

報告 各地域のレディーミクストコンクリート工場にて製造された コンクリートの乾燥収縮に関する調査

都築 正則*1・一瀬 賢一*2・神代 泰道*2・小柳 光生*2

要旨:各地域のレディーミクストコンクリート工場にて製造されたコンクリート乾燥収縮ひずみに関する調査を行い、以下のことが分かった。(1)乾燥収縮ひずみは $485 \sim 1020 \times 10^{-6}$ の広い範囲を示し、平均値は 683×10^{-6} であった。(2)粗骨材に石灰岩碎石を単独で使用したコンクリートの乾燥収縮ひずみは、他の粗骨材を使用したコンクリートよりも小さい値を示した。(3)コンクリートの静弾性係数と乾燥収縮ひずみの間には、粗骨材に石灰岩碎石を単独で使用したコンクリートを除き、緩やかな負の相関が確認された。(4)乾燥期間4週の実測値と建築学会の予測式から求めた26週推定値は、26週実測値 $\pm 100 \times 10^{-6}$ の範囲でほぼ収まった。
キーワード:乾燥収縮ひずみ, 粗骨材, 石灰岩, 静弾性係数, レディーミクストコンクリート

1. はじめに

コンクリート構造物の収縮ひび割れの原因として、コンクリートの乾燥収縮が挙げられる。この内的な要因としては、材料物性や調合等が挙げられる。材料物性としてはセメント、骨材および混和材料の種類の影響があり、調合としては単位水量、水セメント比、単位水量、単位骨材量等の影響が挙げられる。各地域におけるレディーミクストコンクリート工場によって製造されるコンクリートは、この材料物性および調合が様々であるため、その乾燥収縮ひずみは広い範囲を示すことが予想される。

このような現状において、日本建築学会から収縮ひび割れの制御指針案²⁾が発刊され、表-1に示すように、具体的な乾燥収縮ひずみの値によるコンクリートのグレード分けが示された。このことから、材料的なアプローチで、コンクリート構造物のひび割れを低減するために、このグレードに合うコンクリートの要求が多くなることが考えられ、今後、レディーミクストコンクリート工場によって製造されたコンクリートの乾燥収縮ひずみを把握することは、重要であると考えられる。近年、これらレディーミクストコンクリートの乾燥収縮ひずみの報告^{3),4)}も出されており、更なるデータの蓄積が期待される。

こうした背景のもと本報告では、使用材料、調合の異なるコンクリートの乾燥収縮ひずみの把握を目的とし、各地域のレディーミクストコンクリート工場によって製造されたコンクリートを対象として乾燥収縮ひずみの調査、検討を行った。同時に、圧縮強度および静弾性係数の調査も行った。

2. 実験概要

2.1 調査対象とした工場

調査対象とした各地域におけるレディーミクストコン

クリート工場の概要を表-2に示す。工場数は札幌(3社)、東北(3社)、北陸(2社)、東京(6社)、横浜(3社)、名古屋(3社)、大阪(5社)、神戸(4社)、広島(3社)、四国(4社)、九州(3社)の計39工場とした。コンクリートの試料数は各工場2調合とし、計78試料のコンクリートとした。試験に使用したコンクリートは、主に工場の実機ミキサーによる練り混ぜとしているが、近畿の一部工場は、室内試験練り用ミキサーによる練り混ぜとした。

2.2 調査対象としたコンクリート

各工場の使用骨材を表-3に、コンクリートの概要を表-4に示す。細骨材種別に見ると、砂を単独で使用している工場は15社あり、北海道、東北、北陸地方は陸砂、山砂を用いている工場が多く、九州においては海砂を用いているものが多かった。また、石灰岩砕砂を混合している工場は11社あった。粗骨材においては、石灰岩碎石を単独で使用している工場は7社、石灰岩碎石を混合している工場は6社、砂利を単独で使用している工場は4社であった。

また、調合の条件としては、呼び強度24および呼び強度30の2種類(以下、「24N」および「30N」と称す。), 使用セメントは普通ポルトランドセメントとし、空気量は4.5%, スランプは18cmとした。工場によっては、高性能

表-1 コンクリートの級¹⁾

コンクリートの級	乾燥収縮ひずみ
標準	$650 \sim 800 \times 10^{-6}$
高級	$500 \sim 650 \times 10^{-6}$
特級	500×10^{-6} 以下

表-2 調査対象としたコンクリート工場

工場	39社
地域	9地域
()内数値は工場数	北海道(3), 東北(3), 関東(9), 北陸(2), 東海(3), 近畿(9), 中国(3), 四国(4), 九州(9)
試料数	2調合, 78試料

*1 ㈱大林組 技術研究所 建築材料研究室 工修 (正会員)

*2 ㈱大林組 技術研究所 建築材料研究室 工博 (正会員)

