

論文 乾燥に伴う内部ひび割れがコンクリートの乾燥収縮ひずみおよび力学的性質に及ぼす影響

樋口 優香^{*1}・寺西 浩司^{*2}

要旨: 本研究では、骨材寸法やコンクリート部材の拘束・持続荷重状態を変化させて、日常環境下での乾燥に伴いコンクリート内部に発生するひび割れがコンクリートの乾燥収縮ひずみおよび力学的性質に及ぼす影響について検討した。その結果、以下の知見が得られた。1) 寸法の大きな単一粒度骨材を用いたコンクリートでは、乾燥により、コンクリート内部に微細ひび割れが発生し、そのことに起因して、乾燥収縮ひずみが小さく測定される。また、ヤング係数が大幅に低下する。2) 拘束・持続荷重状態がコンクリートの乾燥に伴うヤング係数の低下度合いに及ぼす影響は小さい。

キーワード: 内部ひび割れ, 乾燥収縮ひずみ, ヤング係数, 圧縮強度, 骨材寸法, 持続荷重

1. はじめに

筆者らは、既報¹⁾において、単一粒度骨材を用いた場合に、骨材量が同一であっても、骨材寸法が大きいほど、コンクリートの乾燥収縮ひずみが小さくなることを報告した。このことは、RC 構造物の乾燥収縮ひび割れ抑制という観点からは、骨材寸法の増大がよい効果をもたらすことを意味している。しかし、一方で、既往の研究^{2)~4)}により、コンクリートの内部に、乾燥に伴って微細なひび割れが発生することが明らかにされている。その場合、コンクリートの乾燥収縮ひずみは、篠野ら⁵⁾も指摘しているように、内部ひび割れに相当する膨張ひずみの分だけ、ポテンシャルとしての乾燥収縮ひずみよりも小さく測定されるものと考えられる。そして、このことが、骨材寸法とコンクリートの乾燥収縮ひずみの関係に影響を与えている可能性がある。

また、微細ひび割れの発生は、コンクリートの力学的性質の低下につながる事が懸念される。この点に関しては、これまでに、コンクリートの割裂引張強度に対する内部ひび割れの影響を検討した事例⁶⁾が報告されているが、圧縮強度やヤング係数などに対する影響に関しては、未だ十分には解明されていない。

以上のような背景を踏まえ、本研究では、まず、実験1において、コンクリートの骨材寸法を変化させ、日常環境下での乾燥に伴う内部ひび割れの発生状況と、乾燥収縮ひずみおよび力学的性質に対するその影響について検討した。次に、実験2において、コンクリート部材の乾燥収縮を外部から拘束した場合と、コンクリート部材に対して持続荷重を作用させた場合に対して、実験1と同様の検討を行った。そして、これらの実験結果を基に、骨材寸法が大きいほど乾燥収縮ひずみが小さくなること

と、乾燥に伴いコンクリート内部に微細なひび割れが発生することを関連付けて説明できるかを検討した。また、コンクリートのヤング係数などの力学的性質が乾燥により低下する現象と内部ひび割れの発生状況の関係性について考察した。

2. 骨材寸法の影響を調べるための実験 (実験1)

2.1 実験概要

実験1では、既報¹⁾で報告した乾燥収縮試験の供試体を用いて、さらに追加的な実験を行った。また、既報¹⁾の実験と同時に行った圧縮試験の結果も本報で報告する。

(1) 実験ケース

表-1に実験ケースを示す。本実験では、骨材は、同一工場から入手した砕砂・砕石を表中に示す粒度にふるい分けた4種類の単一粒度骨材と、通常のコンクリートに使用されるような連続粒度骨材(細骨材率50%)の計5種類とした。また、骨材体積比 V_a (コンクリート中に占める骨材の体積比率) を2水準に変化させた。

(2) 調査

表-1 実験ケース

実験ケース	骨材体積比 (%)	骨材種別	骨材寸法 (mm)
30S-20	30	単一粒度(S)	10~20
30S-2.5			1.2~2.5
30S-0.3			0.15~0.3
30S-0.075			0.075 以下
30C		連続粒度(C)	0~20
55S-20	55	単一粒度(S)	10~20
55S-2.5			1.2~2.5
55S-0.3			0.15~0.3
55C			0~20
		連続粒度(C)	0~20

