

論文 構造用軽量コンクリートの乾燥収縮ひび割れに関する研究

上田 賢司*1・佐藤 嘉昭*2・清原 千鶴*3・永松 静也*4

要旨：構造用軽量コンクリート1種のひび割れ特性を明らかにするために、同一の呼び強度の普通コンクリートと比較した乾燥収縮ひび割れ試験を行った。その結果、軽量コンクリートは平均応力が小さいがひび割れは発生し、普通コンクリートにはひび割れが発生しなかった。その原因を明らかにするため弾性応力解析を行ったところ、軽量コンクリートの最大引張応力が大きく、実験結果を裏付ける結果が得られた。

キーワード：構造用人工軽量コンクリート、乾燥収縮ひび割れ、応力解析、有限要素法

1. はじめに

現在市販されている人工軽量骨材は骨材内部に多数の微細な空隙を有する組織であり、これらが連続して存在する割合が高いため普通骨材より密度は小さいが吸水率が非常に大きい。その結果、耐凍害性やポンプ圧送性に劣り、軽量骨材の生産量は伸び悩んでいるのが現状である。しかし、最近では吸水率の非常に小さい高性能な特性を備えた人工軽量骨材が開発され、今後の需要の増大が期待されている。

軽量コンクリートの力学特性のうち、特にクリープや乾燥収縮などの時間依存性ひずみについては従来製造されている軽量骨材を用いたコンクリートにおいても十分な研究成果が得られているとは言えない。そこで本研究では現行のJISで規定されている軽量コンクリート1種のひび割れ抵抗性について検討することにした。

2. 実験概要

2.1 実験計画

軽量コンクリート1種の力学特性に関する実験として、強度試験および乾燥収縮ひび割れ試験を計画し、同じ呼び強度の普通コンクリートと比較した。表-1に実験概要を示す。

表-1 実験概要

	試験項目	大きさ (cm)	本数 (本)	実験材齢 (日)
強度	圧縮強度	φ 10x20	3	3, 7, 14, 28, 56, 112, 365
	割裂引張強度		3	
	直接引張強度	10x10x65	3	
乾燥収縮ひび割れ	一軸拘束試験	JIS 原案	4	3, 7, 28, 365
	脱水量		3	
	自由収縮ひずみ	10x10x40	3	
	自己収縮ひずみ		3	

2.2 コンクリートの調査および養生

実験にはレディーミクストコンクリート(普通:24-18-20N, 軽量1種:24-18-15N)を使用した。調査および使用材料の物理的性質を表-2, 3に示す。供試体は材齢1日で脱型し、所定の材齢まで養生室内(温度20±1℃)で封かん養生とした。

2.3 試験方法

圧縮強度試験はJIS A 1113に準拠し、ひずみの測定はコンプレッソメータを用いて行った。直接引張強度試験はチャック式の試験装置²⁾を用い、長さ60mmのポリエステルゲージを貼付けひずみの測定を行った。

脱水量および自由収縮ひずみ測定用の供試体は10x10cmの端面をパラフィンでシールし、4面乾燥状態で測定を行った。脱水量は電子天秤(精度0.1g)により質量変化を測定した。ひずみの測

*1(株)さとうベネック建築事業本部技術開発室 博士(工学)(正会員)

*2 大分大学教授 工学部福祉環境工学科 工博(正会員)

*3 大分大学助手 工学部建設工学科 工修(正会員)

*4 大分大学教授 工学部建設工学科 工博(正会員)

表-2 使用材料の物理的性質

記号	使用材料	種類	性質または成分
C	セメント	普通ポルトランドセメント	密度:3.15 g/cm ³ , 比表面積:3270 cm ² /g
S1	細骨材	山砂 (大分市片島)	表乾密度:2.61 g/cm ³ , 吸水率:1.76 %, 粗粒率:2.65
S2		海砂 (愛媛県大三島・長浜)	表乾密度:2.56 g/cm ³ , 吸水率:1.74 %, 粗粒率:2.65
AE	混和剤	AE 減水剤標準型 I 種	主成分:リグニンスルホン酸化合物およびポリオール複合体

記号	粗骨材の種類	産地または原料	最大寸法 (mm)	絶乾密度 (g/cm ³)	表乾密度 (g/cm ³)	24h吸水率 (%)	実績率 (%)
FA	人工軽量骨材	フライアッシュ	15	1.35	1.57	16.5	61.3
G	碎石	津久見産	20	2.69	2.70	0.35	60.6

