

論文 軽量骨材コンクリートの体積変化および鉄筋付着実験

吉武 勇*1・田中 浩*2・三村陽一*3・浜田純夫*4

要旨：本研究は、主に独立気泡型人工軽量骨材を用いた低水セメント比の軽量骨材コンクリートの力学的特性について実験的検討を試みたものである。まず、温度変化に対する熱ひずみ応答性を示す線膨張率の測定を行った。また、コンクリートの微小なひずみの計測を可能とする計測装置を考案・作製し、これを用いて自己収縮、乾燥収縮および圧縮クリープといった時間依存性の体積変化実験を行った。さらに両引き試験による異形鉄筋との付着実験を行い、付着応力すべり関係等の付着特性の把握を試みた。

キーワード：線膨張率、自己収縮、乾燥収縮、圧縮クリープ、付着

1. はじめに

第二東名・名神高速道路に多く採用されている少数主桁構造の橋梁では、主桁間隔が広がることによって交通荷重に対する橋梁床版の負担割合は増大する。少数主桁橋では、橋梁床版の自重が耐力に及ぼす影響も大きいことから、橋梁床版の軽量化が望まれる。また、橋梁床版の軽量化を行うことで、地震時の慣性力や下部構造への負担の低減、建設機械等の簡略化が図れ、経済性の優れた設計・施工が可能になるものと思われる。橋梁床版の軽量化には、軽量骨材コンクリートの採用が有効な手段であるが、普通コンクリートに比べ引張強度が著しく小さい軽量骨材コンクリートの場合、プレストレストコンクリート(PC)構造とする方が望ましいことが報告されている¹⁾。

ここで、軽量骨材を用いたPC構造では、クリープ・収縮に起因したプレストレスの損失が著しくなることが予想され、設計段階において損失プレストレスを正確に予測しておくことは極めて重要である。また、軽量骨材コンクリートは、ヤング率も小さいことに起因して、鉄筋の応力負担分は大きくなることが予想されるため、鉄筋との付着特性の把握は必要不可欠なものと思われる。

本研究は、工場製作の軽量骨材コンクリートPC床版を対象に、その設計に関する基礎データを資する目的から、有効プレストレスの算定に必要な不可欠な体積変化特性(線膨張率・自由収縮・クリープ)を調べるとともに、異形鉄筋の付着特性について実験的検討を試みたものである。

2. 使用材料と強度特性

2.1 使用材料と配合条件

本研究において主に用いた人工軽量粗骨材は、真珠岩を主原料とする独立気泡の造粒骨材(比重 0.85, Gmax 15mm, 吸水率 2.8%)である。また収縮・クリープ実験の比較用として膨張頁岩を主原料とする連結気泡の非造粒骨材(比重 1.25, Gmax 15mm, 吸水率 32%)を用いた。以下、本論文では、前者を ASL, 後者を AL と略記する。

本研究では、工場製作を模擬するため、早強ポルトランドセメント(比重 3.12)およびコンクリート二次製品用の高性能減水剤(比重 1.2)を用いた。また、主に使用した細骨材は、海砂(比重 2.6)であり、AL 骨材によるコンクリートのみ、山砂(比重 2.72)および軽量細骨材(比重 1.9)を使用した。

本研究では、人工軽量骨材コンクリートの強度

*1 山口大学工学部社会建設工学科助手 博士(工学) (正会員)

*2 (株)栗本鐵工所 大阪臨海工場(山口大学大学院理工学研究科博士後期課程)

*3 (株)エイトコンサルタント(元山口大学大学院理工学研究科博士前期課程) 修士(工学) (正会員)

*4 山口大学工学部社会建設工学科教授 Ph.D. (正会員)

特性を調べる目的から、水セメント比(W/C)28%を中心に、W/C 5%刻みでコンクリートを作製した。本研究において用いたコンクリートの配合条件の詳細を表-1 にまとめて示す。

表-1 配合条件

配合 記号	単位量 (kg/m ³)					スラブ ^o 70-cm
	C	W	S	G	Ad	
ASL23	592	136	786	290	7.3	—
ASL28	527	157			6.5	42*38
ASL33	501	165			6.2	54*54
ASL38	465	177			5.7	66*64
ASL28m	800	238	1193	—	9.8	64*60
AL29	568	162	174 332	483	2.3	—