*1 前田建設工業(株) 技術研究所 修士(工学) (正会員)

*2 名城大学 理工学部建築学科教授 博士(工学) (正会員)

表-2 調合

骨材 体積比 (%)	水セメ ント比 (%)	空気 量 (%)	単位 水量 (kg/m ³)	絶対容積 (l/m ³)		増粘 剤 (C×%)	消泡 剤 (C×%)
				セメ ント	骨材		
30	50	0	429	271	300	0.3	0.005
55			276	174	550		

・セメント：普通ポルトランドセメント（密度 3.16g/cm³）
 ・骨材：硬質砂岩砕砂（表乾密度 2.60 g/cm³，吸水率 1.72%），
 硬質砂岩砕石 2005（表乾密度 2.65 g/cm³，吸水率 0.56%）

表-3 圧縮試験のケース

記号	供試体 形状	養生方法	試験材齢 (週)
W4W	円柱	標準水中	4
A27W		気中* ²	27
A65W	角柱* ¹	気中* ²	60~65

*¹ 乾燥収縮試験終了後の供試体から切り出したもの

*² 材齢 1W まで標準水中→気中（20℃，60%RH）

表-2 にコンクリートの調合を示す。セメントペースト成分を同一とし、骨材体積比を所定値とした調合に対して、骨材を変化させた。

(3) 試験項目および試験方法

(a) 乾燥収縮試験

供試体は 10×10×40cm とし、材齢 1 週まで標準水中養生を行った後に、温度 20℃，相対湿度 60% の乾燥環境下で、JIS A 1129-3 に準拠し、乾燥収縮ひずみおよび質量減少率を測定した。乾燥期間 26 週までの測定結果については既報¹⁾で既に報告した。本報では、60~65 週の乾燥期間内（以下、便宜上 65 週と記す）に測定した結果を報告する。なお、長期材齢では、測定結果に対する測定時期の影響は小さいと考えられるため、本研究では、これらを、同一時期における測定結果であると見なした。

(b) 圧縮試験

表-3 に圧縮試験のケースを示す。乾燥収縮試験が終了した供試体から図-1 に示すように切り出した角柱供試体（10×10×20cm），およびそれとは別に用意した円柱供試体（φ10×20cm）に対し、JIS A 1108 および JIS A 1149 に準拠し、圧縮強度およびヤング係数試験を行った。

(c) 内部ひび割れ観察

S-20，S-2.5 および C では、乾燥収縮試験が終了した供試体から図-1 に示すように内部ひび割れ観察用供試体を切り出し、その切断面のひび割れ部分に蛍光エポキシ樹脂を真空脱泡注入²⁾した。その後、紫外線を照射した状態でカメラ撮影し、微細ひび割れの可視画像を取得した。そして、コンクリート内部のひび割れがどのようなパターンで生じているかを調べた。

2.2 実験結果とその考察

(1) 内部ひび割れの観察結果

図-2 に内部ひび割れの観察結果の一例を示す（Va=30%のケース）。S-2.5 および C では、内部ひび割

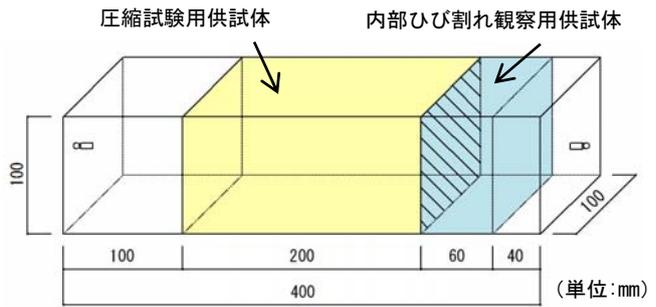
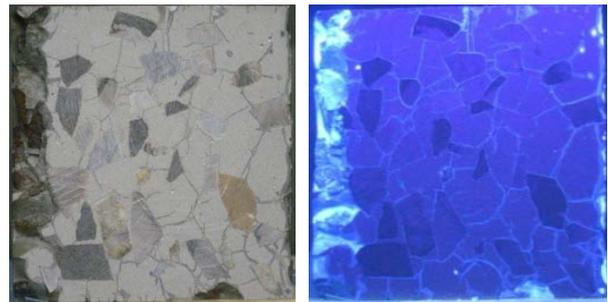
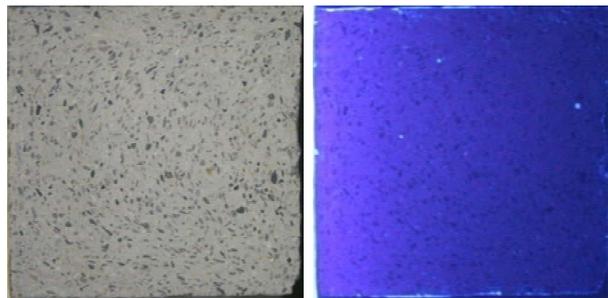