表-3 コンクリートの調合

コンクリートの種類	W/C (%)	S/a (%)	単位質量 (kg/m ³)							スランプ (cm)	空気量 (%)	単位容積質量 (kg/l)	単位水量の推定値 ⁵⁾ (kg/m ³)
			W	C	S1	S2	FA	G	AE				
軽量	48.4	48.1	187	384	484	316	450	—	1.440	19.7	4.7	1.961	218.0
普通	55.2	45.5	183	332	476	308	—	949	1.245	19.5	5.4	2.319	197.9

定には長さ60mmの小型埋込みゲージ³⁾を用いた。なお、実験は恒温恒湿室内(温度20±0.5℃, 湿度60±5%R.H.)において行った。

拘束ひび割れ試験はJIS原案⁴⁾に準拠して行った。拘束鋼材はJIS G 3350の軽溝形鋼(100x50x50mm)の厚さ2.3mm(拘束A)と3.2mm(拘束B)の2種類を用い、拘束状態を変化させた。鋼材のひずみは長さ方向の中央にひずみゲージ(3mm)を貼付けて測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 圧縮強度および直接引張強度

強度試験結果を表-4に示す。圧縮ヤング係数は強度の1/3点において、引張ヤング係数は強度の1/2点の割線ヤング係数として求めている。圧縮強度および引張強度の経時変化は軽量コンクリートと普通コンクリートはほぼ同じ傾向を示し、圧縮強度が材齢の進行とともに増加しているのに対し、引張強度は28日以降の増加は見られない。また、圧縮強度は軽量コンクリートのほうが若干大きく、逆に直接引張強度は軽量コンクリートのほうが小さい。

3.2 自由収縮および脱水量

図-1に各材齢における自由収縮ひずみおよび脱水量の経時変化を示す。軽量および普通コンクリートとも乾燥開始材齢が若いほど自由収縮ひずみおよび脱水量が大きい。また、一般に

表-4 強度およびヤング係数

	圧縮強度試験				直接引張強度試験			
	強度 (MPa)		ヤング係数 (GPa)		強度 (MPa)		ヤング係数 (GPa)	
	軽量	普通	軽量	普通	軽量	普通	軽量	普通
3	17.1	17.7	13.4	20.0	2.13	2.49	14.4	23.1
7	20.7	23.2	13.6	23.3	2.43	2.48	16.7	27.2
14	26.3	26.2	15.8	24.7	2.51	2.71	17.4	25.4
28	28.8	28.9	16.3	24.9	2.76	3.01	18.0	28.2
56	34.6	30.9	16.6	25.0	2.60	2.71	18.7	29.2
112	36.3	35.2	17.3	27.4	2.72	2.99	19.5	29.3
365	36.5	35.6	17.8	27.8	2.97	2.98	20.3	30.7

軽量コンクリートの乾燥収縮は普通コンクリートとほぼ同じか若干大きめであるといわれているが、軽量コンクリートの自由収縮および脱水量は普通コンクリートに比べると非常に大きい結果となった。打設時にウエットスクリーニングしたモルタルを用いて高周波加熱乾燥法⁵⁾により単位水量を推定したところ、表-3に示すように、軽量コンクリートは普通コンクリートよりも約20kg/m³大きい結果となった。計画単位水量に大きな差はないが、実際は軽量コンクリートの単位水量は相当に大きく、これが自由収縮ひずみに影響していると考えられる。

3.3 乾燥収縮ひび割れ

軽量コンクリートには一体を除いてひび割れが発生したが、普通コンクリートの場合、全ての供試体にひび割れを発生させることができなかった。表-5に軽量コンクリートのひび割れ発生時における結果の一覧を示す。平均引張応

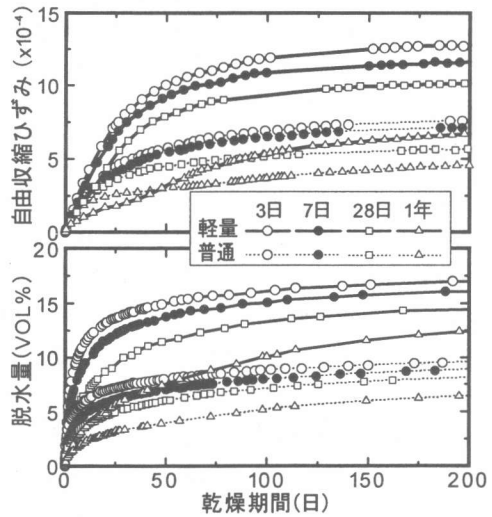
力は拘束鋼材の測定ひずみからひずみ分布の計算式⁶⁾を用い、また計算拘束率⁴⁾は乾燥開始材齢でのヤング係数を用いて算出した。普通コンクリートの計算拘束率は乾燥開始材齢28日の場合、拘束Aでは42.3%、拘束Bでは52.2%である。軽量コンクリートはヤング係数が小さいため計算拘束率は大きくなるが、軽量コンクリートの拘束Aと普通コンクリートの拘束Bの計算拘束率はほぼ同じである。また、引張強度比は直接引張強度の経時変化を近似した強度に対する平均引張応力の比としてあらわしている。

