

論文 モルタルおよびコンクリートの収縮ひび割れ特性の相違に関する研究

三島 剛*1・佐藤 嘉昭*2・上田 賢司*3・大谷 俊浩*4

要旨: 本研究では、コンクリートとそのコンクリート調合から粗骨材を除いたモルタルに対して、同じ寸法の供試体を用いて鉄筋埋設型、拘束率制御型および外部拘束型の3種類の乾燥収縮ひび割れ試験を行い、コンクリートとモルタルのひび割れ特性の相違と試験方法の影響に関して検討を行った。その結果、拘束応力の経時変化は、モルタルとコンクリートでは大差はないが、モルタル供試体はひび割れが早く発生し、ひび割れ発生時の拘束応力が小さくなること、また、試験方法の違いでひび割れ発生までの期間、拘束応力、拘束引張ひずみに大きな違いはみられないことを明らかにすることができた。

キーワード: 乾燥収縮ひび割れ、圧縮クリープ、拘束応力、拘束引張ひずみ、ひび割れ発生条件

1. はじめに

新しい材料を用いて調合したコンクリートの性能を評価しようとしたとき、フレッシュ性状、強度性状、耐久性、乾燥収縮ひび割れ特性に関する性能など多くの実験データの蓄積が必要であり、そのためには、多くの供試体を準備しなければならない。その場合、コンクリート供試体では作製において大きな労力を要するため、比較的労力が小さいモルタル供試体によって実験を行い評価することによってデータを蓄積することが望まれる。

筆者らは、既報においてフライアッシュコンクリートのひび割れ特性を把握するために、断面寸法が40×40mmのモルタル供試体を用いて小型の鉄筋埋設ひび割れ試験¹⁾を行ったが、ひび割れ発生時の拘束応力が大きくなるなどコンクリート供試体とは異なる結果が得られた。しかしながら、断面寸法の異なるひび割れ供試体を用いているため、コンクリート供試体の結果との整合性については十分に検討できていない。また、乾燥収縮ひび割れ試験方法には多くの方法が提案されているが、試験方法の違いが測定結果に及ぼす影響に関して検討した研究は少ない。

そこで、本研究では、コンクリートとそのコンクリート調合から粗骨材を除いたモルタルを用いて、同じ寸法の供試体で3種類の乾燥収縮ひび割れ試験を行い、コンクリートとモルタルのひび割れ特性の相違と試験方法の影響に関して検討した。

2. 実験

2.1 実験計画

同じ寸法のコンクリートおよびモルタル供試体を用い

表-1 実験項目

実験項目		供試体寸法 (mm)	本数 (体)	試験材齢 (日)
強度試験	圧縮	φ100×200	3	7, 28
		φ50×100	3	
	割裂引張	φ100×200	3	
		φ50×100	3	
直接引張	100×100×600	3	7	
圧縮クリープ試験	Total Creep	100×100×200	2	7
	Basic Creep		2	
	乾燥収縮ひずみ		2	
	自己収縮ひずみ		2	
乾燥収縮ひび割れ試験	鉄筋埋設型	100×100×1100	2	7
	拘束率制御型	JIS A 1151 に準ずる	2	
	外部拘束型		2	
	乾燥収縮ひずみ	100×100×400	2	
	脱水量	100×100×400	2	

表-2 使用材料

種類	記号	使用材料および物性
水	W	上水道水
セメント	C	普通ポルトランドセメント(密度:3.16g/cm ³)
細骨材	S	山砂(表乾密度:2.61g/cm ³ , 吸水率:2.82%)
粗骨材	G	硬質砂岩砕石(表乾密度:2.64g/cm ³ , 吸水率:0.83%)
混和剤	Ad	AE減水剤標準形

表-3 コンクリートおよびモルタルの調合

調合	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				Ad (C×%)
			W	C	S	G	
コンクリート	50	48.0	350	175	842	919	0.25
モルタル	50	—	585	293	1368	—	—

て強度試験、圧縮クリープ試験および乾燥収縮ひび割れ試験を計画した。モルタルの調合はコンクリートの調合から粗骨材を取り除いたもので、混和剤は使用していない。実験項目を表-1、使用材料を表-2、調合を表-3に示す。