図-1 供試体の切り出し方法



(1) 可視光 (2) 紫外線照射
(a) 30S-20



(1) 可視光 (2) 紫外線照射
(b) 30S-2.5

図-2 内部ひび割れの観察結果

れはほとんど見られなかった。一方、S-20 では、ペースト部分に肉眼で確認できるほどの内部ひび割れが発生していた。また、ひび割れのパターンとしては、篠野らの実験結果⁵⁾と同様に、骨材から放射状に生じたものと、骨材界面に生じたものの 2 種類が確認された。

(2) 乾燥収縮ひずみおよび質量減少率

図-3 に、乾燥収縮ひずみと質量減少率の関係を示す（乾燥期間 65 週）。ここで、図中の回帰直線は、S-20 および S-0.075 を除いたデータに対して描いたものである。同図によると、S-20 では、プロットが回帰直線から外れた位置にあり、水分逸散量に相当するほどの乾燥収縮ひずみは生じていないといえる。また、このことと前項の結果を照らし合わせると、寸法の大きな単粒度骨材を用いた場合には、内部ひび割れに相当する見掛けの膨張ひずみの分だけ、乾燥収縮ひずみが小さく測定されるものと考えられることができる。

(3) 圧縮強度およびヤング係数

図-4 に、圧縮強度と骨材寸法の関係を示す。同図に

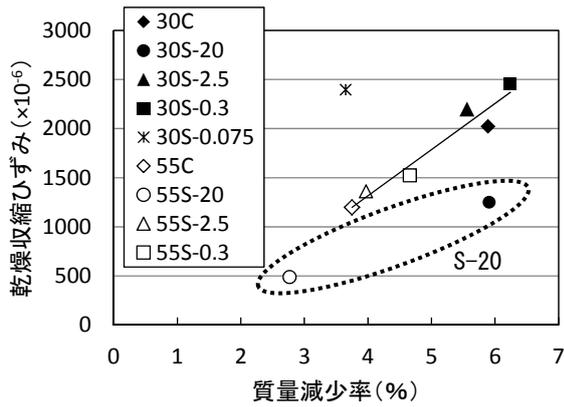
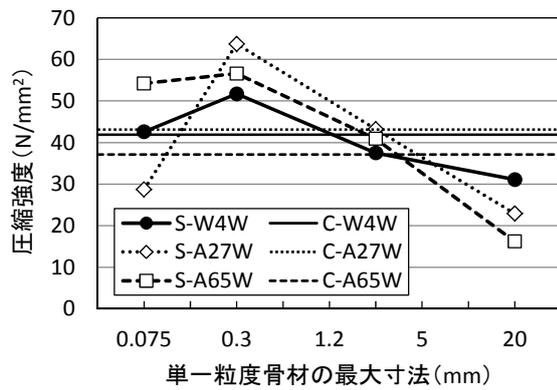
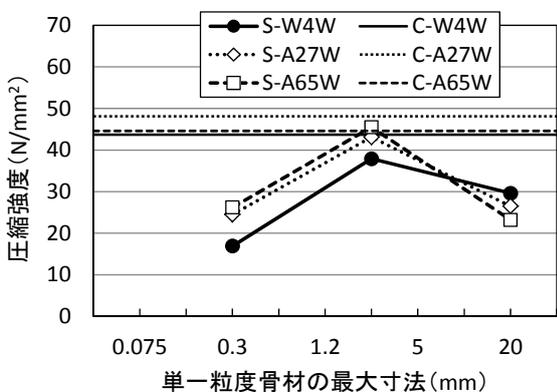


