化したコンクリートの圧縮強度と軟化勾配の関係とも類似する。さらに図-7 に示すように、各材齢の軟化勾配と材齢 28 日のヤング係数平均値との比と材齢との関係の評価した結果、軟化勾配の材齢変化は、圧縮強度の強度発現と同様な傾向が確認できる。すなわち、材齢 7 日程度までは軟化勾配の経時変化は大きい、それ以降の変化は大局的に小さい。

以上から、ヤング係数と圧縮強度の物性値の経時変化は異なるが、材齢 7 日程度以降であれば、2 章で示した応力-ひずみ関係の関数 F は、おおよそ一定であると考えられる。また、ヤング係数や軟化勾配は圧縮強度発現状況と強い相関関係があることから、関数 ν には圧縮強度発現式を使用することが妥当であると考えられる。

4. 付着挙動の材齢変化

4.1 試験概要

コンクリートの硬化過程が鉄筋とコンクリート間の

付着挙動特性に及ぼす影響を探るために、両引き試験を実施した。

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-8 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 200GPa であった。

試験体の概要を図-9 に示す。コンクリートは 150mm の立方体であり、その中央に鉄筋を配置した。試験体中央の鉄筋のリブに 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。コンクリートの配合には表-3 を使用し、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、脱型を試験当日に行った。

両引き試験は、山梨大学で実施された実験⁸⁾を参考に図-10 に示すように実施した。計測項目は、コンクリートに埋め込まれた鉄筋中のひずみ ϵ 、引張荷重 P および図-10 に示すコンクリート上下面で計測したコ

表-3 コンクリートの配合

粗骨材 最大寸法 mm	W/C %	単位量 (kg/m ³)			
		水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G
15	55	170	309	820	895

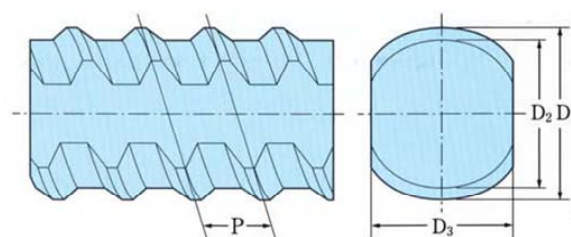


図-8 鉄筋形状

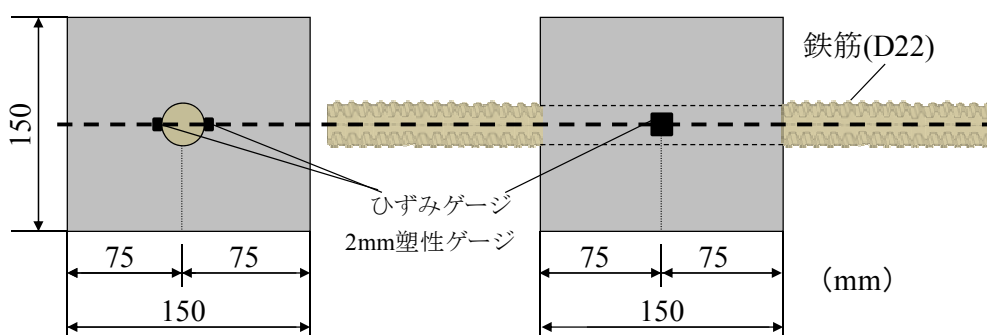


図-9 試験体概要

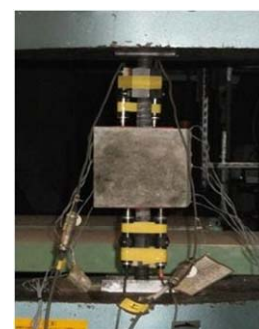


図-10 両引き試験状況

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近傍の値ではなく、鉄筋表面から 5cm 程度離れた位置を計測している。これらの計測値を使用して、付着応力 τ (N/mm²)とすべり量 S (mm)を次式にて評価した。

$$\tau = A_s(\sigma_{s1} - \sigma_{s2})/u\ell \quad (2)$$

$$s = \delta - \Delta \quad (3)$$

ここで、 A_s ：鉄筋公称断面積(mm²)、 u ：鉄筋公称周長(mm)、 $\sigma_{s1} = P/A_s$ ：試験体の载荷端の応力(N/mm²)、 $\sigma_{s2} = E\varepsilon$ ：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ーすべり関係は、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ーすべり関係となる。

試験パラメータは载荷材齢であり、本研究では载荷材齢を 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お 3 体の両引き試験を行った。

4.2 試験結果

表-4 に両引き試験により得られた試験結果を示す。なお、本試験では、1 回の試験により最大 8 個の平均付着応力ーすべり関係が得られるが、これらの内大きく他の試験結果と乖離しているものを除いた試験結果を平均することにより、各材齢での平均付着応力ー平均すべり関係を評価した。表-4 には、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 $s_{m,Ave}$ を示している。また、図-11 から図-15 に、各材齢の平均付着応力ー平均すべり関係を示す。図では、平均付着応力と平均すべりを表-4 に示す各材齢の $\tau_{m,Ave}$ と $s_{m,Ave}$ で無次元化している。