*1 大分大学大学院 工学研究科博士後期課程環境工学専攻 修士(工学)(学生会員)

*2 大分大学 工学部福祉環境工学科建築コース教授 工博(正会員)

*3 (株)ゼロテクノ 博士(工学)(正会員)

*4 大分大学 工学部福祉環境工学科建築コース准教授 博士(工学)(正会員)

2.2 練混ぜおよび養生

コンクリートおよびモルタルの混練には2軸ミキサを使用し、15秒間空練りした後、水を投入して2分間練り混ぜた。供試体は打設後、ブリーディングがほぼ終了した段階で表面を均し、封緘養生を行った。材齢1日で脱型後、強度試験用供試体は各試験材齢まで同室内にて水中養生とし、その他の供試体は全て封緘養生とした。なお、実験は恒温恒湿室（温度：20±1℃，相対湿度 60±5%）で行った。

2.3 実験方法

(1) 各種強度

圧縮強度試験は JIS A 1108，割裂引張強度試験は JIS A 1113 に準じてφ100×200mmの円柱供試体で行ったが、モルタル供試体のみφ50×100mmの円柱供試体でも行った。また、圧縮強度試験ではコンプレッソメータを用いてひずみの測定を行い、ヤング係数を算出した。

直接引張強度試験は、100×100×600mmの供試体で拘束率制御型収縮ひび割れ試験装置を用いて行った。なお、ひずみの測定は表面接着ゲージ（測長：60mm）を貼付け、ヤング係数を算出した。

(2) 乾燥収縮ひずみ

乾燥収縮試験は、JIS A 1129-2 に準拠して行った。ひずみの測定にはコンタクトゲージ（標点間距離 200mm，精度 1/1000mm）を用いた。材齢7日から測定を開始し、同時に脱水量を測定した。

(3) 圧縮クリープひずみ

圧縮クリープ試験概要図を図-1に示す。圧縮クリープ試験は、ゴムスプリング式装置²⁾を用い、100×100×200mmの角柱供試体を4体（Basic Creep および Total Creep 供試体各2体ずつ）縦に重ねた状態で材齢7日から载荷を行った。载荷応力は材齢7日圧縮強度の約30%とした。また、自己収縮ひずみおよび乾燥収縮ひずみ試験をそれぞれクリープ試験供試体と同一サイズで行った。なお、ひずみの測定は全て小型埋込みゲージ（直径：4mm，測長：60mm）を埋設して使用した。

(4) 乾燥収縮ひび割れ

乾燥収縮ひび割れ試験は、鉄筋埋設型³⁾，拘束率制御型⁴⁾，外部拘束型⁵⁾の3種類で行った。

鉄筋埋設型の供試体概要図を図-2に示す。供試体の寸法は100×100×1100mmの角柱供試体で、拘束用の埋設鉄筋はねじ切り加工したφ32mmの丸鋼を使用した。中央部分300mmはねじ切り加工をせずに付着除去区間を設け、拘束鉄筋のひずみの測定には貼付けゲージ（測長：5mm）を使用した。コンクリートまたはモルタルのひずみの測定は、供試体中央部に表面接着ゲージ（測長：60mm）を貼り付けを行った。