表-3 各地域における工場の使用骨材

地域別	地域別		骨材種類別(分類まとめ)	
	細骨材	粗骨材	細骨材	粗骨材
北海道(3)	陸砂(2), 陸砂+砕砂(1)	石灰岩(1), 陸砂利(1), 安山岩(1)	石灰砕砂+砂(7) 石灰砕砂+砕砂(6) 石灰砕砂含(3種)砂(4) 砂+砕砂(15) その他(2)	石灰岩(7) 石灰岩混合砂利(6) 砂利混合(4) 硬質砂岩(2) 安山岩(8) その他(5)
東北(3)	山砂(3)	硬質砂岩(2), 輝緑岩(1)		
関東(9)	石灰砕砂+山砂(4), 石灰砕砂+陸砂(1), 石灰砕砂+砕砂+山砂(2), 山砂(2)	石灰岩(5), 石灰岩+硬質砂岩(1), 硬質砂岩(3)		
北陸(2)	陸砂(2)	陸砂利(2)		
東海(3)	石灰砕砂+山砂(1), 川砂(1), 山砂+陸砂(1)	川砂利(1), 山砂利+硬質砂岩(1), 陸砂利+硬質砂岩(1)		
近畿(9)	石灰砕砂+砕砂(5), 海砂+砕砂(4)	石灰岩(1), 石灰岩+流紋岩(1), 硬質砂岩(1), 安山岩(2), 流紋岩(3), 石英斑岩(1)		
中国(3)	石灰砕砂+加工砂(1), 石灰砕砂+砕砂+スラグ(1), 加工砂+スラグ(1)	石灰岩+粘板岩(1), 硬質砂岩(1), 粘板岩(1)		
四国(4)	石灰砕砂+スラグ(1), 石灰砕砂+砕砂+海砂(1), 山砂+海砂(1), 砕砂(1)	硬質砂岩(1), 安山岩(2), 硬質砂岩+安山岩(1)		
九州(3)	海砂(3)	石灰岩+ひん岩(1), 石灰岩+結晶片岩(1), 石灰岩+角閃岩(1)		

※()内の数値は工場数

AE減水剤およびAE減水剤の使用により、同じ呼び強度でも、2種類の調合を持っている場合があるが、建設現場への出荷頻度が高い調合を対象とした。

呼び強度に対する各地域のコンクリートの水セメント比(以下、W/Cと称す。)を図-1に示す。全地域のW/C平均値は「24N」で56.5%,「30N」で49.1%であった。地域別に見ると関東および近畿は共に平均を上回る結果となった。

呼び強度に対する各地域のコンクリートの調合上単位水量を図-2に示す。全地域の単位水量平均値は「24N」で178.4kg/m³,「30N」で179.7kg/m³であった。各地域において、北海道および北陸が他の地域よりも単位水量が小さく、単位水量170kg/m³以下の工場(4社)は、粒形の良い陸砂、陸砂利および吸水率の低い石灰岩砕石を用いており、これが単位水量を低く設定できる要因と考えられる。

2.2 試験項目

各工場によって製造されたコンクリートの試験項目を表-5に示す。試験項目としては、フレッシュ性状、乾燥収縮ひずみ、質量減少率、圧縮強度、静弾性係数とした。

2.3 試験体の作製、養生方法

コンクリート試験体は、工場にて打設後、翌日の脱型時まで封かん養生、翌日から材齢4もしくは5日まで水中養生を行い、弊社研究所への移動は封かん養生にて行った。その後、試験体は水中養生を行い、乾燥開始材齢を打設時点から7日として、20±2℃、60±5%の恒温恒湿室にて測定材齢時まで静置した。圧縮強度試験体は、移動後材齢28日まで水中養生を行い、圧縮強度および静弾性係数の測定を行った。

表-5 測定項目および方法

測定項目	測定方法	概要(測定材齢)
フレッシュ性状	各JISによる	-
乾燥収縮ひずみ	JIS A 1129-2	試験体寸法: 10×10×40cm (乾燥期間1, 2, 4, 8, 13, 26週)
質量減少率		
圧縮強度	JIS A 1108	試験体寸法: 10φ×20cm
静弾性係数	JIS A 1149	(標準水中養生4週)

表-4 調査対象としたコンクリートの概要

調査項目	呼び強度24		呼び強度30	
	空気量 (%)	4.5%		
スランブ (cm)	18cm			
W/C (%)	53.0~60.5 (56.5)	46.0~52.0 (49)		
単位水量 (kg/m ³)	165~184 (178)	168~186 (180)		
s/a (%)	41.1~55.2 (48)	39.7~53.3 (46)		
S容積 (L/m ³)	282~371 (323)	266~349 (303)		
G容積 (L/m ³)	301~405 (353)	306~404 (355)		
セメント	普通ポルトランドセメント(8社)			
AE減水剤	5社, 6種類			
高性能AE減水剤	3社, 5種類			