※ 配合記号 → 粗骨材種類, W/C (%)を表す。

2.2 圧縮・引張・曲げ強度実験

軽量骨材コンクリートの場合、圧縮強度に比して引張強度や曲げ強度が著しく小さくなることが知られている。そこで本研究では材齢7日において各強度試験を行い、圧縮強度に対する引張および曲げ強度の比を調べた(表-2 参照)。同結果より、本研究における軽量骨材コンクリートの引張および曲げ強度の圧縮強度に対する比は、各々1/20 以下、1/13 以下であった。

表-2 強度試験結果

配合 記号	ヤング 率 GPa	強度 MPa			圧 引	圧 曲
		圧縮	引張	曲げ		
ASL23	23.30	48.49	2.42	3.31	20	15
ASL28	20.47	40.35	1.83	3.13	22	13
ASL33	18.20	33.32	1.64	2.44	20	14
ASL38	17.85	34.36	1.46	2.15	24	16
ASL28m	27.99	55.46	2.47	2.74	23	20

2.3 応力-ひずみ関係

図-1 に応力-ひずみ関係を示す。なお、同図は一実験ケースにつき、3 体の実験結果の平均値を

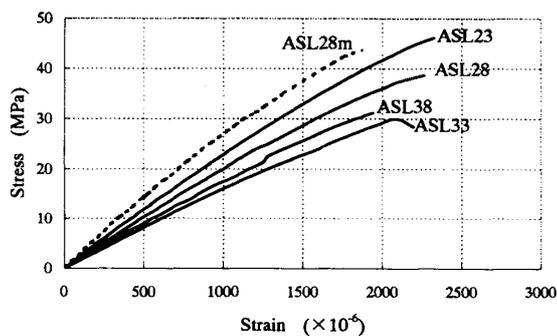


図-1 応力-ひずみ関係

用いたものである。この結果より、本研究で用いた配合条件下のコンクリートは、一般的な天然骨材によるコンクリートに比べ、破壊直前まで非常に線形な応力-ひずみ関係にあり、その挙動はモルタルコンクリート(ASL28m)とほぼ同様であることが分かる。これは軽量骨材そのものがモルタル部とほぼ同程度の変形性能を有することに起因するものと予想される²⁾。

3. 体積変化特性

3.1 線膨張率実験

(1) 実験方法

自由収縮ひずみやクリープひずみを正確に測定するには、予め温度変化に対する熱ひずみ応答性(線膨張率)を求めておく必要がある。そこで本研究では、埋込型ひずみゲージ(Gauge Length: 60mm)および熱電対(T.Type)を埋設した 100×100×400mm 供試体(ASL28)を作製し、表-3 に示される温度履歴をプログラムした温度制御装置内にて内部温度およびひずみの測定を行った。

表-3 線膨張率試験における温度履歴

20°C	→昇→	70°C	→降→	20°C
3hours	7hours	3hours	7hours	3hours

なお、実験供試体は、打設後 28 日間養生庫(20°C, R.H.85%)内にて気中養生を施したものである。また比較のため、同供試体を 24 時間以上水中養生を行った後、アルミ防水テープを用いて乾燥を制御した湿潤状態の線膨張率の測定も行った。

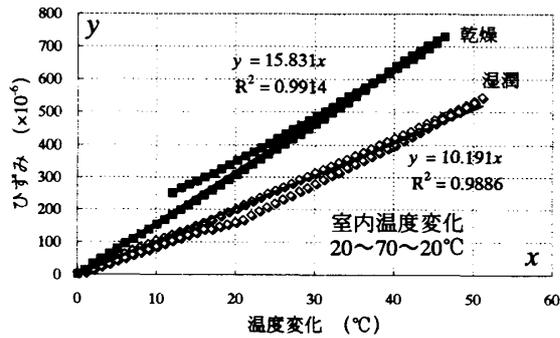


図-2 線膨張率試験結果

(2) 線膨張率実験結果

図-2 にひずみ-内部温度関係およびその結果に基づく線形回帰結果(線膨張率)を示す。この結果より、乾燥および湿潤下では、それぞれ約 15.8, 10.2($\mu/\text{°C}$)の線膨張率となった。乾燥下にある軽量骨材コンクリートに着目すると、一般的なコンクリートの線膨張率 10($\mu/\text{°C}$)に比べ、約 1.5 倍以上の値であり、人工軽量骨材がコンクリートの線膨張率に大きな影響を及ぼしていることが伺われる。乾燥・湿潤の線膨張率の差異は、アルミ防水テープそのものの影響も否めないが、微細な間隙中の水圧が変形に抗しているものと思われる。なお、本研究では、以下の収縮およびクリープ実験のデータ整理にあたり、いずれも(自己)乾燥下にあると予想されることから、温度変化に対するひずみ補正として線膨張率 15.8($\mu/\text{°C}$)を用いた。