拘束率制御型試験の概要図を図-3に示す。この装置は、

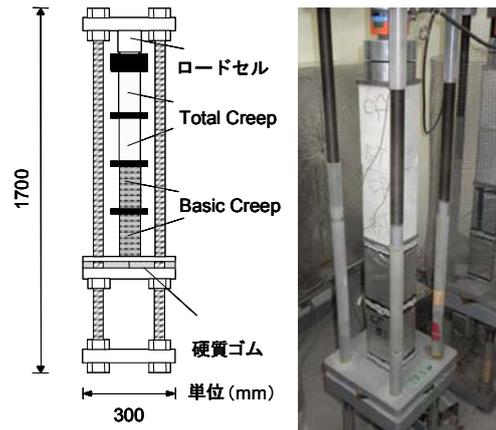


図-1 圧縮クリープ試験概要図

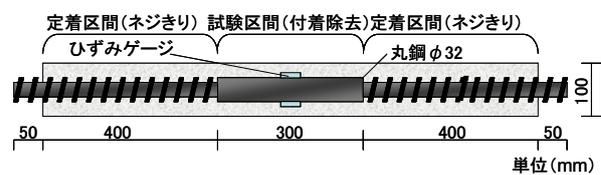


図-2 鉄筋埋設型供試体概要図

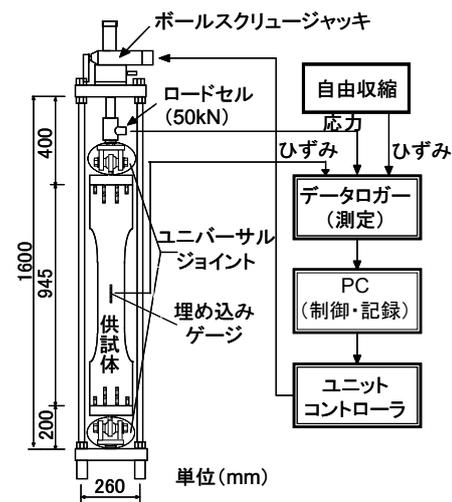


図-3 拘束率制御型試験方法概要図

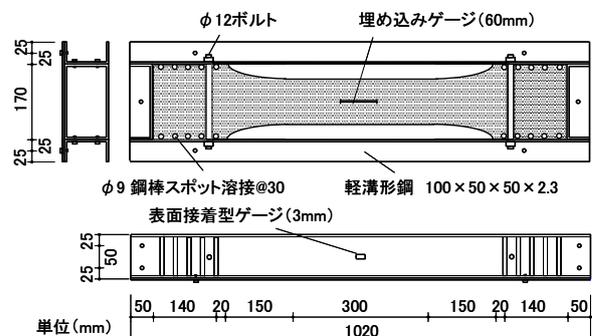


図-4 外部拘束型供試体概要図

拘束度を自由にコントロールでき、拘束応力を直接ロードセルで測定できる。供試体は JIS A 1151 に準じる形状のもので、小型埋込みゲージでひずみの測定を行った。

表-4 フレッシュ性状および強度試験結果

調合	フレッシュ性状					圧縮強度				割裂引張強度		直接引張強度		
	スランブ (cm)	ミニ スランブ (mm)	フロー値 (mm)		空気量 (%)	温度 (°C)	強度 (N/mm ²)		ヤング係数 (kN/mm ²)		強度 (N/mm ²)		強度 (N/mm ²)	
			0打	15打			7日	28日	7日	28日	7日	28日	7日	ヤング係数 (kN/mm ²)
コンクリート(φ100mm)	20.5	—	—	—	5.7	26.5	27.3	34.7	26.8	29.1	2.68	2.75	2.60	27.0
モルタル(φ100mm)	—	82	114	223	1.3	28.5	32.9	42.5	21.6	22.4	2.58	3.02	2.41	19.8
モルタル(φ50mm)	—	—	—	—	—	—	32.0	45.7	20.1	23.3	3.34	3.57	—	—