表-4 から、本研究範囲内では、材齢の経過による圧縮強度の発現に伴い、付着強度が増加することが分かるが、図-11 から図-15 に示すように、得られた平均付着応力と平均すべりを各材齢の $\tau_{m,Ave}$ と $s_{m,Ave}$ で無次元することにより、材齢 08 日までは、ほぼ同一の付着応力ーすべり関係となっている。すなわち、 $\tau_{m,Ave}$ の約半分程度で剛性が低下し、 $\tau_{m,Ave}$ 到達後は急激に付着応力が低下し、 $s_{m,Ave}$ の 1.5 倍程度で付着応力がゼロになっている。その一方で、図-15 に示す材齢 28 日での付着応力ーすべり関係では、 $\tau_{m,Ave}$ の約 6 割程度で剛性が低下し、 $\tau_{m,Ave}$ 到達後は、 $s_{m,Ave}$ の約 2.3 倍のすべり量で付着応力を失っている。

図-16 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

表-4 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	

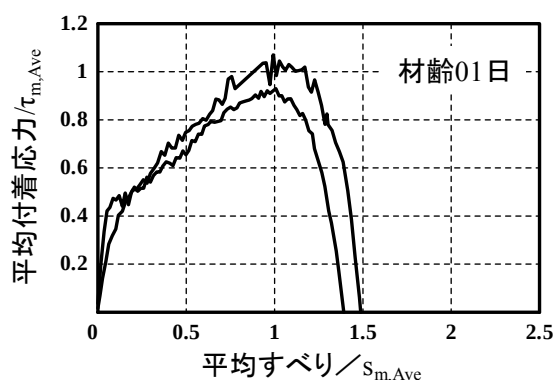


図-11 無次元化付着応力ーすべり関係 (材齢 01 日)

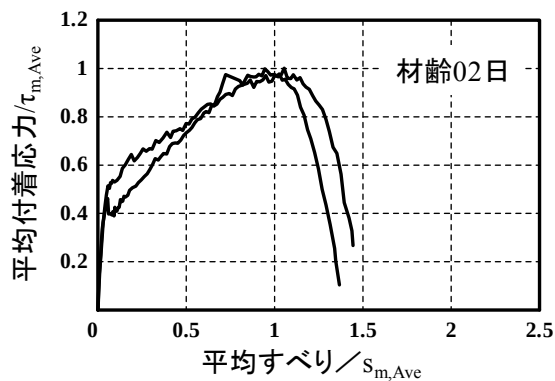


図-12 無次元化付着応力ーすべり関係 (材齢 02 日)

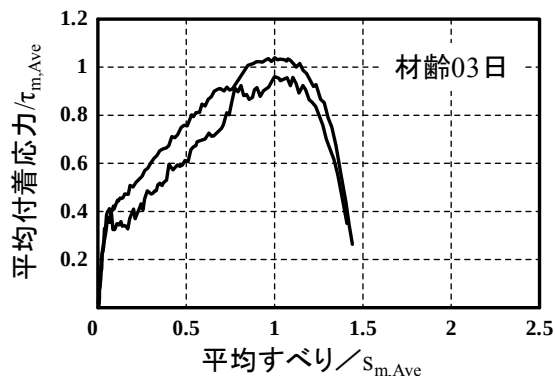


図-13 無次元化付着応力ーすべり関係 (材齢 03 日)