3.2 自己収縮および乾燥収縮実験

(1) 実験方法

本研究では、ASL28 および AL29 のコンクリート供試体(100×100×400mm)の自由収縮を測定するため、 π 型変位計によるコンプレッソメータを作製し(図-3 参照)、乾燥開始材齢 1 日(ASL28)、3 日(AL29)にて計測を行った。同装置を用いることで、長期間に渡るコンクリートひずみにおいても、比較的安定した計測が可能となった。なお自己収縮試験用供試体(ASL28)は、全表面にアルミ防水テープを用いて乾燥の抑制を施したものである。

また、材齢 3 時間から 7 日までの短期における

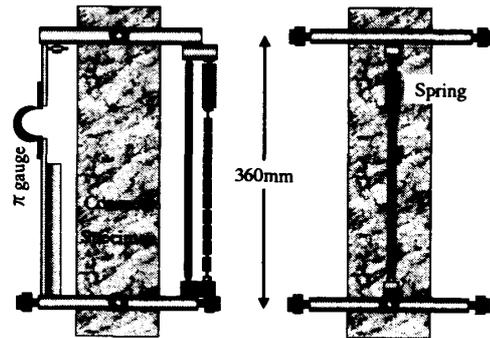
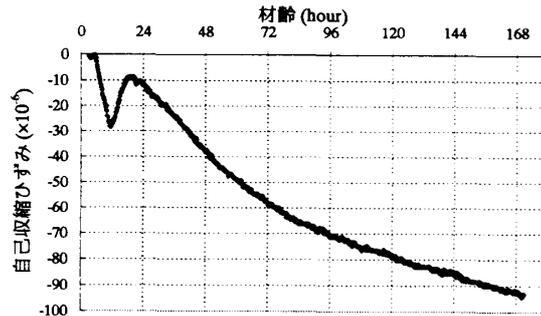
図-3 π 型変位計併用式コンプレッソメータ

図-4 材齢 3 時間～7 日における自己収縮

自己収縮(ASL28)について、测温機能を有する埋込ひずみ計を用いて別途計測を行った。同試験においては型枠との摩擦抵抗を小さくするため、接触面にシリコンシートを 3 重に配置するとともに、上面から湿布で覆うことで乾燥の影響を排除した。

(2) 自己収縮実験結果

図-4 に材齢 3 時間～7 日における自己収縮ひずみ結果を示す。材齢 24 時間までにおいて、一旦ピークを形成しているが、これは極若材齢期にあるコンクリートの水和熱による温度(ひずみ)補正に対し、十分に水和が進行したコンクリートの線膨張係数 15.8($\mu/\text{°C}$)を用いたことに起因するものである。しかしながら材齢 24 時間以降における自己収縮ひずみは、比較的滑らかな曲線を描いており、材齢 7 日(168 時間)において、約 90 μ の自己収縮ひずみとなった。

また、図-5 に材齢 1 日以降における自己収縮ひずみ結果を示す。同図では、実験開始時より単調に増加し、材齢 28 日において約 240 μ の収縮ひずみとなったが、以降はあまり収縮ひずみが生じて