表一5によれば、ひび割れ発生日数は乾燥開始材齢が長期になるほど大きいが、逆にひび割れ発生時の応力は小さくなる傾向にある。特に乾燥開始材齢が1年の場合は、ひび割れ発生時の応力が小さく引張強度比も小さくなっている。また、実拘束率はバラツキがあるものの拘束率がひび割れ発生日数に及ぼす影響は見られない。

図一2に平均引張応力の経時変化を全ての供試体について示す。軽量コンクリートはひび割れ発生までの結果を示しているが、拘束率にはあまり影響を受けず、乾燥開始材齢ごとにほぼ同じ経時変化を示している。一方普通コンクリートの場合、拘束Bの応力が大きくなる傾向にある。また、軽量コンクリートの引張強度比が最大でも65%程度でひび割れが発生しているのに対し、普通コンクリートに生じる平均応力は軽量コンクリートよりも大きく、最大応力時の引張強度比が65~80%程度に達してもひび割れは発生しない。軽量コンクリートにのみひび割れが発生したのは、自由収縮ひずみが普通コンクリートに比べて非常に大きいこと、また、ヤング係数が小さいため拘束率が大きくなるのが要因であると考えられるが、ひび割れの発生には、平均応力だけではなく部材内の応力分布が影響するものと考えられる。

4. 乾燥収縮応力解析

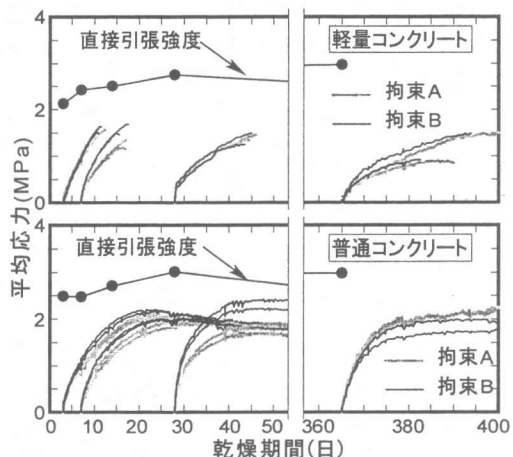
応力解析に必要な材料定数は依然として不明な点が多く、計算上の仮定を多く含んでいるが、



図一 自由収縮ひずみおよび脱水量の経時変化

表一5 ひび割れ発生時の結果

乾燥開始材齢	拘束	ひび割れ発生日数(日)	平均引張応力(MPa)	計算拘束率(%)	実拘束率(%)	引張強度比(%)
3日	A	9.4	1.55	57.6	71.1	60.4
		7.6	1.55		61.3	60.8
	B	8.1	1.30	67.0	81.7	58.6
		8.4	1.47		70.7	62.9
7日	A	9.5	1.16	57.3	65.4	46.1
		10.0	1.32		68.5	52.5
	B	8.0	1.36	66.6	61.1	58.3
		10.5	1.52		69.7	65.2
28日	A	18.7	1.43	52.8	62.8	55.8
		16.7	1.32		74.3	51.8
	B	16.2	1.12	62.5	76.7	48.3
		17.7	1.43		61.6	57.3
1年	A	26.0	0.77	50.6	47.8	34.3
	B	17.5	0.76	60.4	52.8	35.3
		28.9	1.23		62.3	55.8