図-3 乾燥収縮ひずみと質量減少率の関係



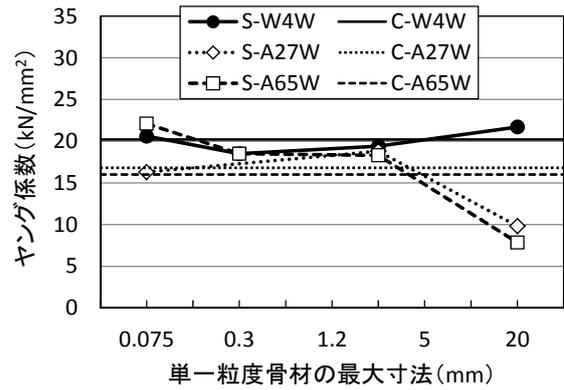
(a) Va=30%



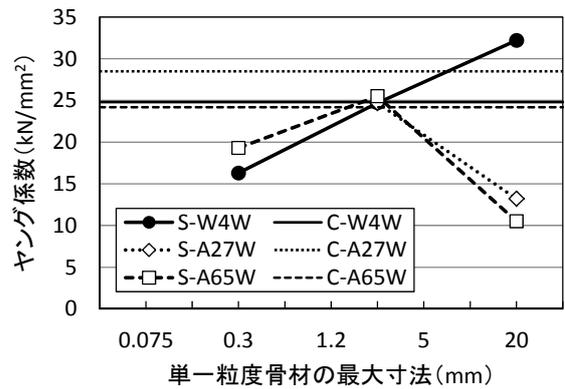
(b) Va=55%

図-4 圧縮強度と骨材寸法の関係

よると、55S-0.3 および 30S-0.075 の骨材寸法が小さいケースにおいて、圧縮強度が低くなっている。これは、骨材体積比が高くて骨材寸法が小さいほどフレッシュコンクリートの流動性が低下し、型枠内に充填されにくくなったことが影響したものと考えられる。ただし、上記の供試体であっても、目視観察した範囲では、充填不良というほどの欠陥部は特に見られなかった。したがって、これらのコンクリートでは、組織が全体的にややポーラスになっていたものと考えられる。また、図-3 中の 30S-0.075 のデータが特異であったのも、このことに関係しているものと推察される。圧縮強度は、上記以外のケ



(a) Va=30%



(b) Va=55%

図-5 ヤング係数と骨材寸法の関係

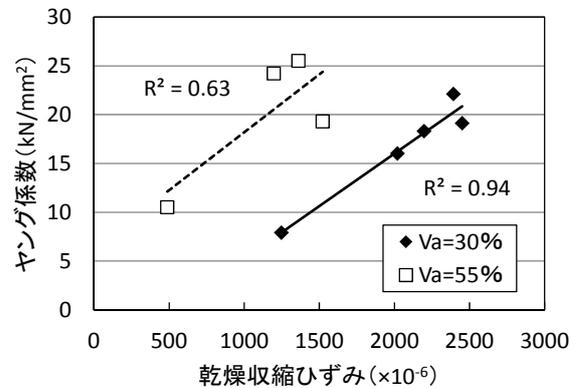


図-6 ヤング係数と乾燥収縮ひずみの関係

ースでは、いずれの養生方法の場合も骨材寸法が大きいほど低下している。

図-5 に、ヤング係数と骨材寸法の関係を示す。骨材寸法の大きい S-20 に着目すると、いずれの骨材体積比の場合も、ヤング係数は、水中養生の S-W4W のケースでは、他の骨材寸法の場合より大きな値となっている。それに対し、気中養生の S-A27W や S-A65W のケースでは、他の骨材寸法の場合よりもヤング係数が大幅に低下している。このことは、骨材寸法が大きくて、乾燥によりコンクリートに内部ひび割れが発生すると、それに伴って、ヤング係数が低下するという機構を示唆している。