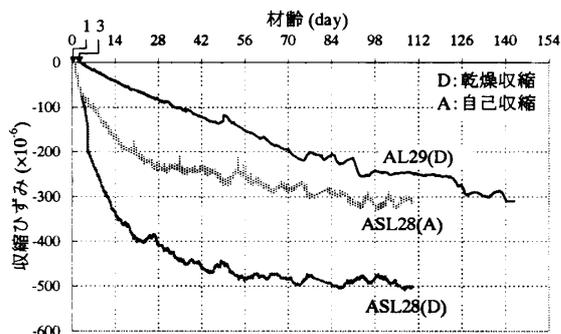
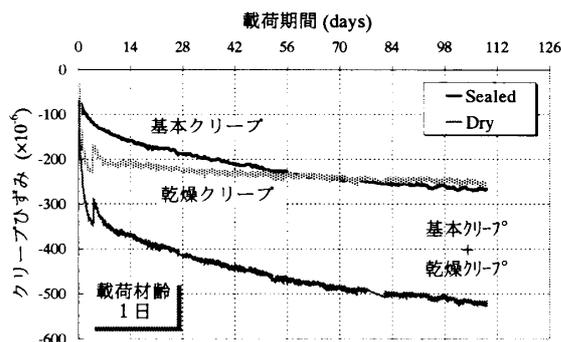
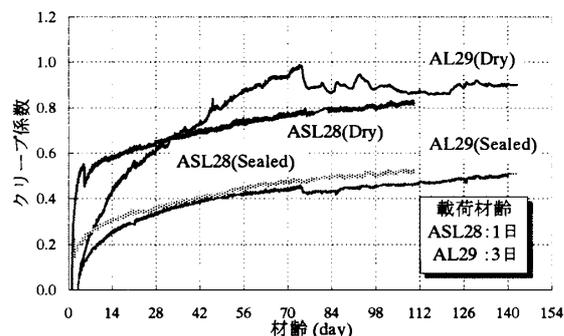


図-5 自己収縮および乾燥収縮試験結果



A)クリープひずみ(ASL28)



B)クリープ係数(ASL28 および AL29)

図-6 圧縮クリープ試験結果

いないことが分かる。

(3) 乾燥収縮実験結果

図-5 に示される ASL28 の乾燥収縮試験結果に着目すると、材齢 28 日、98 日においてそれぞれ約 400μ 、 500μ 程度の収縮ひずみであり、自己収縮ひずみのおよそ 2 倍に相当するものであった。また骨材種別にもと、直線的に増加傾向を示す AL29(乾燥開始材齢 3 日)に比べ、ASL28 は乾燥開始初期より大きな乾燥収縮が発生しており、既往

の研究³⁾とほぼ同様の傾向が認められた。

3.3 圧縮クリープ実験

(1) 実験方法と実験項目

本研究における圧縮クリープ実験では、配合記号 ASL28 コンクリート(100×100×380mm)に対し、材齢 1 日において二重アーム式載荷装置を用いて載荷荷重 7tf(6.9MPa)を導入した。これは、載荷時の応力強度比が約 16%に相当するものである。なお、ひずみの計測は自由収縮実験と同様に π 型変位計併用式コンプレッソメータを用い、環境温度 20°C(R.H.85%)にて行った。また、膨張頁岩による人工軽量骨材コンクリート(AL29)に対しても、同載荷応力(載荷時応力強度比約 16%、載荷材齢 3 日)にて圧縮クリープ実験を行った。なお本研究では、いずれの実験においても、載荷と無載荷のひずみ差を用いてクリープひずみを求め、アルミ防水テープによる封緘の有無による基本・乾燥クリープの分別を行った。

(2) 圧縮クリープ実験結果

図-6 にクリープひずみ(ASL28)およびクリープ係数(ASL28, AL29)の結果を示す。ここでクリープひずみ結果に着目すると、基本クリープひずみに比して乾燥クリープひずみは載荷初期より急増しているが、載荷期間 55 日(材齢 56 日)では、両者は約 240μ とほぼ同程度の値となっており、乾燥クリープがほぼ一定値に収束していることが分かる。すなわち、以降のクリープ現象においては基本クリープが支配的であることが伺われる。

また、一般に普通コンクリートに比べ、軽量骨材コンクリートのクリープひずみは大きいものの、ヤング率が小さいことに起因して、結果的にクリープ係数が小さくなることが知られている³⁾。本研究におけるいずれの条件のコンクリートもクリープ係数は 1.0 以下であり、封緘による基本クリープに至っては、材齢 98 日においてクリープ係数が 0.5 程度であった。なお、同図に示される結果は、載荷材齢が異なり単純比較は出来ない

が、骨材タイプの異なる両コンクリートの基本クリープはほぼ同程度であることがわかる。しかしながら、乾燥下にあるコンクリートのクリープ挙動は、ASL28とAL29で大きく異なっていることから、骨材のタイプが乾燥クリープに影響を及ぼしているものと推察される。