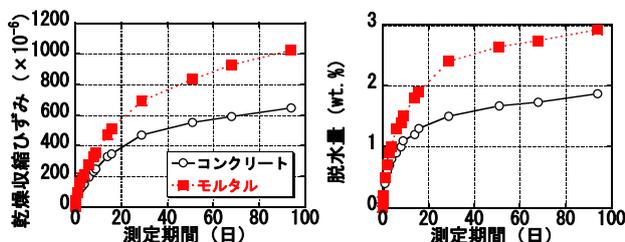


図-5 乾燥収縮ひずみおよび脱水量の経時変化

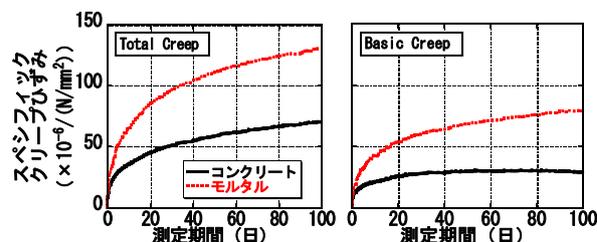


図-6 クリープひずみの経時変化

外部拘束型供試体の概要図を図-4に示す。JIS A 1151に準拠して実験を行ったが、拘束鋼材はJIS G 3350に規定する呼び名 1203 (100×50×50×2.3mm)の軽溝形鋼を使用した。拘束鋼材のひずみの測定には貼付けゲージ(測長: 5mm)を使用した。コンクリートまたはモルタルのひずみの測定は、小型埋込みゲージを使用した。

3. 実験結果および考察

3.1 フレッシュ性状および各種強度

フレッシュ性状および強度試験結果を表-4に示す。寸法が同じ供試体の場合、材齢7日および28日ともに、モルタルの圧縮強度がコンクリートよりも20%程度大きくなっている。コンクリートの圧縮強度は、強度低下の原因となる骨材とペースト間の境界層がモルタルよりも増加するため小さくなるが、コンクリートの空気量が5.7%に対しモルタルの空気量は1.3%となっていることも大きく影響している。

圧縮強度に及ぼす供試体の寸法の影響について、骨材の最大寸法が大きく影響しており、供試体寸法に比べ相対的に骨材寸法が小さい場合には、供試体寸法の増大とともに強度は低下する⁶⁾。供試体寸法の異なるモルタル供試体の圧縮強度は、材齢7日では同程度であるが、材齢28日ではφ50mmのほうが8%程度高くなっており寸法効果の影響があらわれている。割裂引張強度は同じ寸法のコンクリート供試体とモルタル供試体では、材齢28日では若干モルタル供試体法が大きい、圧縮強度のような大差はない。直接引張強度も同様である。モルタル供試体の寸法の影響は、圧縮強度と同様に寸法の小さいほうが強度も大きい。引張ヤング係数は圧縮ヤング係数と同様にコンクリートのヤング係数が大きい。

コンクリートのヤング係数はモルタルのヤング係数と

粗骨材のヤング係数の特性によって決まる。骨材のヤング係数はモルタルのヤング係数よりも大きい、コンクリートのヤング係数はモルタルのヤング係数よりも大きい。また、モルタルのヤング係数に対する供試体寸法の影響はあまりみられない。

3.2 乾燥収縮ひずみ

乾燥収縮ひずみおよび脱水量の経時変化を図-5に示す。コンクリート供試体に比べてモルタル供試体の収縮ひずみが大きい。これは、コンクリートはモルタル分と粗骨材の二相材料であり、収縮ひずみの発生源であるモルタルが粗骨材によってひずみを拘束されることになるためである。脱水量は、粗骨材のないモルタルは単体水量が多くなるため大きくなる。

3.3 圧縮クリープ

Total CreepひずみおよびBasic Creepひずみの経時変化を図-6に示す。両図のクリープひずみの値は、載荷応力で除したスベシフィッククリープひずみとして表している。コンクリートのTotal CreepひずみおよびBasic Creepひずみはモルタルの40~50%程度である。コンクリートのクリープひずみの主たる発生源は水和セメントペーストであり、コンクリート中の骨材は主にセメントペーストのひずみを拘束する。コンクリート中のセメントペーストの構成比がコンクリートのクリープひずみに及ぼす要因となる。すなわち、骨材量が多いほど変形を拘束する度合いが大きくなり、クリープひずみは小さくなる。

3.4 乾燥収縮ひび割れ

乾燥収縮ひび割れ試験の測定結果を表-5に示す。鉄筋埋設型の拘束応力の算出は、鉄筋のひずみから式(1)を用いて算出した。また、外部拘束型の場合も拘束鋼材のひずみから算出することになるが、拘束鋼材のひずみは一樣とはならず曲げ応力が生じる。そこで、曲げ応力に

