

論文 実環境下における異なる体積表面積比部材の収縮挙動に関する実験的研究

石川 あゆこ*1・今本 啓一*2・清原 千鶴*3・金子 宝以*1

要旨: 実環境下におけるコンクリートの収縮は、降雨の影響を強く受け、実験室とは異なる収縮挙動をするため、収縮ひずみを定量的に予測、評価することは難しい。本研究では、体積表面積比が異なるコンクリート試験体を作製し、収縮ひずみを測定した。その結果、体積表面積比が小さい試験体ほど降雨の影響を強く受け、収縮が抑制されることが分かった。収縮ひずみの予測式を実環境下の収縮ひずみ結果に合わせて簡易的な体積表面積比の補正式をつくり、有効ヤング係数法により、小型試験体の実験結果から実大壁レベルの収縮拘束応力を算出することができた。

キーワード: 収縮ひずみ, 体積表面積比, 有効ヤング係数法, 収縮拘束応力

1. はじめに

コンクリートの収縮ひび割れは鉄筋コンクリート構造物の耐久性や美観、漏水抵抗性に大きな影響を及ぼす要因のひとつであり、近年、コンクリートの収縮ひび割れ制御への関心が高まる中、その低減対策が進められている。したがって、コンクリートの収縮を適切に把握することは収縮ひび割れを制御するにあたり要諦をなす。

コンクリートの収縮については、小型試験体を用いて室内にて測定を行った研究成果は数多くあるが、実環境下における収縮測定はあまり多くない。しかしながら、実構造物のコンクリートのひずみ挙動には、周囲の温度や相対湿度、降雨などの環境条件が複合して作用している。特に降雨に影響されることが報告されており、室内実験で計測される収縮とは異なり、実環境下における収縮ひずみを定量的に予測、評価することは難しい。

そこで、本研究では、恒温恒湿室(20℃, 60%RH)および実環境下の2つの環境条件において収縮ひずみを測定し、これらのひずみ挙動について検討を行った。また、体積表面積比 V/S (V : 体積, S : 表面積)が異なる試験体を作製し、実環境下で体積表面積比 V/S の違いがひずみ挙動に及ぼす影響について既存の乾燥収縮予測式と比較検討を行った。さらに、これらの検討結果を踏まえて、実環境下におかれた自由収縮ひずみを用いてコンクリート壁体の収縮応力を簡易的な解析法である有効ヤング係数法を用いて算出を行ない、実構造物レベルの応力

シミュレーションが可能であるか検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および調合

表-1 および表-2 に使用材料および調合を示す。検討に用いたコンクリートは、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリート(以下, N), 高炉セメント B 種コンクリート(以下, BB), 高炉セメント軽量コンクリート(以下, BBL)の3種類であり、すべて調合管理強度 21N/mm^2 となるようにあらかじめ試し練りを行い、調合を決定した。N および BB についてはプラントにて実機練りを行い、BBL については実験室にて強制2軸ミキサを用いて練り混ぜを行った。すべてのコンクリートはスランプ $18 \pm 2.5\text{cm}$, 空気量 $4.5 \pm 1.5\%$ を目標とした。

表-1 使用材料

水	W	水道水
セメント	C	普通ポルトランドセメント(密度 3.15g/cm^3)
	BB	高炉セメント B 種(密度 2.91g/cm^3)
細骨材	S1	砕砂(表乾密度 2.58g/cm^3 , 吸水率 2.87%)
	S2	石灰砕砂(表乾密度 2.67g/cm^3 , 吸水率 0.89%)
	S3	山砂(表乾密度 2.60g/cm^3 , 吸水率 1.23%)
	S4	人工軽量細骨材(表乾密度 1.84g/cm^3 , 吸水率 15.5%)
粗骨材	G1	碎石(表乾密度 2.61g/cm^3 , 吸水率 2.76%)
	G2	石灰碎石(表乾密度 2.69g/cm^3 , 吸水率 0.65%)
	G3	人工軽量粗骨材(表乾密度 1.67g/cm^3 , 吸水率 29.5%)
混和剤	AE 減水剤, 空気量調整剤	