図二 平均拘束応力の経時変化

以下では筆者らが構築した有限要素法による乾燥収縮応力解析システム⁷⁾を用いて応力解析を行い、ひび割れ抵抗性に関する情報を得ることにした。

4.1 解析方法

拘束されたコンクリートの応力解析は、非線形拡散方程式を解くことにより求めたコンクリート部材内の水分量の分布から、応力発生源となる部材内の微小要素に固有なひずみ（他から拘束を受けない微小要素に固有の乾燥収縮ひずみで線非拘束収縮ひずみと呼ぶ）の分布を計算し、増分形仮想仕事の原理を適用してクリープ解析したものである。応力解析では、図-2に示した平均応力を用い、平均応力が実験値と等しくなるように部材内の応力分布を求めた。コンクリートのクリープ関数については、同時に実施したクリープ試験の結果では普通コンクリートと軽量コンクリートの間には大きな差は生じなかったため⁸⁾、長期材齢のコンクリートを載荷して得られたクリープ（水和進行の影響が含まれていない）を基準状態のクリープと考え、これを基にして水和過程にある場合のクリープを考慮するために水和度を導入して構成したク

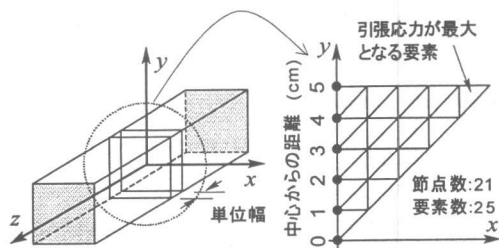


図-3 要素分割

リーブ関数⁹⁾を用いた。なお、水分拡散は4面状態とし、図-3に示すように有限要素分割は1/8断面を全節点数21、全要素数25の三角形要素に分割した。

4.2 解析結果

(1) 平均脱水量および平均収縮ひずみ

図-4に平均脱水量および平均収縮ひずみの解析結果および測定結果を示す。解析値は全要素の平均値を示している。これによると、若干の差は見られるが、すべての乾燥開始材齢において解析結果と測定結果はよく一致しており、部材内の水分量分布および線非拘束収縮ひずみ分布もほぼ予測できているものと思われる。

(2) 拘束コンクリートのひずみ

図-5に拘束コンクリートひずみの解析結果

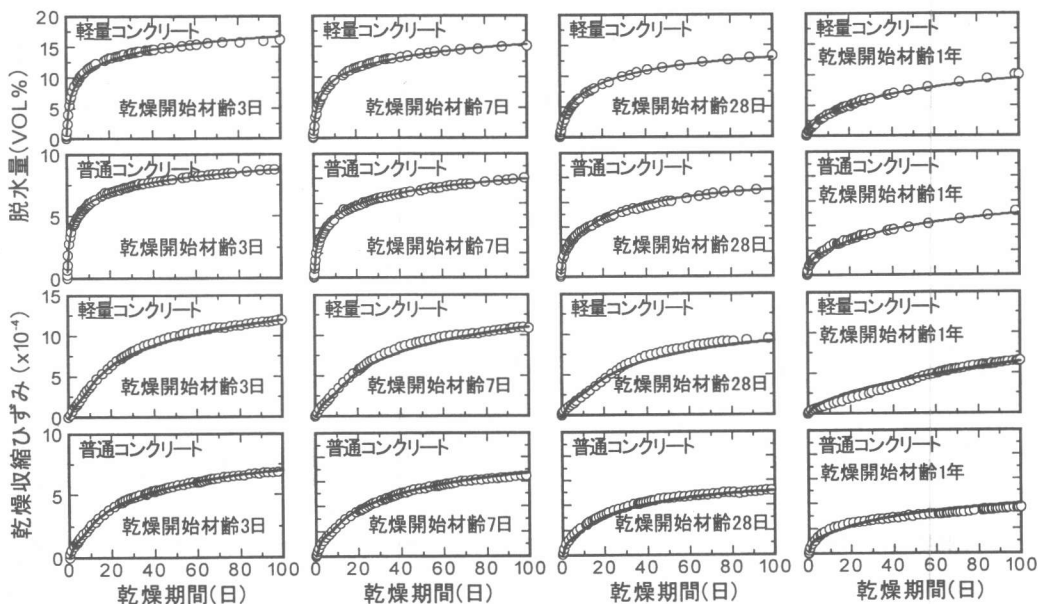


図-4 平均脱水量および平均自由収縮ひずみの解析結果

の一例として乾燥開始材齢7日の結果を示す。平均応力の解析結果は実験データとよく一致しており、実験データを適切に与えることができていることがわかる。拘束コンクリートのひずみの解析結果は、必ずしも実験値とは一致せず、乾燥期間が進むにつれ解析値は若干大きくなるが、その傾向をよくあらわしており、応力解析方法の妥当性を示しているものと思われる。