※()内数値は平均値

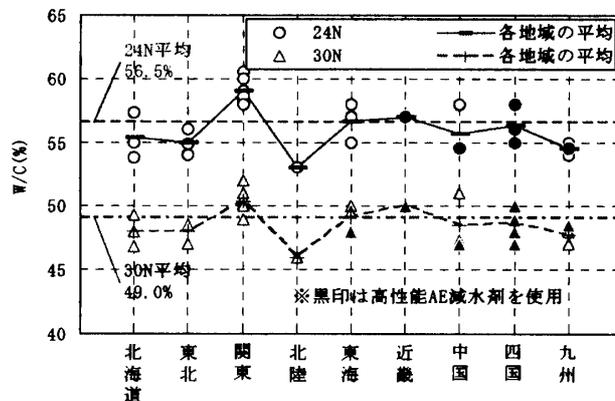


図-1 呼び強度に対する各地域の水セメント比

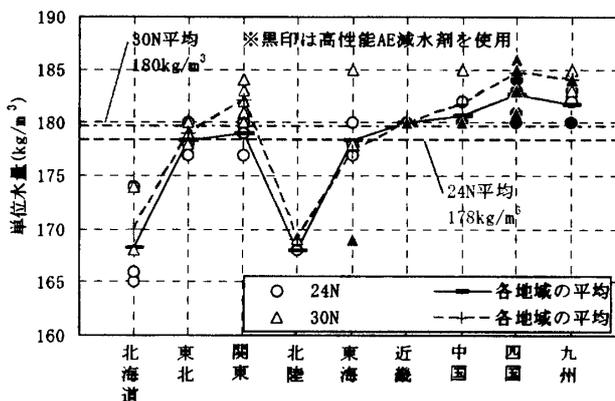


図-2 呼び強度に対する各地域の単位水量

3. 実験結果

3.1 フレッシュ性状試験結果

各コンクリートのフレッシュ性状試験結果を表-6に示す。スランブは16.5~21.5cm, 空気量は3.5~5.8%とほぼ目標値内に収まった。またコンクリート温度は, 各地域における気温の関係から10.0~29.0℃と広い範囲を示す結果となった。

3.2 圧縮強度試験結果

各コンクリートのセメント水比と圧縮強度(標準養生, 材齢28日)の関係を図-3に示す。図より, 「24N」のコンクリートにおいて30.3~49.2N/mm²(平均36.6N/mm²), 「30N」において35.6~56.8N/mm²(平均43.8N/mm²)の値を示し, 呼び強度より, 少なくとも5N/mm²以上大きい値となった。近畿地域内の工場においては, 地域内で強度算定式が固定されていると考えられるため(「24N」ではW/C=57%, 「30N」ではW/C=50%), 呼び強度よりも実際の強度が顕著に大きいものが多数あった。その他, 地域においては, セメント水比が大きいほど, 強度が大きくなる傾向であるが, 10N/mm²程度のばらつきが生じる結果となった。

3.3 乾燥収縮試験結果

(1) 乾燥収縮の分布

乾燥期間26週における「24N」と「30N」の乾燥収縮ひずみの頻度を図-4に示す。乾燥収縮ひずみは485~1020×10⁻⁶と, 試料によって広い範囲を示し, その平均値は683×10⁻⁶であった。「24N」と「30N」を合わせた全78試料中, 表-1によるコンクリートの級として, 「標準」をクリアしているもの(800×10⁻⁶以下)は60試料(全体の76.9%), 「高級」をクリアしているもの(650×10⁻⁶以下)は38試料(全体の63.3%), 特級をクリアしているもの(500×10⁻⁶以下)は1試料(全体の2.6%)であった。また, 800×10⁻⁶より大きいものは18試料(全体の23.1%)あり, 工場, 調合によっては「標準」の乾燥収縮ひずみ以上になることを留意する必要がある。

(2) 調合による比較

乾燥期間26週における乾燥収縮ひずみにおいて「24N」と「30N」で比較したものを図-5に示す。図より, 乾燥収縮ひずみにおいて「24N」および「30N」を比較すると, 一部200×10⁻⁶程度と大きく異なるものの, 工場ごとによる乾燥収縮ひずみの大きさは同程度であった。

質量減少率と乾燥収縮ひずみの関係を図-6に示す。全体として質量減少率が大きいほど, 乾燥収縮ひずみは大きくなる傾向を示すが, 個々の試料で比較すると, 質量減少つまり水分の逸散が同じでも, 乾燥収縮ひずみは大きくばらつき, 両者の相関係数も低いものであった。また「24N」と「30N」を比較すると, それぞれの近似式の傾きは異なる結果となった。このことから水分逸散に起因する乾燥収縮ひずみは, そのコンクリートの調合および使用材

表-6 フレッシュ性状試験結果

測定項目		24N		30N	
スランブ	(cm)	17.0~21.0	(19.0)	16.5~21.5	(19.0)
空気量	(%)	3.5~5.8	(4.7)	3.9~5.8	(4.8)
CT	(℃)	10.0~29.0	(21.7)	10.0~28.0	(21.9)