表-2 調合表

	W/B (%)	s/a (%)	単位質量(kg/m^3)										AE 減水剤 (Cx%)	空気量調整剤 (Cx%)	スランプ (cm)	空気量 (%)
			W	C	BB	S1	S2	S3	S4	G1	G2	G3				
N	61	48.4	182	298	-	427	171	255	-	459	471	-	1.1	-	18	5.3
BB	61.5	48.3	181	-	294	425	171	255	-	459	471	-	1.1	-	18	5.2
BBL	61.5	48.3	166	-	270	-	181	265	313	-	488	235	1.1	0.007	20.5	4.3

*1 東京理科大学大学院 工学研究科 建築学専攻 (学生会員)

*2 東京理科大学 工学部 建築学科 教授 博士(工学) (正会員)

*3 東京理科大学 工学部 建築学科 嘱託補手 博士(工学) (正会員)

2.2 室内試験

(1) 圧縮強度試験

JIS A 1108 に準拠して圧縮強度試験を行なった。Φ100×200mm の円柱試験体を材齢 1 日に脱型し、材齢 28 日まで水中養生したときの圧縮強度を求めた。

(2) 引張クリープ試験

N について、ひずみおよび応力を一定に制御可能な一軸拘束試験機を用いて引張クリープ試験を行った。試験体は 100×100×1000mm の角柱試験体を用い、載荷荷重は、載荷時材齢の割裂引張強度の 30% とした。載荷開始材齢は 7 日とし、試験体の端面と打設面および底面をアルミ箔テープでシールし 2 面乾燥状態で、以後は恒温恒湿室内にて気中養生した。

(3) 一軸拘束ひび割れ試験

N について、上述の一軸拘束試験機を用いて拘束ひび割れ試験を実施した。本装置は拘束度を 0~100% の範囲で継続して制御が可能で、ロードセルにより直接試験体の引張荷重を測定できる。ここでは、拘束度を 0.6 とした。材齢 7 日に脱型後、試験を開始し、2 面乾燥状態で測定を行なった。拘束度の定義を式(1)に示す。

$$\text{拘束度} = \frac{\text{自由収縮ひずみ} - \text{実ひずみ}}{\text{自由収縮ひずみ}} \quad (1)$$

(4) 鉄筋拘束ひび割れ試験

すべてのコンクリートについて、日本コンクリート工学会にて提案されているコンクリートの収縮ひび割れ評価試験方法に準拠して行なった。試験体概要を図-1 に示す。試験は上述の一軸拘束ひび割れ試験と同様に材齢 7 日より開始し、2 面乾燥状態で測定を行った。

2.3 収縮ひずみの測定

コンクリート試験体に埋込み型ひずみゲージ計を試験体中心部に設置することにより、コンクリートのひずみおよび温度を計測した。打設は 2014 年 11 月上旬に行い、材齢 7 日に脱型した。以後は非乾燥面をアルミ箔テープでシールした。2 面乾燥状態とし、恒温恒湿室および降雨・日射を受ける実環境下に静置した。

表-3 に試験体概要を示す。環境条件の違いが収縮に及ぼす影響を検討するため、100×100×400mm の無筋の角柱試験体を恒温恒湿室(No.1)および実環境下(No.2)に静置し、収縮ひずみを測定した。写真-1 に暴露状況を示す。上記 100×100×40mm の試験体は実構造物の壁部材と比べて非常に小さい。できるだけ実構造物のひずみ挙動に近い状態で計測するため、900×1200×200mm の有筋の試験体 No.3 を作製し、実環境下において収縮ひずみを測定した。暴露状況を写真-2 に、試験体概要を図-2 に示す。日本建築学会にて提案されている収縮ひずみの予測式²⁾には、収縮ひずみと体積表面積比 V/S の関係が示されているが、これは温度 20℃、相対湿度 60% という条件