表-5 乾燥収縮ひび割れ試験の測定結果

試験方法	調合	乾燥開始時		ひび割れ発生までの期間 (日)	ひび割れ発生時		最大拘束応力時		最大拘束応力低減率*1 α	最大応力ひずみ増加率*2 β
		引張強度 σ_0 (N/mm ²)	引張ひずみ ε_0 ($\times 10^{-6}$)		拘束応力 (N/mm ²)	拘束引張ひずみ ($\times 10^{-6}$)	拘束応力 (N/mm ²)	拘束引張ひずみ ($\times 10^{-6}$)		
鉄筋埋設型	コンクリート	2.60	103	15.4	1.84	166	1.89	157	0.73	1.52
				17.2	1.78	190	1.90	186	0.73	1.81
	モルタル	2.41	122	2.3	1.03	91	1.07	80	0.44	0.66
				4.0	1.09	148	1.17	121	0.49	0.99
拘束率制御型	コンクリート	2.60	103	14.2	1.59	170	1.61	170	0.62	1.65
				24.0	1.47	231	1.52	219	0.58	2.13
	モルタル	2.41	122	2.1	1.01	86	1.01	86	0.42	0.70
				5.1	1.20	150	1.26	144	0.52	1.18
外部拘束型	コンクリート	2.60	103	21.7	2.00	199	2.10	201	0.81	1.95
				23.0	2.15	240	2.21	227	0.85	2.20
	モルタル	2.41	122	4.1	1.36	136	1.37	134	0.57	1.10
				5.7	1.39	143	1.50	124	0.62	1.02

*1: 最大拘束応力/乾燥開始時引張強度 *2: 最大拘束応力時の拘束引張ひずみ/乾燥開始時引張ひずみ

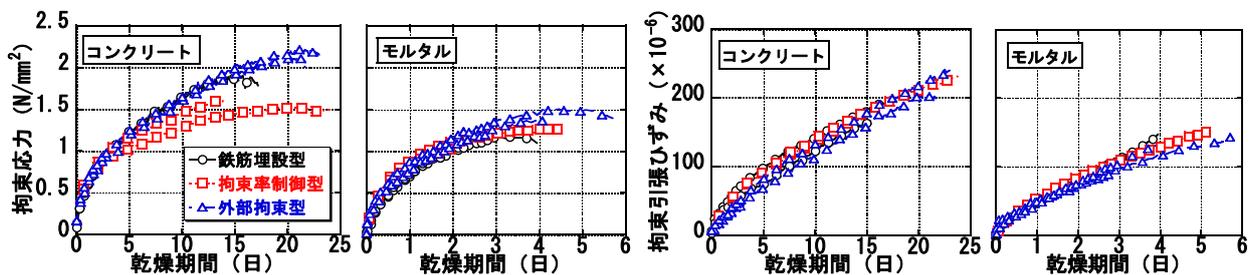


図-7 拘束応力と拘束引張ひずみの経時変化

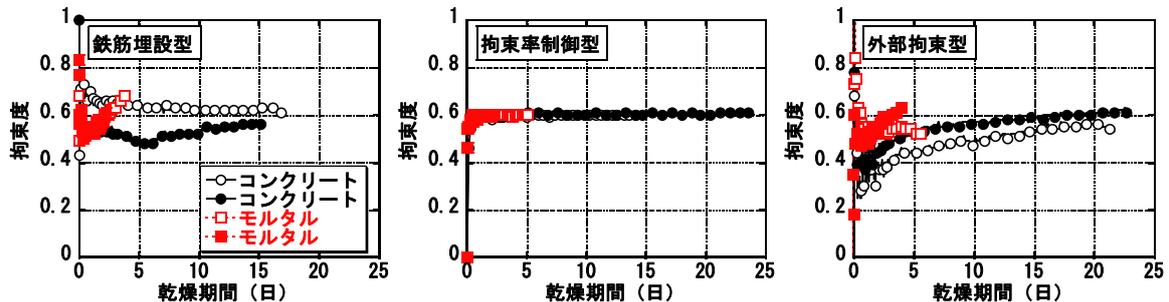


図-8 拘束度の経時変化

よる拘束鋼材のひずみの分布を考慮して、偏心距離 $e_x=0.2\text{cm}$, $e_y=0\text{cm}$ として式 (2) により算出した⁵⁾。

$$\sigma_c = -(E_s \times \varepsilon_s \times A_s) / A_c \quad (1)$$

$$\sigma_c = \frac{E_s \varepsilon_s}{\frac{1}{A_s} + \frac{e_x}{I_y} x + \frac{e_y}{I_x} y} \times \frac{1}{A_c} \quad (2)$$