※()内数値は平均値

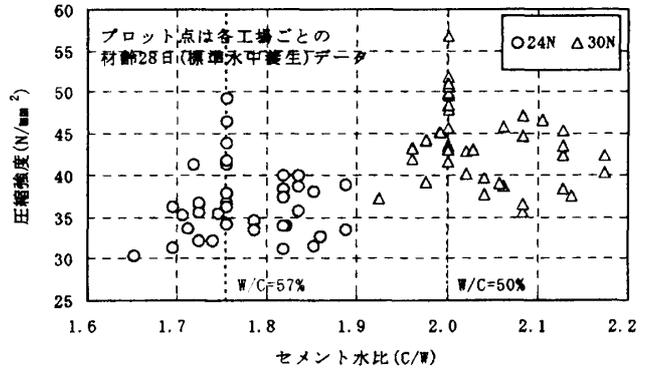


図-3 セメント水比と圧縮強度の関係

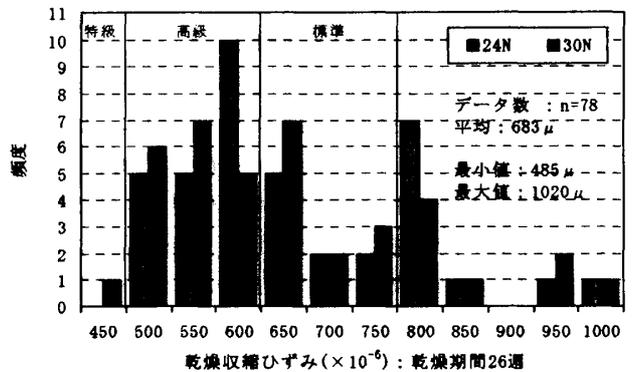


図-4 乾燥収縮ひずみの分布

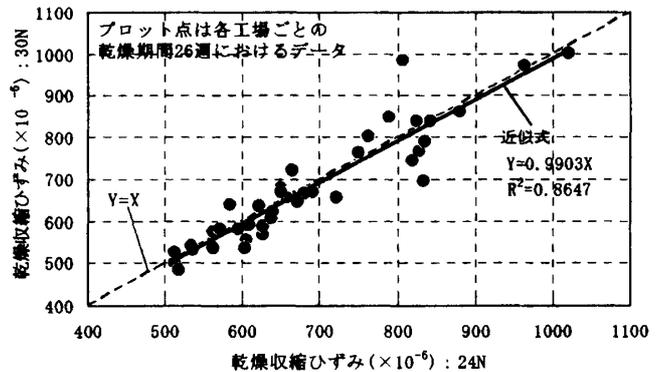


図-5 調合による乾燥収縮ひずみの比較

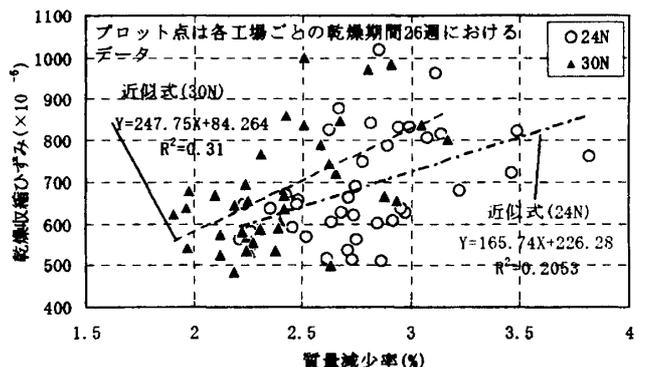


図-6 質量減少率と乾燥収縮ひずみの関係

料によって大きく異なると考えられる。

(3) 単位水量との比較

調合上の単位水量と乾燥収縮ひずみの比較を図-7に示す。図より近似直線は若干右上がりの傾向を示すものの、その相関係数は極めて小さい、単位水量165~186kg/m³の範囲では、単位水量の大きさによらず乾燥収縮ひずみは大きくばらつく結果となった。この理由として、単位水量よりも使用材料の影響が大きい事が考えられる。

(4) 各地域の乾燥収縮ひずみ

地域別による乾燥収縮ひずみを図-8に示す。全地域の乾燥収縮ひずみの平均値(683 × 10⁻⁶)と比較して、各地域の平均値において、乾燥収縮ひずみが大きい地域は、北海道、東海、四国であった。ただし各地域において乾燥収縮ひずみは最大371 × 10⁻⁶程度と大きくばらつく結果となり、地域によって乾燥収縮ひずみの値を推測することは困難であると考えられる。