図-6 に、ヤング係数と乾燥収縮ひずみの関係を示す (A65W のケース)。同図からわかるように、両者の関係は、骨材体積比ごとに一つの直線でほぼ表すことができる。また、乾燥収縮ひずみが小さいほどヤング係数が小さくなっており、このことは、骨材寸法の増大に伴い、内部ひび割れが発生した結果、乾燥収縮ひずみが低減する一方で、コンクリートの構造性能が低下する可能性があることを示している。

3. 拘束および持続荷重の影響を調べるための実験 (実験 2)

3.1 実験概要

(1) 実験ケース

表-4 に実験ケースを示す。実験 2 では、実験 1 と同様の目的で、骨材の粒度を、S-20、S-2.5 の単一粒度および C の連続粒度 (細骨材率 50%) の計 3 種類とした。また、気中養生した供試体の拘束・持続荷重状態を、自由収縮 (拘束なし)、拘束および持続圧縮載荷 (持続荷重) の 3 水準に変化させた。さらに、これらのケースとの比較を目的として、標準水中養生した自由収縮供試体に対しても試験を行った。

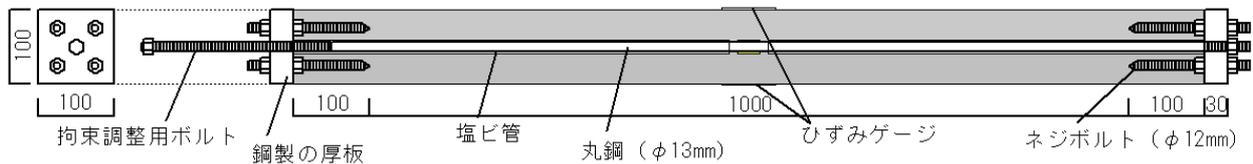
(2) 調合

表-5 にコンクリートの調合を示す。単一粒度骨材のケースでは、実験 1 と同様の方針で調合を設定した (ただし、骨材体積比は 50% とした)。一方、連続粒度骨材のケースでは、一般的なコンクリートの調合を想定し、スランブを 18cm、空気量を 4.5% に調整した。

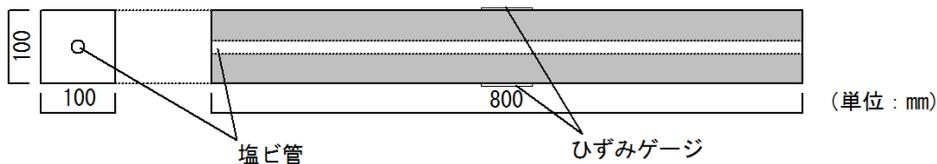
(3) 長柱供試体による試験

本実験では、図-7 に示すような長柱供試体を各ケースにつき 1 本ずつ作製した。そして、所定の拘束条件で養生した後に、圧縮試験および内部ひび割れ観察を行った。

(a) 供試体および拘束・載荷方法



(a) ケース AR (拘束)



(b) ケース WF, AF および AL (自由収縮および持続圧縮載荷)

図-7 長柱供試体の概要

ケース AR では、図-7(a) に示す装置によりコンクリートの乾燥収縮を拘束した。この供試体の断面中心には、塩ビ管で覆ってコンクリートとの付着を除去した丸鋼が埋め込んであり、拘束調整用ボルトを締め込むと、丸鋼を反力として、供試体両端に定着させた鋼製厚板間の距離が広がり、コンクリートの拘束量を調整できる仕組みになっている。

また、ケース AL では、コイルスプリング式クリープ試験機を用いて、図-7(b) に示す供試体を持続圧縮載荷した。なお、本実験では、AR 以外のケースの供試体に対しても塩ビ管を埋め込んで、ケース AR の供試体と形状を一致させた。

表-4 実験ケース

実験ケース	骨材種別	骨材寸法 (mm)	養生方法	拘束状態	
S-20-WF	単一粒度(S)	10~20	標準水中 (W)	自由収縮 (F)	
S-2.5-WF		1.2~2.5			
C-WF	連続粒度(C)	0~20			
S-20-AF	単一粒度(S)	10~20	気中* (A)		拘束 (R)
S-2.5-AF		1.2~2.5			
C-AF	連続粒度(C)	0~20			
S-20-AR	単一粒度(S)	10~20		気中* (A)	拘束 (R)
S-2.5-AR		1.2~2.5			
C-AR	連続粒度(C)	0~20			
S-20-AL	単一粒度(S)	10~20	気中* (A)		持続圧縮載荷 (L)
S-2.5-AL		1.2~2.5			
C-AL	連続粒度(C)	0~20			