4. 異形鉄筋の付着特性

4.1 実験方法

本研究における付着実験では、異形鉄筋(SD295A)をコンクリート断面中央に張り出し埋設した供試体(ASL28)を用いた。定着部(320mm)となる鉄筋には、中心部および中心部から53mmピッチで合計7箇所にはずみゲージ(Gauge Length: 3mm)の貼付を行った。なお、同様に定着部を除いた埋設部の鉄筋両端は、非定着領域とした。また、コンクリートへの応力伝達を調べるため、表面中心部および鉄筋軸に沿って中心部より±53mm位置にはずみゲージ(Gauge Length: 30mm)を貼付した。

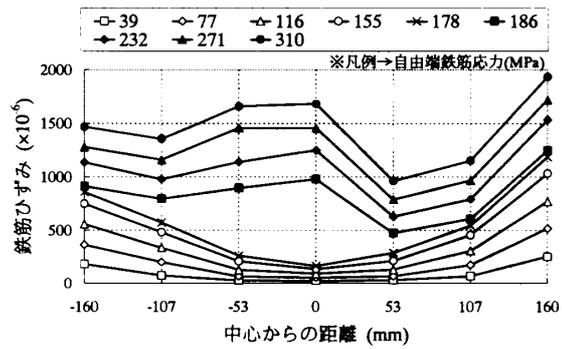
両端面より張り出した鉄筋はグリップで固定され、油圧式万能試験機(Max100tf)を用いて荷重制御による鉄筋ひずみの計測を行った⁴⁾。

4.2 鉄筋ひずみ分布

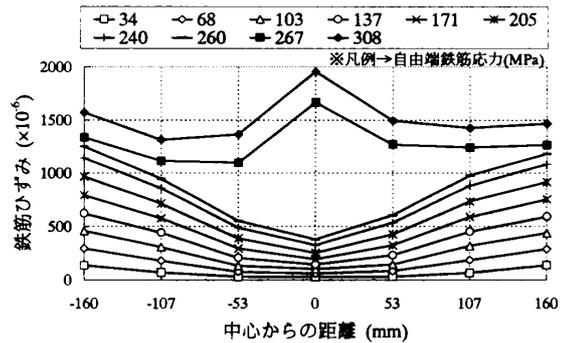
図-7に両引き試験による鉄筋ひずみ分布を示す。なお、同図における横軸は鉄筋軸を示し、凡例において張り出し鉄筋単身に導入した応力(自由端鉄筋応力)を表す。ここで、鉄筋ひずみ分布の急変部は、コンクリートにひび割れが生じた後の鉄筋ひずみ分布であり、いずれの実験においても表面中心部のひずみが約100μ程度に達した後、供試体中央断面において貫通ひび割れが発生した。また、ひび割れ発生以前に着目すると、供試体中心部を境界とするほぼ対象なひずみ分布となっていることが分かる。

4.3 付着応力-すべり関係

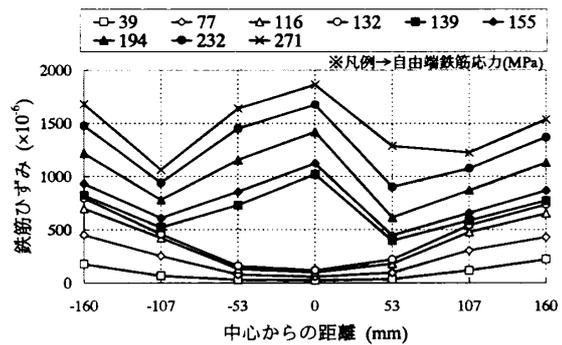
ひび割れ発生以前における鉄筋ひずみ分布結



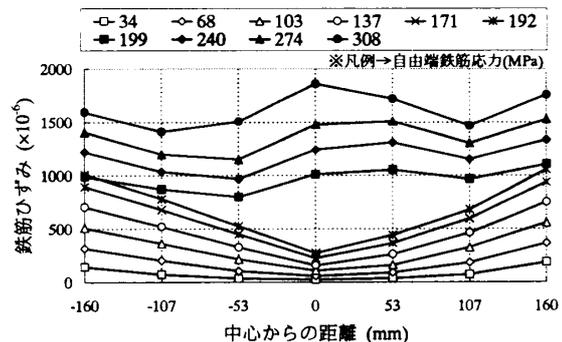
(100×100×400mm, D13, 1日)