(3) 部材内の分布

図-6に乾燥開始材齢28日における脱水量、線非拘束収縮ひずみおよび応力の分布を示す。解析結果は図-3に示した節点の結果である。部材の表面と内部では乾燥の程度が大きく異なることから、乾燥直後から表面部分の脱水量および線非拘束収縮ひずみが非常に大きくなる。また、軽量コンクリートのほうが脱水量および線非拘束収縮ひずみともに大きく、勾配も大きい。表面部分の引張応力には大差ないが、軽量コンクリートは圧縮応力が大きくなっている。

(4) 拘束コンクリートの応力

現時点では、ひび割れの発生条件について十分な議論を行ってないので、コンクリートのひび割れに影響を及ぼす引張応力について、ここでは単純に図-7に示すような最大引張応力と平均引張応力に関して検討を行った。図-8に各乾燥開始材齢において解析によって得られた応力の経時変化の一例を示す。軽量コンクリー

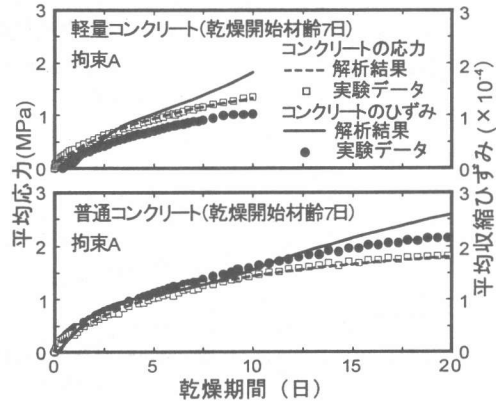


図-5 拘束コンクリートひずみの解析結果

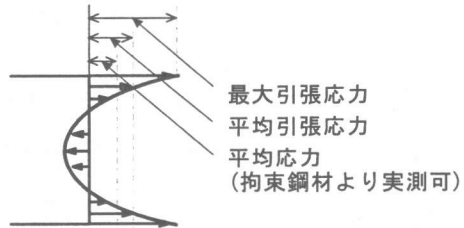


図-7 応力の定義

トの場合はひび割れ発生時までの結果である。最大引張応力は図-3に示す要素の値で全要素の最大値を示しており、平均引張応力は引張応力の受けている要素の平均値である。平均応力は普通コンクリートのほうが若干大きい値となっているが、最大応力および平均引張応力は逆に軽量コンクリートのほうが大きい。乾燥を受