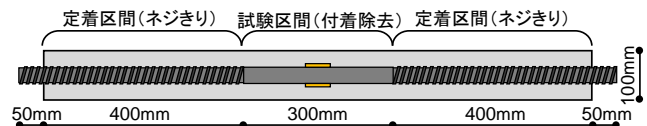


図-1 鉄筋拘束ひび割れ試験体概要

表-3 収縮ひずみ試験体概要

記号	試験体寸法 (mm)	配筋	V/S (mm)	環境条件	種類
No.1	100×100×400	なし	50	恒温恒湿室	N/BB/BBL
No.2	100×100×400	なし	50	実環境	N/BB/BBL
No.3	900×1200×200	あり	100	実環境	N/BB/BBL
No.4	900×1200×100	なし	50	実環境	BB
No.5	900×1200×200	なし	100	実環境	BB
No.6	900×1200×400	なし	200	実環境	BB



写真-1 No.2 暴露状況



写真-2 No.3 暴露状況

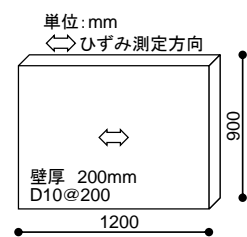


図-2 No.3 試験体概要

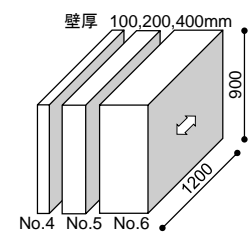


図-3 No.4,5,6 試験体概要

における収縮ひずみであり、実環境下では異なると考えられることから体積表面積比 V/S を 50, 100, 200mm と変化させた 3 つの試験体を作製し、収縮ひずみを測定した(No.4, 5, 6)。試験体寸法はそれぞれ 900×1200×100・200・400mm の無筋の試験体であり、図-3 に試験体概要を示す。上記 No.3 と収縮ひずみを比較することで、配筋の有無による影響について検討を行った。

3. 結果および考察

3.1 室内実験結果

(1) 圧縮強度

材齢 28 日の圧縮強度試験結果から CEB-FIP Model Code1990 による予測式(式(2))を基に、圧縮強度の経時変化を予測した。予測結果を図-4 に示す。

$$f_c(t) = \exp \left\{ s \left[1 - \left(\frac{28}{t} \right)^{1/2} \right] \right\} f_{c28} \quad (2)$$

ここに、

$f_c(t)$: コンクリートの圧縮強度 (N/mm²)

s : セメントに関わる定数

t : コンクリートの材齢 (日)

f_{c28} : コンクリートの 28 日強度 (N/mm²)