(5) 細骨材種類による乾燥収縮ひずみ

細骨材種類別による乾燥収縮ひずみを図-9に示す。各細骨種類別にみた乾燥収縮ひずみの平均値は、石灰岩砕砂+砂では659 × 10⁻⁶、石灰岩+砕砂(スラグも含む)では681 × 10⁻⁶、石灰岩他3種の異なる細骨材を混ぜたものでは797 × 10⁻⁶、砂単独では666 × 10⁻⁶、砂+砕砂では638 × 10⁻⁶、その他細骨材では790 × 10⁻⁶であった。全平均と比較して、各細骨材種類の平均値において、乾燥収縮が大きいものは、石灰岩砕砂を含めた3種類混合細骨材、およびその他細骨材であった。ただし、地域ごとに並べた乾燥収縮ひずみの傾向と同様、各細骨材ごとの個々のデータの乾燥収縮ひずみのばらつきは約300 × 10⁻⁶ ~ 500 × 10⁻⁶と大きく、細骨材種類によって乾燥収縮ひずみの値を判定することは困難であると考えられる。

(6) 粗骨材種類による乾燥収縮ひずみ

粗骨材種類による乾燥収縮ひずみを図-10に示す。各粗骨材種類別にみた乾燥収縮ひずみの平均値は、石灰岩砕石単独では554 × 10⁻⁶、石灰岩砕石混合では615 × 10⁻⁶、砂利単独では平均721 × 10⁻⁶、砂利混合では785 × 10⁻⁶、硬質砂岩砕石単独では776 × 10⁻⁶、安山岩砕石単独では743 × 10⁻⁶、その他砕石では670 × 10⁻⁶であった。全平均と比較して、乾燥収縮ひずみが大きいものは、砂利、砂利混合、硬質砂岩砕石、安山岩砕石であった。ただし、石灰岩砕石単独以外の粗骨材個々のデータのばらつきは、約250 ~ 450 × 10⁻⁶と大きい。一方、石灰岩砕石を用いたコンクリートは、全平均に比べ約130 × 10⁻⁶程度小さくなり全平均(683 × 10⁻⁶)の80%程度の大きさとなった。このことから、石灰岩以外の粗骨材種類については、種類によって乾燥収縮ひずみの大小を判定することは困難であると考えられるが、粗骨材に石灰岩単独で使用了場合、コンクリートの乾燥収縮が小さくなる傾向があることが分かった。