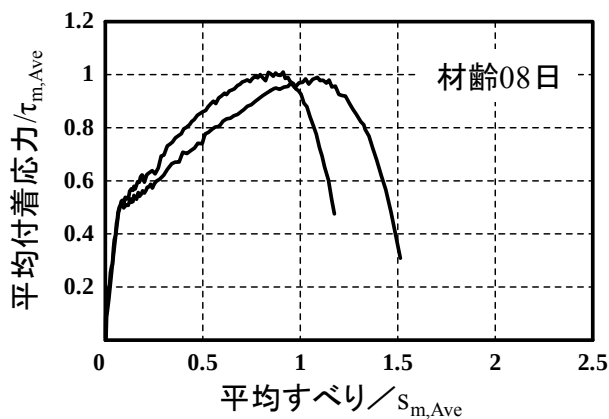


図-14 無次元化付着応力-すべり関係（材齢 08 日）

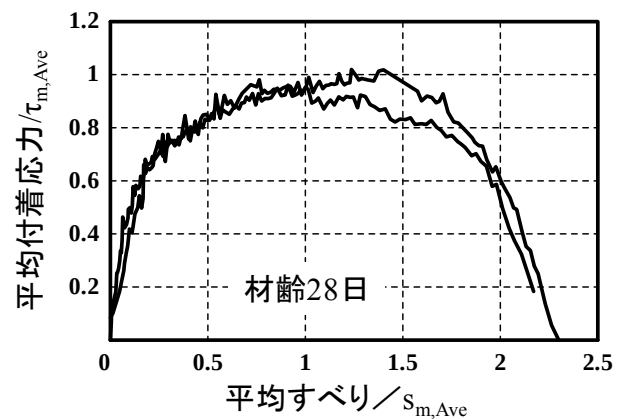


図-15 無次元化付着応力-すべり関係（材齢 28 日）

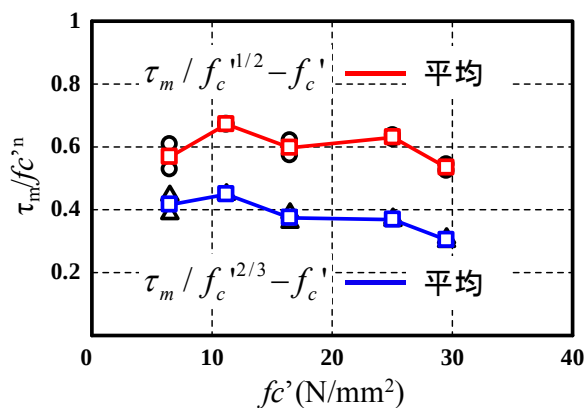


図-16 材齢ごとの付着強度と圧縮強度の関係

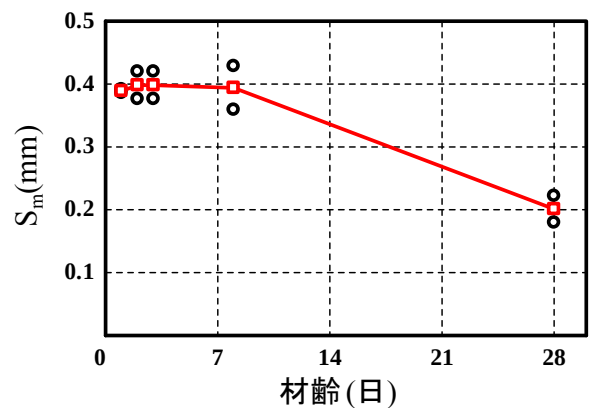


図-17 付着強度時のすべりと材齢の関係

示す。なお、図には各試験結果を黒色でプロットし、各材齢の平均値をそれぞれ青線および赤線で示している。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⁹⁾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-17に付着強度時のすべりと材齢の関係を示す。図より、材齢 08 日までは、付着強度時のすべり量はほぼ一定であり、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いものと考えられる。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、この点についてさらに検討を要する。

以上の試験結果から、材齢 08 日程度までの付着応力-すべり関係は、Solidification concept により表現が可能である傾向が得られた。しかし、材齢 28 日の試験結果は、Solidification concept にそぐわないので、関数 F を材齢依存型にする必要もあると考えられる。

5. 結論

本研究では、ひずみ軟化域までを含めたコンクリートの一軸圧縮挙動および軟化域も含めた若材齢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コンクリートの一軸圧縮試験および両引き試験を実施した。試験結果に基づき、各種挙動の材齢変化について考察を行うとともに、若材齢コンクリートモデルへの Solidification concept の妥当性について検討を行った結果、本研究範囲内では、以下の結論を得た。なお、本研究では、試験パラメータが材齢のみであることから、今後より詳細な検討が必要である。

- ①材齢を変化させた一軸圧縮試験により、ひずみ軟化領域における軟化勾配は、各材齢時の圧縮強度と強い相関関係が確認された。また、各材齢の軟化勾配と材齢 28 日でのヤング係数との比と材齢の間にも強い相関関係が確認された。
- ②初期材齢における一軸の圧縮応力-ひずみ関係は、材齢 7 日程度までは材齢の影響が大きい、材齢 15 日以降ではその影響が比較的小さくなる。
- ③材齢極初期の耐荷性能を評価する以外は、圧縮ひずみが軟化域に到達することが少ないことから、既往

の知見^{3),4),8)}も踏まえて、若材齢コンクリートの圧縮構成則に Solidification concept が利用可能と考えられる。また、圧縮挙動においても、全ての物性値が圧縮強度発現と強い相関関係にあることから、関数 v には圧縮強度発現式の適用が妥当であると考えられる。

- ④ 載荷材齢を変化させた両引き試験結果から、材齢 1 週間程度までは、付着応力-すべり関係がほぼ同一形状で表現できる結果が得られた。しかしながら、材齢 28 日の形状とは異なる。このため、材齢極初期（本実験では 8 日程度まで）には Solidification concept の使用が可能と考えられるが、より長期的な挙動の変化を統一的な構成モデルで記述するには検討を要する。
- ⑤ 各材齢の付着強度と圧縮強度には $\tau_m / f_c'^{1/3} - f_c'$ 関係がほぼ一定値となる結果が得られた。

謝辞

本研究の一部に科学研究費補助金（25820197）および中部大学特別研究費（25IS3B）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) 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
- 5) コンクリート標準示方書, 施工編, 土木学会, 2007.
- 6) 三村陽一ほか：両引き試験による若材齢コンクリートと異形鉄筋間の付着特性の評価, 土木学会論文集, No.732/V-59, pp.211-223, 2003.5
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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