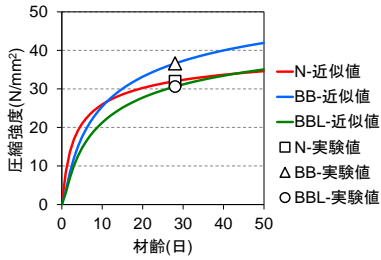


図-4 圧縮強度の変化

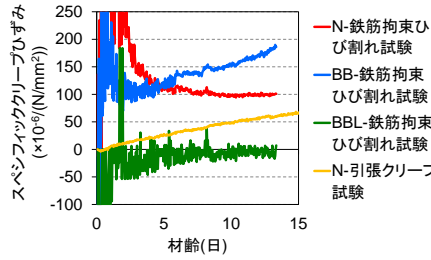


図-5 鉄筋拘束ひび割れ試験引張クリープ試験

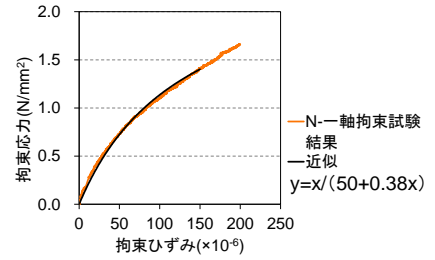


図-6 一軸拘束試験結果

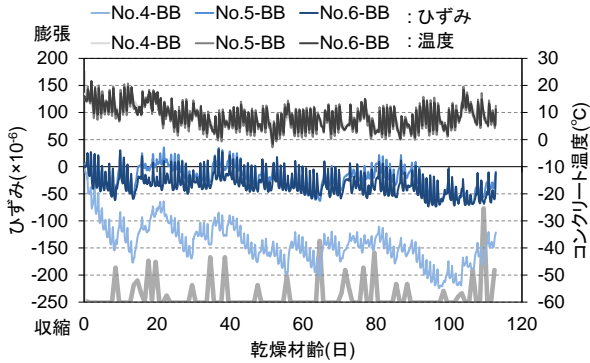


図-7 No.4,5,6-BB のひずみ変化

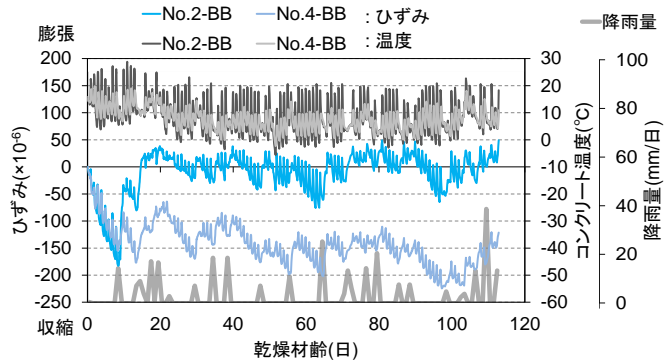


図-8 No.2,4-BB のひずみ変化

(2) クリープ

図-5 に鉄筋拘束ひび割れ試験および引張クリープ試験より得られたスペシフィッククリープひずみを示す。引張クリープひずみは、式(3)に示すように拘束ひずみから弾性ひずみを差し引いた値として求め、コンクリートに生じている拘束応力で除した値をスペシフィッククリープとした。

$$\epsilon_c = \epsilon_r - \epsilon_e \quad (3)$$

ここに、

- ϵ_c : クリープひずみ
- ϵ_r : 拘束ひずみ
- ϵ_e : 弾性ひずみ
- $(\epsilon_r = \epsilon_f - \epsilon_a)$
- ϵ_f : 自由収縮ひずみ
- ϵ_a : 実ひずみ

これによると、鉄筋拘束ひび割れ試験で求めたスペシフィッククリープひずみは BBL < N < BB の順で大きく、鉄筋拘束ひび割れ試験の値は引張クリープ試験の値よりも大きくなった。

(3) 乾燥収縮ひび割れ試験

図-6 に一軸拘束試験より得られた拘束応力-拘束ひずみ曲線を示す。曲線の切れたところでひび割れが発生しており、拘束度 0.6 において材齢 38 日でひび割れが発生した。

3.2 収縮ひずみ

収縮ひずみは型枠脱型時を原点とした。降雨量については気象庁の神奈川県辻堂の観測データ³⁾を参考にした。乾燥期間中の平均気温および平均湿度は、それぞれ 9.7°C、61.5%であった。

(1) 体積表面積比による影響

図-7 に No.4-BB、No.5-BB および No.6-BB の収縮ひずみおよびコンクリート温度を示す。コンクリート温度について、体積表面積比の違いによらずほぼ同程度の挙動を示しているが、一日の温度の振幅の大きさは No.6 < No.5 < No.4 の順に大きく、体積表面積比 V/S が小さいほど温度の変動が大きい。ひずみ挙動について、No.4-BB は降雨の影響が大きく、No.5-BB および No.6-BB は影響が小さかった。しかし、No.4-BB も、材齢が経つにつれて内部組織が緻密化することで、乾燥材齢初期と同量の降雨を受けても膨張方向への転換の幅が小さくなっていることが分かる。また、既往の研究⁴⁾では、コンクリートの含水率は、暴露面から 50mm の深さの測定箇所では降雨の影響はあまりないとされているが、本実験では壁厚 100mm の中心部にひずみゲージ計を埋め込んでいる No.4-BB においても、降雨の影響を受けるということが分かった。また、No.5-BB と No.6-BB の収縮挙動の差はほぼ見られなかったため、ひずみの測定箇所が乾燥面から 100mm 以降の深さでは、降雨の影響の度合いは同程度であると考えられる。

(2) 試験体寸法による影響

図-8 に No.2-BB および No.4-BB の収縮ひずみを示す。コンクリート温度について、同じ体積表面積比 V/S であっても、試験体断面が小さい No.2-BB がより温度の変動が大きいことが分かる。ひずみ挙動について、乾燥開始時から最初の降雨がある乾燥材齢 8.3 日までは寸法の違