ここに、 σ_c : コンクリートまたはモルタルの拘束応力 (N/mm²)

E_s : 鋼材の弾性係数 (N/mm²)

ε_s : 鋼材のひずみ

A_s : 鋼材の中央部断面積 (mm²)

A_c : コンクリートまたはモルタルの純断面積 (mm²)

I_x : x 軸まわりの断面 2 次モーメント (cm⁴)

e_x : x 方向の重心位置からの偏心距離 (cm)

I_y : y 軸まわりの断面 2 次モーメント (cm⁴)

e_y : y 方向の重心位置からの偏心距離 (cm)

ひび割れが発生するまでの拘束応力および拘束引張ひずみの経時変化を図-7 に示す。多少のばらつきはあるが、試験方法が異なってもほぼ同様な経時変化を示しており、モルタルおよびコンクリートともに試験方法の違いによる影響は少なく、ほぼ同程度の結果が得られることがわかる。また、コンクリート供試体の場合は、乾燥開始後 14~24 日程度で 1.5~2.1N/mm² 程度の応力に達してひび割れが発生しているのに対して、モルタル供試体では、乾燥開始後 6 日までに 1.0~1.5N/mm² 程度の応力に達してひび割れが発生している。モルタルとコンクリートでは拘束応力の経時変化に大差はないが、モルタルはひび割れが早く発生するためにひび割れ発生時の拘束応力が小さくなる。

拘束度の経時変化を図-8 に示す。拘束度は自由収縮ひずみに対する拘束引張ひずみの比である。拘束率制御型はコンクリートおよびモルタル供試体ともに拘束度は

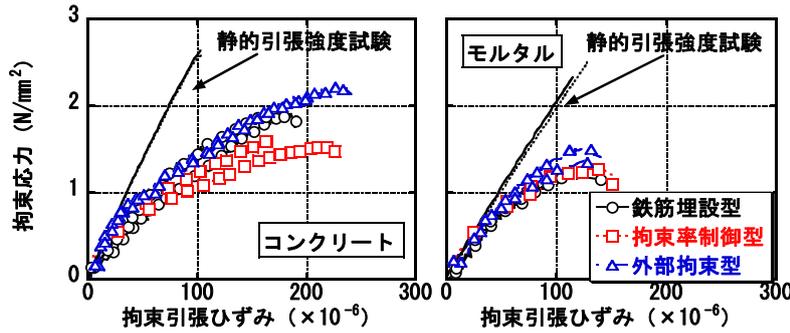


図-9 拘束応力と拘束引張ひずみの関係

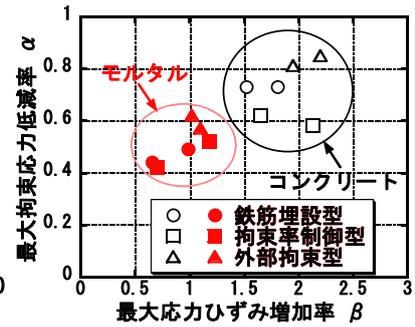


図-10 低減率 α と増加率 β の関係

60%でほぼ一定であるが、鉄筋埋設型と外部拘束型では乾燥開始後の数日間はばらつきが大きい。しかしながらその後安定し、拘束度は50~60%程度を示し、コンクリート供試体とモルタル供試体でも同程度である。