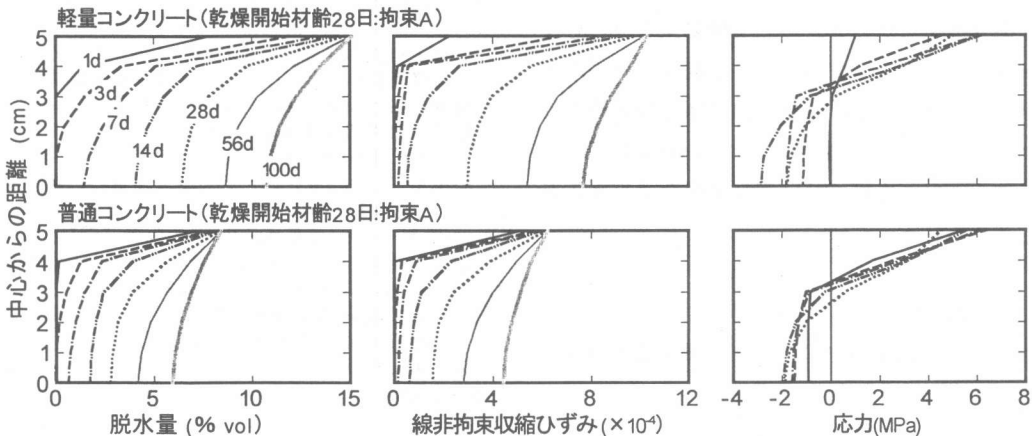


図-6 脱水量、線非拘束収縮ひずみおよび応力の分布

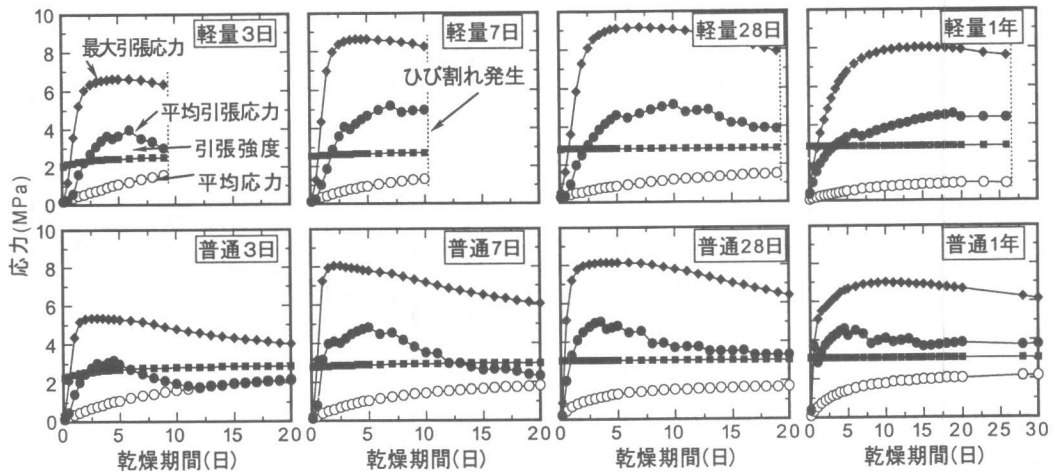


図-8 拘束コンクリートの応力の経時変化

けるコンクリート部材内には乾燥収縮応力が発生するため、平均応力が同じでも引張応力領域の大きさが異なる。すなわち軽量コンクリートの場合応力勾配が大きく、平均応力が小さくても、圧縮応力が大きくなり、それともない引張応力も大きくなっている。したがってこの引張応力領域の差がひび割れの発生の有無につながったものと考えられる。

以上のように、普通コンクリートに比べて軽量コンクリートのほうがひび割れに対する抵抗性は低いように思われるが、このことは、クリープ破壊試験において供試体に水分が多く存在するほどクリープ破壊時の応力レベルは低くなること、さらにひび割れの進展において水分は促進効果をもたらすという実験結果¹⁰⁾からもうかがえる。また、乾燥を受ける場合、コンクリートの直接引張強度や曲げ強度は乾燥開始直後に一旦低下する傾向があり、この強度低下が顕著であったために、ひび割れ発生を早めたことも考えられる。

5. まとめ

本研究の範囲内で得られた結果をまとめると次のようになる。

- (1) 同じ呼び強度のコンクリートを比較すると、軽量コンクリートはひび割れ抵抗性が小さい

が、これには自由収縮ひずみが大きいことが要因である。

- (2) クリープ応力解析を行った結果、軽量コンクリートの平均応力は小さいものの最大引張応力は大きく、ひび割れ発生に影響を及ぼす。

参考文献

- 1) 岡本享久ほか: 高性能軽量コンクリート, コンクリート工学, vol. 37, No. 4, pp. 12-18, 1999.4
- 2) 上田賢司ほか: コンクリートの直接引張強度に及ぼす乾燥の影響に関する研究, セメント・コンクリート論文集, No. 51, pp.828-833, 1997
- 3) 佐藤嘉昭ほか: コンクリート用小型埋め込みゲージの開発(その3), 日本建築学会研究報告九州支部, 第37号・1(構造系), pp.141-144, 1998
- 4) ひび割れ研究会: コンクリートのひび割れ試験方法の標準化とその適用性に関する研究(その1), セメント・コンクリート, No. 532, pp.49-56, 1991.6
- 5) 日本建築学会: フレッシュコンクリートの単位水量測定方法, 高性能AE減水剤コンクリートの調査・製造および施工指針・同解説(付3), pp.119-139, 1999
- 6) 上田賢司ほか: コンクリート部材の乾燥収縮ひび割れ実験における拘束鋼材のひずみ分布, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 19, No. 1, pp. 703-708, 1997
- 7) 上田賢司ほか: コンクリート部材に生じる乾燥収縮応力の解析, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 20, No. 2, pp. 637-741, 1998
- 8) 佐藤 嘉昭ほか: 軽量コンクリートの乾燥収縮ひび割れ特性に関する研究(その1), 日本建築学会研究報告九州支部, 第38号・1(構造系), pp. 97-100, 1999
- 9) 永松静也ほか: 水和過程にあるコンクリートの圧縮クリープ関数, 日本建築学会論文報告集, No.344, pp.16-24, 1984
- 10) 永松静也ほか: モルタルのクリープ破壊強度に関する研究—クリープ破壊強度の確率分布と試片の含有水分がそれにおよぼす影響について—, セメント技術年報33, pp. 413-416, 1979