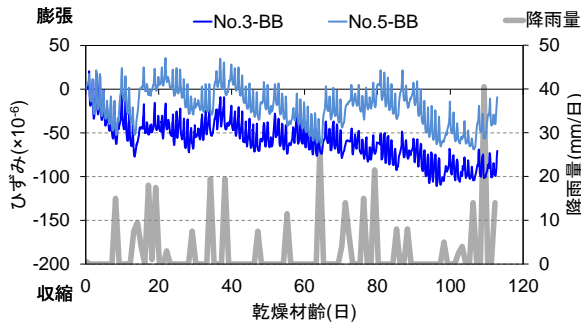


図-9 No.3,5-BB のひずみ変化

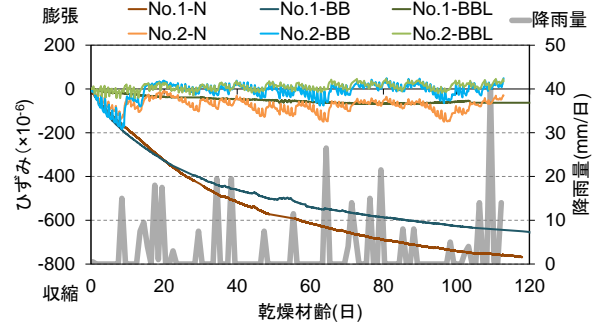


図-10 No.1,2-N,BB,BBL のひずみ変化

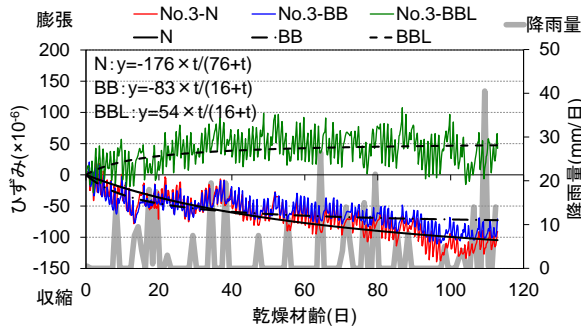


図-11 No.3-N,BB,BBL のひずみ変化

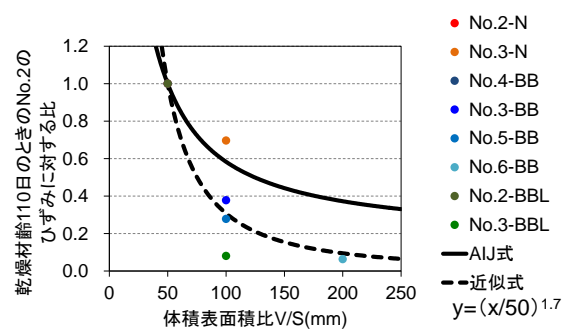


図-12 AIJ 予測式との比較

いによらず同程度の収縮挙動を示しているが、降雨時には No.4-BB と比べ試験体寸法が小さい No.2-BB がより降雨の影響を受け、大きく膨張方向に進行している。また、降雨の影響をより受けるため、膨張方向への転換幅も大きい。

温度およびひずみ変化から、同等の堆積表面積比 V/S であっても、試験体寸法の小さいものがより外気温の変動や降雨による影響が顕著であることが分かった。

(3) 配筋の有無による影響

図-9 に No.3-BB および No.5-BB の収縮ひずみを示す。有筋である No.3-BB は無筋である No.5-BB と比べて降雨の影響が小さい。このことから、実環境下において、鉄筋の内部拘束は収縮の進行を抑制するよりも、降雨によるひずみの変化を抑制する効果が相対的に大きいことが分かった。

(4) 環境条件および体積表面積比による各種コンクリートへの影響

図-10 に No.1-N, BB, BBL および No.2-N, BB, BBL の収縮ひずみを示す。No.1-N, BB, BBL のひずみについて、乾燥材齢 110 日において、N は 756×10^{-6} 、BB は 630×10^{-6} 、BBL は 63×10^{-6} 収縮している。No.2-N, BB, BBL のひずみについては、乾燥開始時から最初の降雨がある乾燥材齢 8.3 日までは、N, BB, BBL それぞれ、一日の温度変化による振幅はあるものの、No.1 と似た挙動をしている。N および BB は最初の降雨後、雨水の浸透の影響を受けて膨張方向に大きく進行し、その後も降雨の度