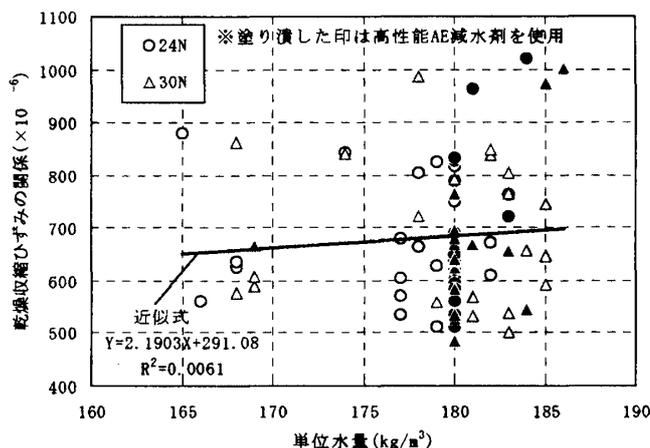


図-7 単位水量と乾燥収縮ひずみの関係

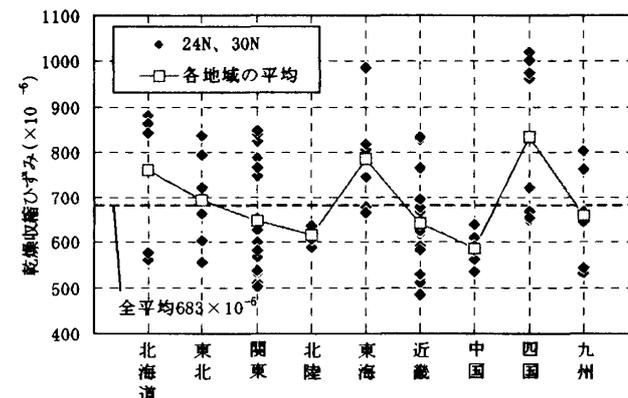


図-8 各地域別にみた乾燥収縮ひずみ

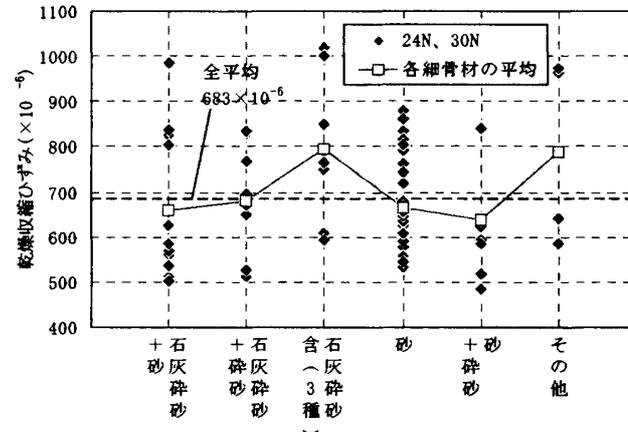


図-9 細骨材分類別にみた乾燥収縮ひずみ

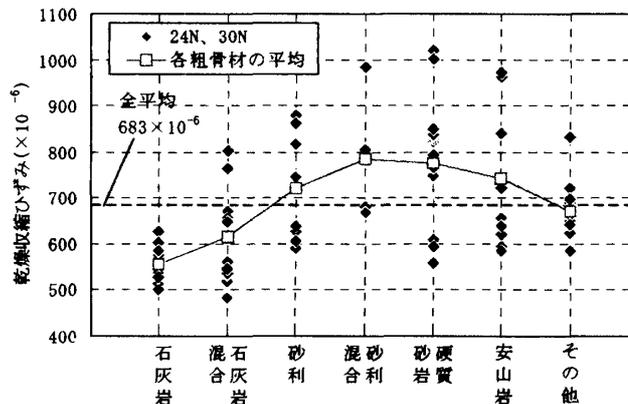


図-10 粗骨材分類別にみた乾燥収縮ひずみ

(7) 吸水量と乾燥収縮ひずみの関係

乾燥収縮ひずみに影響する骨材の品質として、骨材の吸水量が考えられる⁹⁾。そこで、骨材の吸水率、吸水量(吸水率×骨材使用量)、コンクリートの全水量(単位水量+骨材吸水量)とコンクリートの乾燥収縮ひずみ・質量減少率の関係から近似直線を求め、その相関係数を調査した。骨材の吸水率は、細骨材・粗骨材共にその混合比から平均値を求めている。各相関係数の一覧を図-11に示す。(図中では、細骨材の吸水率をws, 吸水量をWS, 粗骨材の吸水率をwg, 吸水量をWGとしている。)図から、相関係数は最大でも0.235程度であり、本試験内では、コンクリートの乾燥収縮ひずみと各因子の関係性は低い結果となった。また、各因子の中で、粗骨材に関するもの(wgおよびWG)に関して、コンクリートの乾燥収縮ひずみとの相関係数の値が、他の値に比べて大きい結果となった。

3.4 静弾性係数試験結果

(1) 静弾性係数と圧縮強度の関係

材齢28日(水中養生)の静弾性係数と圧縮強度の関係を図-12に示す。静弾性係数は、New RC式⁶⁾(強度試験体の単位容積質量平均値により $\gamma=23.25$ とした。)と比較すると、石灰岩を用いたコンクリートは $k_1=1.2$ の式よりも下回り、安山岩・粘板岩を用いたもの、その他の粗骨材を用いたものは、 $k_1=0.95$ の式および $k_1=1.0$ の式よりもそれぞれ上側に広く分布する結果となった。

(2) コンクリートの静弾性係数と乾燥収縮ひずみの関係

コンクリートの静弾性係数と乾燥期間26週の乾燥収縮ひずみの関係を図-13に示す。相関係数は0.38と小さいが、全体として静弾性係数が大きくなるほど、乾燥収縮ひずみは小さくなる傾向が見られた。粗骨材の種類ごとにみると、砂利、砂利混合および硬質砂岩、石灰岩混合は負の相関が見られた。一方、石灰岩碎石のみを用いたコンクリートは静弾性係数の大小にかかわらず、乾燥収縮ひずみは小さい値を示し、負の相関性は見られなかった。このことから、石灰岩碎石を用いたコンクリートにおいて、乾燥収縮と静弾性係数の関係は小さいことが分かった。

個々の圧縮強度および単位容積質量の測定値とNew RC式($k_1=1.0$ とした)から静弾性係数を算出し、実際の静弾性係数の測定値との比率(=測定値÷New RC式による計算値)を求めた。以下、この比率を係数aとする。

係数aと乾燥収縮ひずみの関係を図-14に示す。石灰岩碎石のみを用いたコンクリートを除き、係数aが大きくなるほど(実際の静弾性係数が計算値よりも大きいほど)乾燥収縮ひずみは小さくなる傾向を示し、近似式による相関係数は図-13のものより、大きくなる結果となった。このことから、乾燥収縮ひずみの大小の傾向を把握するには、静弾性係数の測定値のみで比較するよりも、係数aで比較する方がより有効であると考えられる。