3.5 乾燥収縮ひび割れ発生条件

「拘束応力-拘束引張ひずみ」曲線を図-9に示す。図には静的引張試験における「応力-ひずみ」曲線も示している。乾燥収縮ひび割れ試験は非常にゆっくりとした荷重速度で引張った場合の引張試験とみなすことができ、応力またはひずみが限界点に達するとひび割れが発生する。拘束応力が上昇中にひび割れが発生している場合と、拘束応力が最大値に達した後の下降域でひび割れが発生している場合があるが、ひび割れの発生には最大拘束応力時における応力とひずみが重要であると考え、最大拘束応力を静的引張強度 (σ_0) に対する低減率 (α) として、また、最大応力ひずみを静的試験時における最大ひずみ (ϵ_0) に対する増加率 (β) として表し、ひび割れ発生限界点の指標とした⁷⁾。低減率 α と増加率 β の関係を図-10に示す。コンクリートの場合は α が 0.6~0.8、 β が 1.6~2.3 程度であるのに対して、モルタルの場合は α が 0.4~0.6、 β が 0.7~1.2 程度と小さくなる。

4. 収縮拘束応力の算定

4.1 算定方法

拘束ひび割れ供試体に生じる収縮拘束応力を式 (3) に示す有効ヤング係数法⁸⁾によって算出した。ここで、自由収縮ひずみおよび Total Creep クリープひずみは、式 (4) および (5) を用い、実験データを最小二乗法によって近似し係数を求めた。日本建築学会ではクリープひずみの予測式に対数関数を採用しているが、ここでは荷重初期の実験データとよく一致させるためにべき関数を採用した。

ヤング係数に関しては、材齢7日から乾燥開始したコンクリートの引張ヤング係数の経時変化は小さく、ほぼ一定である⁹⁾ことから、材齢7日の値を用いた。なお、拘束度は60%と一定とした。

表-6 近似式より求めた係数の一覧

	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5
コンクリート	1713	266.4	0.604	18.02	0.304
モルタル	2605	211.9	0.630	29.50	0.344

$$\sigma_{st} = \sum \frac{E(t')}{(1 + \phi(t, t'))} \lambda(t') \Delta \epsilon_f(t') \quad (3)$$

$$\phi(t, t') = C(t, t') \cdot E(t')$$

$$\epsilon_f(t, t_0) = K_1 \cdot \left(\frac{t - t_0}{K_2 + (t - t_0)} \right)^{K_3} \quad (4)$$

$$C(t, t_0) = K_4 \cdot (t - t_0)^{K_5} \cdot (t_0)^{-0.33} \quad (5)$$

ここに、 σ_{st} : 収縮拘束応力の計算値 (N/mm²)

$E(t)$: 材齢 t' におけるヤング係数 (N/mm²)

$\phi(t, t')$: 材齢 t' で荷重した材齢 t におけるクリープ係数

$\lambda(t')$: 荷重材齢 t' における拘束度

$\Delta \epsilon_f(t)$: 材齢 t における自由収縮ひずみ変化

t_0 : 乾燥開始材齢 (日)

$C(t, t_0)$: スペシフィッククリープひずみ ($\times 10^{-6}$ / (N/mm²))

K_1, K_2, K_3, K_4, K_5 : 近似式より求めた係数

4.2 算定結果

実験結果と算定結果の比較を図-11に示す。実験結果にひび割れ試験方法の違いによる差がみられなかったことから、ここでは一例として外部拘束型の結果を示している。また、表-6に式 (4) および (5) の係数の一覧を示す。Total Creep クリープひずみおよび自由収縮ひずみは精度良く近似できている。

拘束引張ひずみは、自由収縮ひずみに拘束度を乗じることにより得ることができるが、拘束度60%一定として算定した結果と実験結果を比較した場合、モルタルは良く一致し、コンクリートでは若干のズレがある。これは実際の拘束度にばらつきがあるためである。ここには示していないが、拘束率制御型の場合では、拘束度の変動が少ないため算定結果と実験結果は良く一致する。