(150×150×520mm, D19, 1日)



(100×100×400mm, D13, 7日)



(150×150×520mm, D19, 7日)

(供試体寸法, 鉄筋径, 試験材齢)

図-7 両引き試験における鉄筋ひずみ分布

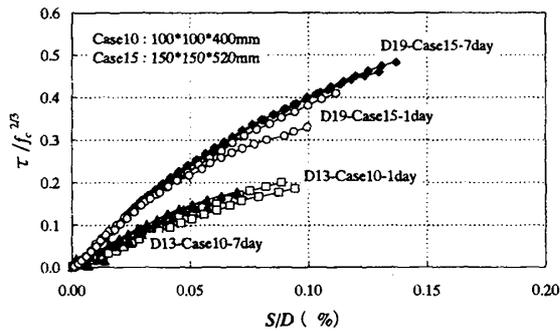


図-8 付着応力-すべり関係

果より、埋設部の鉄筋中心は不動点(すべり $S=0$ 、鉄筋ひずみ $\epsilon_s \neq 0$)と仮定できる。そこで本研究では、不動点を起点とするすべり S と付着応力 τ の関係について整理を行った。なお、本研究では着目点と隣接する点の計3点を2次曲線(ひずみ分布曲線)で回帰を行い、鉄筋軸に沿う積分からすべり S を求めている。また、付着応力 τ はひずみ分布曲線の勾配から算定を行った。

図-8 に付着応力-すべり関係を示す。なお、縦軸は付着応力 τ を試験時の圧縮強度の $2/3$ 乗で除することで、正規化を行っている。同結果においては、試験材齢の相違による付着応力-すべり関係の相違はほとんど見受けられない。これは、コンクリートの材齢進行に伴う強度発現の影響に対し、適切な正規化を行えたことを意味するものと考えられる。

また、いずれの試験結果においても、最大の相対すべり S/D は 0.15% 以下と極めて小さく、比較的早い段階からコンクリートの破断を迎えていることが分かる。また、ひび割れ発生後は、ひび割れ部近傍に複数のひび割れが発生・分散したことから、鉄筋ひずみ分布およびそれに伴うすべり量に定性的な傾向が認められなかった。これは、両引き試験では常にコンクリートが引張応力場にあることから、軽量骨材コンクリート特有の低引張強度特性が影響を及ぼしているものと思われる。

5. まとめ

本研究の範囲内で得られた結論を以下に要約する。

- ①本研究で用いた軽量骨材コンクリートの応力-ひずみ関係は、モルタルコンクリートと同様にほぼ線形関係にあった。
- ②ASL28 コンクリートでは乾燥下において、 $15.8 \mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$ の線膨張率であり、一般的なコンクリートに比べ極めて大きいことが分かった。
- ③AL29 の乾燥収縮ひずみは、ほぼ直線的に増加したが、ASL28 では、乾燥開始初期から大きく、材齢 56 日において自己収縮ひずみの約 2 倍に相当するひずみが生じた。
- ④骨材タイプの異なったコンクリートにおいても、基本クリープはほぼ同程度であり、材齢 56 日においてクリープ係数が約 0.5 であった。
- ⑤相対すべりが比較的小さい段階において、コンクリートに貫通ひび割れが生じた。これは軽量骨材コンクリートの低引張強度特性の影響が著しいものと予想される。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、(株)栗本鐵工所の串田守可氏、津田久嗣氏に多大なる御協力を頂きました。また、実験に際しては山口大学卒論生の村上力氏、山口佳起氏に御尽力頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 原田良紀, 浜田純夫, 松尾栄治, 津田久嗣: 軽量床版の押抜きせん断耐力に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.3, pp.715~720, 2000.6.
- 2) 杉山隆文: 軽量コンクリート-土木構造物-, コンクリート工学, Vol.39, No.1, pp.86~90, 2001.1.
- 3) 日本コンクリート工学協会: 高性能軽量コンクリート委員会報告書, pp.61~64, 2000.8.
- 4) 三村陽一, 吉武 勇, 浜田純夫, 永井泉治: 若材齢コンクリートの付着特性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.3, pp.1213~1218, 2000.6.