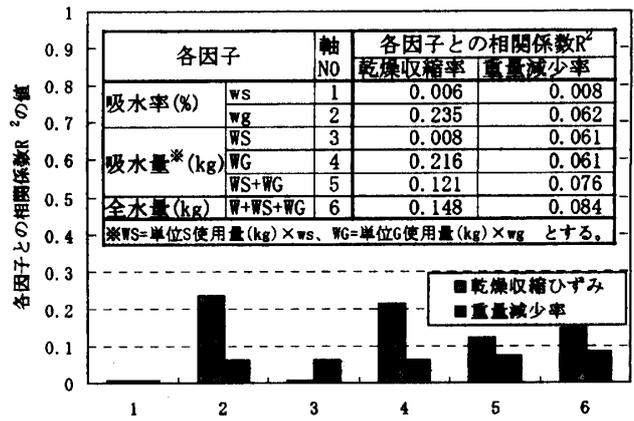


図-11 吸水率・吸水量・全水量との相関係数

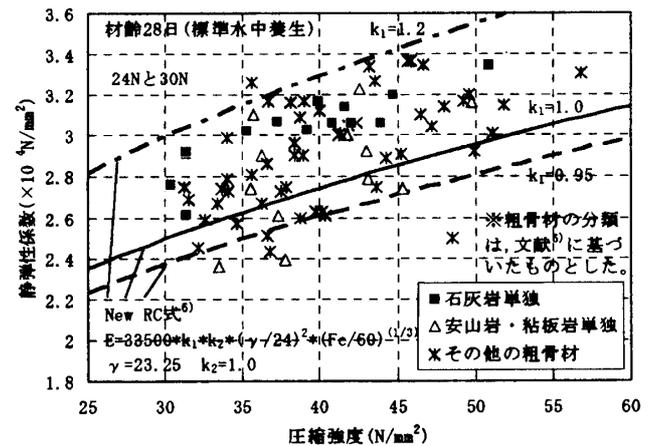


図-12 圧縮強度と静弾性係数の関係

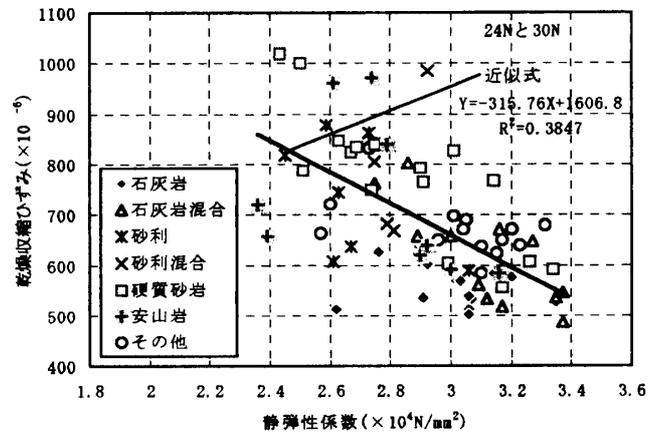


図-13 静弾性係数と乾燥収縮ひずみの関係

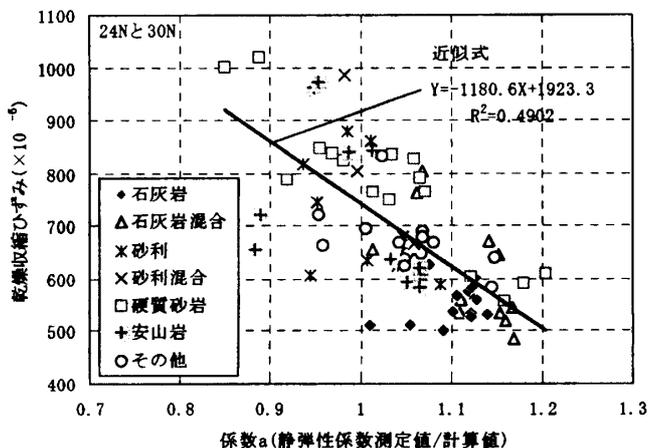


図-14 係数aと乾燥収縮ひずみの関係

3.5 乾燥期間26週の乾燥収縮ひずみの予測

図-15に乾燥期間4週と26週の乾燥収縮ひずみの関係を示す。近似式の切片を0とすると、本試験において乾燥期間26週乾燥収縮ひずみ = 1.736 × 乾燥期間4週乾燥収縮ひずみで表すことが出来た。日本建築学会の収縮ひずみ予測式²⁾(以下、AIJ式と称す。)において、乾燥開始材齢を7日とすると、乾燥期間26週乾燥収縮ひずみ = 1.771 × 乾燥期間4週乾燥収縮ひずみとなり、AIJ式と同程度の関係を表す結果となった。各乾燥期間における測定値と26週測定値の近似式と、AIJ式による各乾燥期間における計算値と26週計算値の関係式を表-7に示す。表より、測定値から求めた近似式と、AIJ式による材齢の関係式は、同程度であることが分かった。このことから、より一般的であるAIJ式を用いて、各乾燥期間における測定値から26週の推定値を算出し、26週測定値との比較を行った。

比較の結果を表-8に示す。表より、乾燥期間1週における測定値から乾燥期間26週を推定すると推定値 ± 200 × 10⁻⁶程度の範囲、2週からの推定では推定値 ± 150 × 10⁻⁶程度、4週からの推定では推定値 ± 100 × 10⁻⁶程度、8週では推定値 ± 75 × 10⁻⁶程度、13週からの推定では推定値 ± 50 × 10⁻⁶程度の範囲内にほぼ収まる結果となった。よって、乾燥期間が短い乾燥収縮ひずみから26週の乾燥収縮ひずみを ± 100 × 10⁻⁶の範囲で推定するには、少なくとも乾燥期間4週以降の実測値が必要と考えられる。