に収縮方向から膨張方向へ転換し、乾燥材齢 110 日において、N は 112×10^{-6} 収縮、BB は 38×10^{-6} 膨張している結果となった。一方で、BBL は No.1-BBL の結果のとおり、収縮自体が小さいため、降雨による膨張方向への転換は相対的には大きくないものの、降雨によって収縮が抑制され、乾燥材齢 110 日において 41×10^{-6} 膨張している。No.1 と No.2 との収縮量の差を比較すると、N は 644×10^{-6} 程度、BB は 668×10^{-6} 程度、BBL は 22×10^{-6} 程度であり、恒温恒湿室での収縮ひずみが大きいものほど降雨の影響を強く受けることが分かった。

図-11 に No.3-N, BB, BBL のひずみの経時変化を示す。No.2 においては降雨の影響が見られたものの、体積表面積比 V/S が大きい No.3 においてはあまり見られなかった。乾燥材齢 110 日において、N は 78×10^{-6} 、BB は 68×10^{-6} 収縮しており、BBL は 3.3×10^{-6} 膨張している。

以上のことから、挙動や収縮量の差異はあるものの、環境条件および V/S が異なっても、乾燥材齢 110 日における収縮ひずみは $BBL < BB < N$ であった。

(5) 既往の予測式との比較

図-12 に最終計測時点である乾燥材齢 110 日ときの No.2 の収縮ひずみを 1 とした場合のそれぞれの試験体の収縮ひずみの比率を示す。これを近似すると、日本建築学会による収縮ひずみの予測式と比べ、実環境下の収縮ひずみは若干小さくなり、実環境下での体積表面積比の影響は、室内実験よりも大きいことが考えられる。

4. 有効ヤング係数法による収縮応力の算定

4.1 壁試験体概要

普通コンクリート(使用材料および調査は表-1 および表-2 の N)を使用した壁試験体(図-13)を作製し、埋込み型ひずみゲージ計により、部材中心部の収縮ひずみを測定した。打設は2回に分けて行い、下梁打設後12日後に上部部材(柱、壁および上梁)を打設し、型枠脱型日は下梁を材齢4日、上部部材を材齢7日とした。また、下梁、壁および上梁と同一断面形状のダミー試験体(図-14 右、壁ダミー試験体: No.3)を作製し、同様に収縮ひずみを測定した。ダミー試験体の打設および型枠脱型日はそれぞれの部材が打設、脱型される時期とし、非乾燥面はアルミ箔テープでシールした。

4.2 収縮応力の算定

壁試験体に生じる収縮応力の算出には、有効ヤング係数法²⁾(式(4))を用いた。

$$\sigma(t_i) = \sum_{j=1}^i \frac{E(t_j)}{1 + \varphi(t_i, t_j)} \lambda(t_j) \Delta \varepsilon_f(t_j) \quad (4)$$

$$\lambda(t_j) = \frac{2S'(t_{j,t_j}) + S''(t_{j+d,t_{j+d}})}{S(t_{j,t_j}) \{ S'(t_{j,t_j}) + S''(t_{j+d,t_{j+d}}) \} + 4S'(t_{j,t_j}) \cdot S''(t_{j+d,t_{j+d}})} \quad (5)$$

ここに、

- $\sigma(t_i)$: 材齢 t_i における収縮応力の予測値 (N/mm²)
- $E(t_i)$: 材齢 t_i におけるヤング係数 (N/mm²)
- $\varphi(t_i, t_j)$: 材齢 t_j で荷重した材齢 t_i におけるクリープ係数
- $\lambda(t_j)$: 荷重材齢 t_j における拘束度
- $\Delta \varepsilon_f(t_j)$: 材齢 t_j における自由ひずみ変化
- $S(t_j, t_j) = A \cdot E_e(t_j, t_j)$: 壁部材の断面剛性
- $S'(t_j, t_j), S''(t_{j+d}, t_{j+d})$: 上下梁部材の断面剛性
- d : 下梁と上梁壁打設の時間差