*材齢 1 週まで標準水中→気中 (20℃, 60%RH)

表-5 調合

実験ケース	水セメント比 (%)	空気量 (%)	単位水量 (kg/m ³)	絶対容積 (l/m ³)		AE 減水剤 (C×%)	増粘剤 (C×%)	消泡剤 (C×%)
				セメント	骨材			
S-20	50	0	306	194	500	—	0.3	0.005
S-2.5				117	652	0.3	—	—
C				4.5	185	117	652	0.3

・セメント：普通ポルトランドセメント (密度 3.16g/cm³)
 ・骨材：石灰岩砕砂 (表乾密度 2.68 g/cm³, 吸水率 0.85%), 石灰岩砕石 (表乾密度 2.68 g/cm³, 吸水率 0.42%)

(b) コンクリートひずみの制御方法

気中養生のケースでは、供試体の相対する2側面にひずみゲージを貼付し、標準水中養生終了（材齢1週）直後から、コンクリートひずみの測定を開始した。図-8にひずみ制御スケジュールを示す。ケースARでは、コンクリートにひび割れを発生させないことを考慮し、ケースAFのひずみ測定値を基準として、拘束度が、乾燥期間100日までは0.15、それ以降は0.25となるようにひずみを制御した。また、ケースALでは、乾燥期間5日以降に、自由収縮ひずみ（ケースAFのひずみ測定値）に対して、さらに 500×10^{-6} の弾性ひずみに加わるようにひずみを制御した。

(c) 圧縮試験および内部ひび割れ観察

材齢21週の時点で、長柱供試体から $10 \times 10 \times 20\text{cm}$ の角柱供試体を3本切り出して、それを用いて圧縮強度およびヤング係数試験を行った。その際、全てのケースで試験条件が統一されていればそれでよいと考えて、塩ビ管ごと供試体を載荷した。また、気中養生のケースでは、長さ10cmに切り出した供試体を軸方向にさらに半分に切断し、その断面に対して内部ひび割れ観察を行った。観察方法は実験1と基本的に同様としたが、本実験では、可視画像はデジタルマイクロスコープを用い、紫外線を照射した状態で分割して撮影した。そして、それらの画像を、ひび割れ部分が白色に、その他の部分が黒色になるように二値化処理して内部ひび割れの面積率を求めた。

(4) その他の試験

本実験では、上記のほか、JIS A 1129-3に準拠して乾燥収縮試験（供試体寸法 $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ 、乾燥条件 20°C 、 $60\%RH$ ）を行った。また、長柱供試体のWFおよびAFと同一の養生を行った円柱供試体（ $\phi 10 \times 20\text{cm}$ ）に対し、長柱供試体と同じ材齢（21週）で圧縮強度およびヤング係数試験を行った。

3.2 実験結果とその考察

(1) 内部ひび割れの面積率

図-9に、内部ひび割れの観察結果とその二値化画像

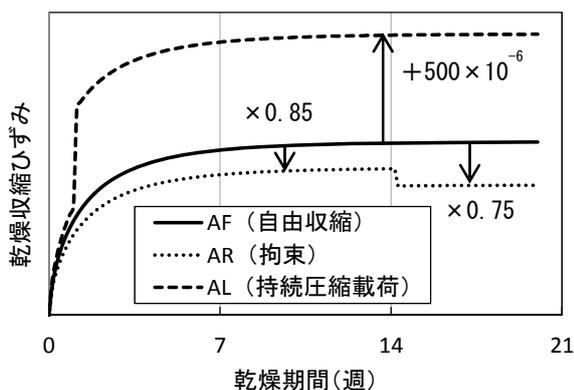


図-8 ひずみ制御スケジュール

の一例を示す。内部ひび割れ観察面に気泡が存在した場合は、二値化する際に、それがひび割れと見なされないように処理した。図-10に内部ひび割れの面積率を示す。S-20のひび割れ面積率は、その他のケースと比較して4~5倍大きい結果となった。