4. まとめ

各地域のレディーミクストコンクリート39工場にて製造された呼び強度24および30のコンクリート、78試料について乾燥収縮ひずみに関する調査を行い、以下のことが分かった。

- (1)乾燥収縮ひずみは485~1020 × 10⁻⁶の広い範囲を示し、全平均値は684 × 10⁻⁶となった。
- (2)粗骨材を石灰岩単独で使用したコンクリートの乾燥収縮ひずみは、平均554 × 10⁻⁶と他の粗骨材を使用したコンクリートよりも小さい値を示し、全平均684 × 10⁻⁶の80%程度の大きさとなった。
- (3)今試験における調合上単位水量165~186kg/m³の範囲内において、単位水量と乾燥収縮の間に明確な関係性は見られなかった。
- (4)コンクリートの静弾性係数と乾燥収縮ひずみの間には、石灰岩砕石単独のコンクリートを除き、緩やかな負の相関関係が確認された。
- (5)乾燥期間4週における乾燥収縮ひずみと建築学会の予測式から求めた乾燥期間26週推定値は、26週における測定値 ± 100 × 10⁻⁶の範囲でほぼ収まった。

参考文献

- 1) 日本建築学会編：鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひ

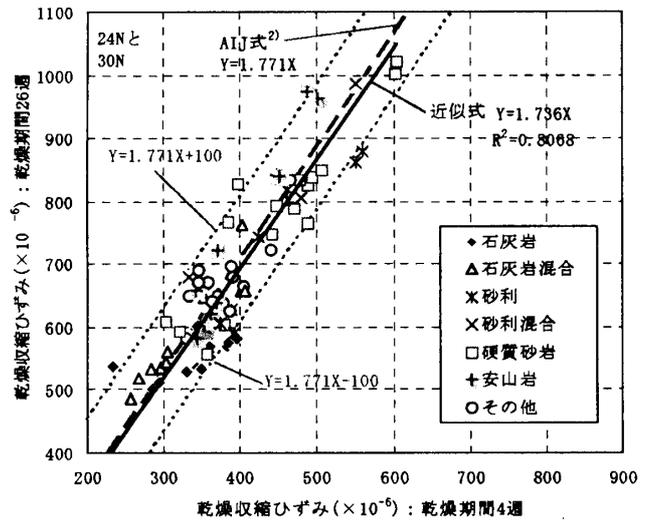


図-15 乾燥期間4週と26週の乾燥収縮ひずみ関係

表-7 各乾燥期間における測定値と26週測定値の関係

乾燥期間(週)	各乾燥期間における測定値(X ₁)と26週における測定値(Y ₁)の近似式		AIJ式による各乾燥期間における計算値(X ₂)と26週計算値(Y ₂)の関係式	
	近似式	相関係数	関係式	
1	Y ₁ =4.125X ₁	0.3949	Y ₂ =4.051X ₂	
2	Y ₁ =2.646X ₁	0.5973	Y ₂ =2.585X ₂	
4	Y ₁ =1.736X ₁	0.8068	Y ₂ =1.771X ₂	
8	Y ₁ =1.297X ₁	0.9511	Y ₂ =1.329X ₂	
13	Y ₁ =1.130X ₁	0.9806	Y ₂ =1.149X ₂	
26	Y ₁ =X ₁	1	Y ₂ =X ₂	

表-8 AIJ式による26週推定値と測定値の比較

推定値に用いる測定値の乾燥期間(週)	測定値のデータ数(個)	26週推定値を求めるための係数(AIJ式)	26週における測定値と26週推定値の差(×10 ⁻⁶)			測定値が推定値から以下の範囲よりも外れたデータ数(個)	
			最大	最小	平均		
1	78	4.051	303	-178	22	±200 × 10 ⁻⁶	3
2	64	2.585	267	-159	22	±150 × 10 ⁻⁶	6
4	78	1.771	125	-118	-11	±100 × 10 ⁻⁶	9
8	74	1.329	110	-77	-15	±75 × 10 ⁻⁶	2
13	78	1.149	61	-48	-10	±50 × 10 ⁻⁶	1

- び割れ-メカニズムと対策技術の現状-, 2003.5
- 2) 日本建築学会編：鉄筋コンクリート造建築物 n 収縮ひび割れ制御設計・施工指針(案)・同解説, 2006.2
- 3) 小澤貴史ほか：コンクリートの乾燥収縮ひずみ早期推定方法の提案とその適用性に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.591-596, 2007
- 4) 関田徹志, 百瀬晴基ほか：全国レディーミクストコンクリート工場を対象としたコンクリートの乾燥収縮に関する調査研究(その1, その2), 日本建築学会大会学術梗概集(九州), pp291-294, 2007.8
- 5) 福嶋真吾ほか：吸水率が大きい骨材が乾燥収縮量に与える影響に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.645-650, 2007
- 6) 日本建築学会編：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説-許容応力度設計法-, pp.38-40, 1999.11