なお、本解析では、温度による影響は考慮していない。上記の適用にあたって、以下のように算出した。

①ヤング係数は図-5の圧縮強度の変化から、日本建築学会による予測式(式(6))を基にヤング係数の経時変化を予測した。

$$E(t) = 3.35 \times 10^4 \times k_1 \times k_2 \left(\frac{\gamma}{2.4} \right) \left(\frac{f_c(t)}{60} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (6)$$

ここに、

- $E(t)$: コンクリートのヤング係数 (kN/mm²)
- t : コンクリートの材齢 (日)
- k_1, k_2 : 骨材, 混和材による係数
- γ : コンクリートの気乾単位容積質量 (t/m³)
- $f_c(t)$: コンクリートの圧縮強度 (N/mm²)

②壁部材の自由収縮ひずみは、各コンクリートの実環境下における壁ダミー試験体のひずみ変化を近似したものを用いた(図-12)。下梁および上梁の収縮ひずみは図-13の近似曲線に示す実環境下における体積表面積

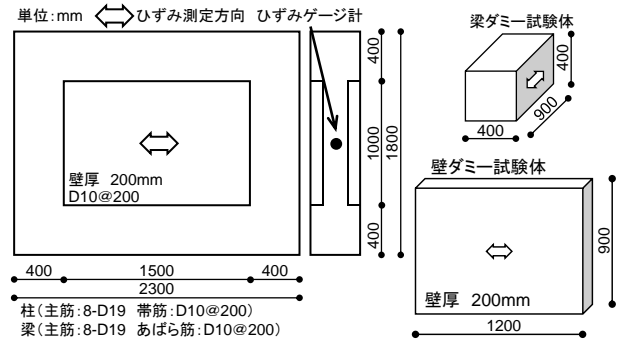


図-13 壁試験体・ダミー試験体概要

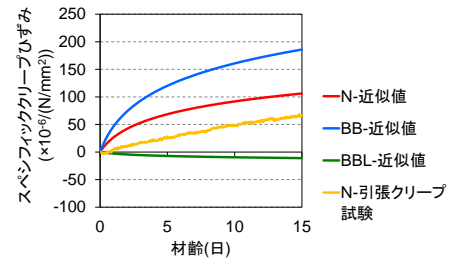


図-14 スペシフィッククリープひずみ

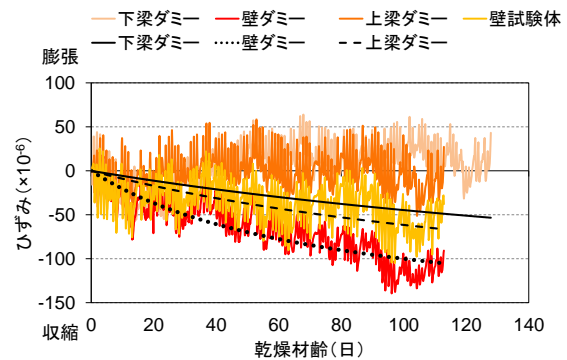


図-15 壁試験体・ダミー試験体のひずみ変化

比 V/S と収縮ひずみの関係を基に、壁ダミー試験体のひずみの近似式に体積表面積比 V/S を考慮したものを用いた。

③クリープについて、Nは引張クリープ試験結果を用いた。BBおよびBBLは鉄筋拘束ひび割れ試験より得たスペシフィッククリープひずみを日本建築学会による式(式(7))で近似し、それを基に、Nに対するBBおよびBBLの比率を求め、その比率をNの引張クリープより得たスペシフィッククリープひずみに乗じることで、BBおよびBBLのクリープを予測した(図-14)。

$$C(t, t') = CR \cdot \log(t - t' + 1) \quad (7)$$

ここに、

- $C(t, t')$: スペシフィッククリープひずみ ($\times 10^{-6} / (\text{N/mm}^2)$)
- CR : 回帰分析により定まる係数 ($\times 10^{-6} / (\text{N/mm}^2)$)
- t : 材齢 (日)
- t' : 荷重開始材齢 (日)

図-15 に壁試験体、壁ダミー試験体(No.3-N)および上下梁ダミー試験体のひずみ挙動を示す。壁試験体および壁ダミー試験体のひずみ挙動について、上下梁ダミー試験体は試験体寸法や体積表面積比 V/S がほぼ同じであるため、収縮ひずみも似た挙動を示している。一方、壁ダミー試験体は体積表面積比 V/S が小さいため上下梁ダミー試験体と比べ収縮ひずみが大きい。また、壁試験体は柱および上下梁から拘束されるため、壁ダミー試験体と同様の挙動を示しているが、収縮ひずみは小さい。