(2) 乾燥収縮ひずみおよび質量減少率

図-11に、JIS試験で得られた乾燥収縮ひずみと質量減少率の関係を示す。寸法の大きな単一粒度骨材を用いたS-20では、実験1と同様に、同一の質量減少率に対す

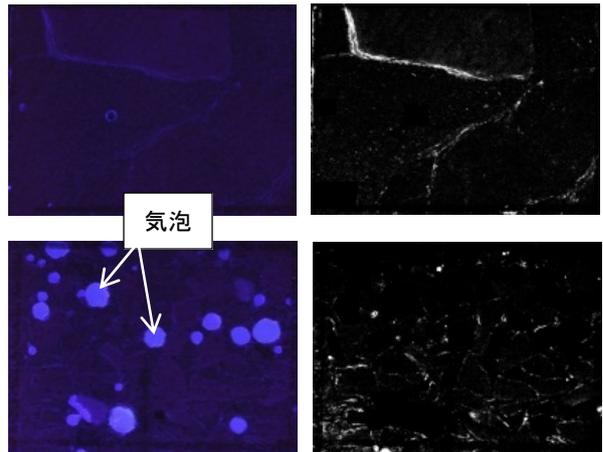


図-9 内部ひび割れの観察結果とその二値化画像 (上：S-20, 下：S-2.5)