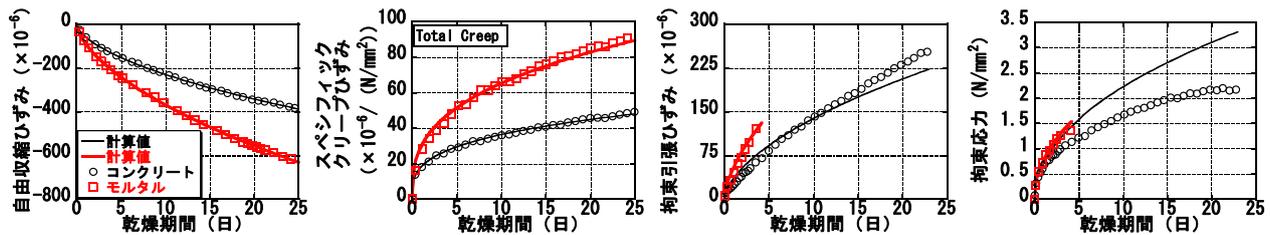


図-11 外部拘束型による実験結果と算定結果の比較

モルタルの拘束応力はコンクリートよりも若干大きくなるが、これは応力発生のもとになる拘束引張ひずみが大きく、モルタルにひび割れが発生した時点ではコンクリートの2倍程度になっているためである。しかしながら、拘束応力を緩和するクリープひずみもモルタルの方が大きいため、拘束応力に拘束引張ひずみほどの大きな差はない。拘束応力の算定結果はモルタルでは良く一致しており、コンクリートの算定結果は実験結果よりも若干大きくなっている。しかしながら、算定結果は実験結果をほぼ表すことができ、コンクリートの拘束応力を評価するに当たって、有効ヤング係数法の適用性が確認できた。

5. まとめ

本研究において、コンクリートとそれを構成するモルタルに関して同一寸法の供試体を用いて各種実験を行った結果、以下の知見が得られた。

- (1) モルタル供試体はひずみを拘束する粗骨材を含んでいないため、コンクリート供試体に比べて乾燥収縮ひずみおよびクリープひずみが大きくなる。
- (2) 乾燥収縮ひび割れ試験において、供試体の拘束度は拘束率制御型ではほぼ一定であるが、鉄筋埋設型および外部拘束型では拘束度にばらつきが生じる。しかしながら、ひび割れ発生までの期間、拘束応力、拘束引張ひずみの測定結果に試験方法の違いによる影響はあまりみられない。
- (3) 拘束応力の経時変化は、モルタル供試体とコンクリート供試体では大差がないが、モルタル供試体はひび割れが早く発生するため、ひび割れ発生時の拘束応力が小さくなる。また、ひび割れ発生限界点の指標となる最大拘束応力低減率 α および最大応力ひずみ増加率 β が小さい。
- (4) コンクリートおよびモルタル供試体に生じる収縮拘束応力を有効ヤング係数法によって算出した結果、実験結果をほぼ表せられることがわかった。

謝辞

本研究は、大分大学 VBL プロジェクト研究「研究課題：低炭素社会の実現を目指した汎用型長寿命コンクリートの製造技術の確立（平成 21～25 年度）、研究代表：大谷俊浩」の支援を受けて実施したものである。

参考文献

- 1) 蔣海燕ほか：フライアッシュがモルタル・コンクリートの乾燥収縮ひび割れ特性に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.205-210，2013.7
- 2) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の品質管理および維持管理のための試験方法，2007.3
- 3) 日本コンクリート工学会：混和材料から見た収縮ひび割れ低減と耐久性改善研究委員会報告，2010.9
- 4) 濱永康仁ほか：ひずみ制御機能を備えたコンクリートの収縮ひび割れ試験装置の開発，日本建築学会構造系論文集，第 616 号，pp.1-7，2007.6
- 5) 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.703-708，1997.6
- 6) 谷川恭雄，山田和夫：コンクリートの圧縮強度の寸法効果について，日本建築学会論文報告集，第 262 号，pp.13-21，1977.12
- 7) 佐藤嘉昭ほか：コンクリート部材の乾燥収縮ひび割れ発生条件に関する研究，日本建築学会構造系論文集，第 634 号，pp.2051-2060，2008.12
- 8) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針（案）・同解説，2006
- 9) 小池晶子ほか：収縮低減剤および収縮低減型高性能 AE 減水剤を用いたコンクリートの収縮ひび割れ低減効果（その 1 実験概要およびコンクリートの基礎力学的性質），日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1，pp.893-894，2010.9