図-15 には前項②より予測した上下梁ダミー試験体の近似曲線も併せて載せている。壁ダミー試験体から上下梁ダミー試験体のひずみは精度良く近似できなかった。降雨の影響により収縮が抑制された結果を図-12 に考慮することができなかったことが理由として考えられる。

図-16 に有効ヤング係数法によって算出した収縮応力と一軸拘束試験結果より得られた有効ヤング係数を用いて式(8)より算出した拘束応力を示す。

$$\text{収縮拘束応力} = \text{有効ヤング係数} \times (\text{壁ダミー試験体のひずみ} - \text{壁試験体のひずみ}) \quad (8)$$

式(4)より算出した N の収縮拘束応力について、概ね傾向を捉えることができおり、実環境下において測定した収縮ひずみおよび室内実験結果を用いて有効ヤング係数法による実大壁レベルの収縮拘束応力の算出をすることができた。BB および BBL についても同様の方法で算出できると考えられるが、BB については図-16 より、応力が徐々に低下している。より精度の高い収縮拘束応力の算出には、クリープの評価および壁ダミー試験体の収縮ひずみの近似が必要と考えられ、ひずみが進展した以降に検討したい。

5. まとめ

実環境下におけるコンクリート試験体の収縮ひずみを測定し、そのひずみ挙動について検討を行い、壁試験体に生じる収縮拘束応力を有効ヤング係数法により算出した。以下に本研究で得られた知見を示す。

- 1) 体積表面積比が小さいほど降雨の影響を受けやすいため降雨時には大きく膨張し、降雨後の収縮との振幅が大きい。
- 2) 普通コンクリート、高炉セメント B 種コンクリートおよび高炉セメント軽量コンクリートの恒温恒湿室における収縮ひずみの差と比べ、実環境下における収縮ひずみの差は小さくなる。

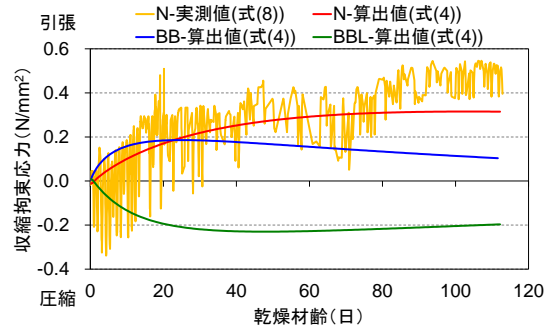


図-16 壁試験体・壁中心部の応力

- 3) 恒温恒湿室での収縮ひずみが小さい高炉セメント軽量コンクリートは降雨の影響が小さく、また、実環境下においても収縮量は小さかった。
- 4) 実環境下における収縮ひずみを有効ヤング係数法に用いることで、小型試験体から実大壁レベルの収縮拘束応力を算出することができた。
- 5) 実環境下における収縮ひずみに及ぼす体積表面積比の影響は、室内実験を主として構築された日本建築学会の収縮ひずみの予測式におけるものよりも大きいことが示された。引き続きデータの収集を行い、検討を進めたい。

謝辞

本研究を実施するにあたり(株)八洋コンサルタントの田中章夫氏および関係諸氏ならびに東京理科大学卒業生：谷内知輝君、割野拓己君に多大なるご助力を賜りましたことをここに付して謝意を表します。

参考文献

- 1) 浅本晋吾, 大塚歩, 三浦千佳子, 桑原勇太: 実環境下におけるコンクリートの収縮, 収縮ひび割れ挙動に関する検討, コンクリート工学論文集, Vol.21, No.2, pp.35-43, 2010.5
- 2) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート増建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針(案)・同解説
- 3) 国土交通省気象庁 HP: <http://www.jma.go.jp/jma/index.html>, 気象観測データ
- 4) 古賀裕久, 渡辺博志: 屋外に暴露されたコンクリートの含水率モニタリング結果, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, 2006