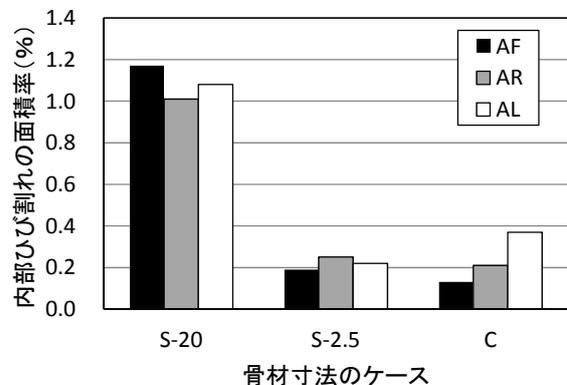


図-10 内部ひび割れの面積率

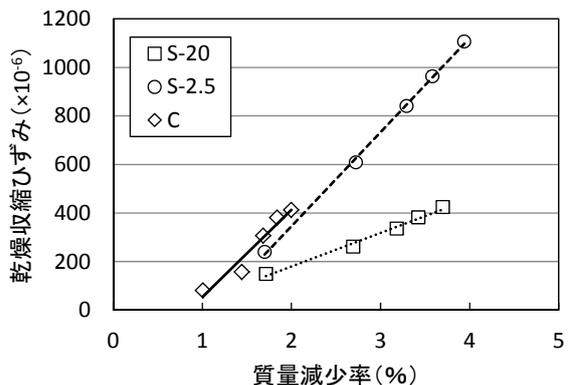


図-11 乾燥収縮ひずみと質量減少率の関係

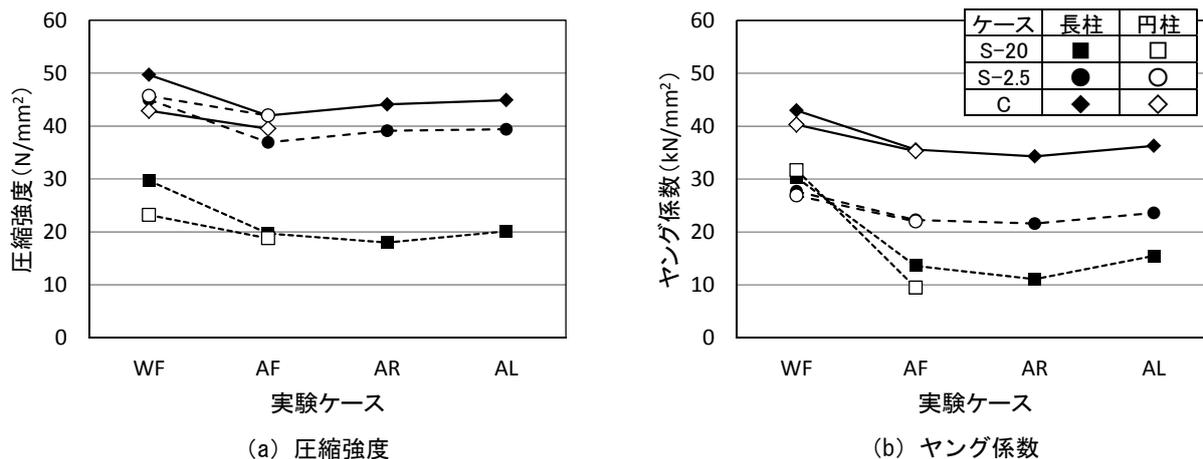


図-12 拘束・持続荷重状態別の力学特性の比較

る乾燥収縮ひずみが小さくなっており、内部ひび割れの発生により、乾燥収縮ひずみが小さく測定されたものと考えられる。

(3) 圧縮強度およびヤング係数

図-12に、圧縮強度およびヤング係数の試験結果を示す。図中には、長柱供試体と円柱供試体の試験結果を併せて示してある。自由収縮のケースに着目すると、実験1の結果と同様に、骨材寸法の大きなS-20において、気中養生(ケースAF)の場合に、標準水中養生(ケースWF)の場合よりもヤング係数が大幅に低下している。また、気中養生のケースに着目すると、S-20では、ヤング係数は、自由収縮のケースAFに比べて、収縮を拘束したケースであるARではやや小さく、持続圧縮荷重を作用させたケースALではやや大きくなっている。しかし、その差は小さく、コンクリート部材に対する拘束や持続荷重が乾燥に伴うヤング係数の低下度合いに及ぼす影響は小さいといえる。

4. まとめ

本研究では、骨材寸法やコンクリート部材の拘束・持続荷重状態を変化させて、日常環境下での乾燥に伴いコンクリート内部に発生するひび割れがコンクリートの乾燥収縮ひずみおよび力学的性質に及ぼす影響について検討した。本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 寸法の大きな単一粒度骨材を用いたコンクリートでは、乾燥により、ペースト部分に内部ひび割れが発生する。また、乾燥収縮ひずみは、このことに起因して、小さく測定されるものと考えられる。
- (2) 乾燥により内部ひび割れが発生すると、コンクリートのヤング係数が大幅に低下する。
- (3) コンクリート部材に対する拘束や持続荷重状態が乾燥に伴うヤング係数の低下度合いに及ぼす影響は小さい。

謝辞

本研究費の一部は、文部科学省平成24年度私立大学戦略的研究基盤形成支援事業「21世紀型自然災害のリスク軽減に関するプロジェクト」によった。ここに付記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 樋口優香, 寺西浩司, 齊藤和秀: 骨材寸法および微粒分量がコンクリートの乾燥収縮ひずみに及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.418-423, 2012.7
- 2) 閑田徹志, 市川禎和, 紺谷修, 武田三弘, 大塚浩司: 高温および低湿度環境下におけるコンクリート物性の変化と損傷の定量化に関する実験検討, 日本建築学会構造系論文集, No.615, pp.15-22, 2007.5
- 3) 最知正芳: 早期材齢において乾燥作用を受けたコンクリート内部の微細ひび割れの定量的評価, 日本建築学会東北支部研究報告集, No.68, pp.63-66, 2005.6
- 4) 篠野宏, 堀口直也, 丸山一平: コンクリートの乾燥により生じるひずみ分布と微細ひび割れ性状の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.454-459, 2012.7
- 5) 篠野宏, Mao LIN, 丸山一平: 高温乾燥を受けたコンクリートに発生する微細ひび割れに関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.703-708, 2013.7
- 6) 伊藤充希, 篠野宏, 丸山一平: 乾燥により生じる微細ひび割れが割裂引張強度に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.373-378, 2013.7
- 7) 手塚喜勝, 朝倉啓二, 中村眞一, 佐々木元茂: 蛍光エポキシ樹脂含浸法によるコンクリートコアサンプルの微細ひび割れの可視化手法, 土木学会北海道支部論文報告集, No.61, 2004.2