

論文 各種の粗骨材を用いたコンクリートにおける乾燥収縮低減剤の効果

都築正則^{*1}, 友澤史紀^{*2}, 千歩修^{*3}, 浜幸雄^{*4}

要旨：本研究は、近年の骨材の低品質化に伴うコンクリートの乾燥収縮の増大を、乾燥収縮低減剤を用いることによってどの程度減少させることができるか、を実験的に検討したものである。各種粗骨材を用いたコンクリートに乾燥収縮低減剤を使用して、乾燥収縮をどの程度低減しているかを検討した。その結果、コンクリートの乾燥収縮率と粗骨材自体の乾燥収縮率、静弾性係数との間に関連性が見られ、明らかに粗骨材の種類がコンクリートの乾燥収縮に大きく影響を及ぼしていることが確認できた。また、乾燥収縮低減剤による収縮低減効果は、使用した粗骨材によらず、いずれの粗骨材を用いたコンクリートに対しても、材齢12週では20～25%の範囲であった。

キーワード：乾燥収縮, 乾燥収縮低減剤, 粗骨材, 静弾性係数

1. はじめに

コンクリート構造物におけるひび割れ発生の大きな要因として、コンクリートの乾燥収縮が挙げられる。したがって、ひび割れを防ぐにはコンクリートの乾燥収縮そのものを小さくする事が重要である。コンクリートの乾燥収縮は、骨材による拘束をうけた硬化セメントペーストの収縮に起因する¹⁾²⁾。骨材自体の乾燥収縮率はセメントペーストの乾燥収縮率より小さいとされているが、どの程度の影響があるか明確にはなっていない。近年、骨材の種類の多様化や量の確保の優先によってもたらされる骨材の低品質化により、それらの骨材を使用したコンクリートにおいて乾燥収縮の増大が懸念されている³⁾。コンクリートの乾燥収縮対策として、1986年のJASS5改定で単位水量制限が導入されたが、さらに乾燥収縮を低減するためには、乾燥収縮低減剤などの利用が考えられる⁴⁾。乾燥収縮低減剤は、乾燥下で起こる収縮応力を減少させるもので、乾燥収縮を直接的に低減させるものであるが、品質の悪い骨材を使用したコンクリートに対する乾燥収縮低減剤の効果は明確にされていない。

本研究では、まず各種粗骨材がコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響を検討し、ついでこれら各種粗骨材を用いたコンクリートにおける、乾燥収縮低減剤の乾燥収縮に及ぼす影響を検討する。

2. 実験計画と試験方法

2.1 実験計画

表-1に各種条件を組み合わせた実験計画を示す。ここでは品質の異なる10種類の粗骨材を用いたコンクリートにおける乾燥収縮低減剤の収縮低減効果を検討する。

粗骨材容積比が一定の割合で各種粗骨材の影響を

表-1 実験計画

粗骨材容積比	乾燥収縮低減剤の有無			乾燥収縮低減剤あり				
	0.42	0.35	0.29	0.35				
調査記号 ¹	Vs	N	Vb	A	B	SO	D	E
粗骨材の種類	T1							
	S							
	KG							
	KB							
	T2							
	OU							
	MB							
	YN							
	HM							
	KZ							

...コンクリート ...モルタル(コンクリートをウェットスクリーニングして作成)
1コンクリートの種類はT1 N, T1 Aのように表す。

*1 北海道大学大学院 大学院生 工学研究科 社会基盤工学専攻 (正会員)

*2 北海道大学大学院 教授 工学研究科 社会基盤工学専攻 (正会員)

*3 北海道大学大学院 助教授 工学研究科 社会基盤工学専攻 (正会員)

*4 北海道大学大学院 助手 工学研究科 社会基盤工学専攻 (正会員)

比較し、乾燥収縮低減剤が各種粗骨材に及ぼす影響は、乾燥収縮低減剤Aで検討する。粗骨材容積比の影響、乾燥収縮低減剤の使用量の影響、成分の異なる乾燥収縮低減剤の影響は粗骨材T2で検討する。また、粗骨材T2を用いたコンクリートについては、そのコンクリートを5mmふるいでウェットスクリーニングしてモルタルを採取した。

ここで作成したコンクリート及びモルタル試験体、粗骨材の試験項目を表-2に示す。

粗骨材の種類と基礎性状を表-3に、乾燥収縮低減剤の種類と品質、使用量を表-4に示す。粗骨材は吸水率が広範囲になるよう選定したものである。乾燥収縮低減剤の使用量はメーカー推奨標準使用量を基本とし、一部、その2倍まで増量した。コンクリートの調合を表-5に示す。調合は、粗骨材容積比ごとに粗骨材種類、乾燥収縮低減剤使用の有無によらず、構成材料の絶対容積を一定とし、また単位水量 185kg/m^3 、水セメント比55%とした。T1-Nのスランプが18cmとなる細骨材率を試し練りによって定め、その時の粗骨材容積比0.35を基準とした。粗骨材容積比をこれより増減したコンクリートのスランプは、それぞれおよそ19.6cmまたは8.5cmとなった。セメントは普通ポルトランドセメント(密度 3.16g/cm^3)、細骨材は陸砂(絶対乾密度 2.63g/cm^3 、吸水率1.64%)を使用した。

2.2 試験方法

(1) 乾燥収縮試験

コンクリート及びモルタルの乾燥収縮試験体の寸法はそれぞれ $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ 、 $4 \times 4 \times 16\text{cm}$ であり、試験体は、打ち込み後約24時間で脱型し、材齢7日まで水中養生を行った。その時点で基準となる試験体の長さ及び質量を測定し、試験体を 20 ± 1 、 $60 \pm 5\% \text{R.H.}$ の恒温恒湿室に静置し、所定の時期に長さ及び質量の測定を行った。なお、試験体寸法、測定方法はJIS A 1129「モルタル及びコンクリートの長さ試験方法(ダイヤルゲージ法)」によった。

(2) 圧縮強度試験及び静弾性係数の測定

コンクリート及びモルタルの圧縮強度試験体の寸

表-2 試験項目

試験対象	測定項目	試験方法
コンクリート試験体 モルタル試験体	乾燥収縮率	JIS A 1129 ダイヤルゲージ法
	圧縮強度	JIS A 1108
	静弾性係数	抵抗線歪ゲージにより測定
粗骨材	乾燥収縮率	抵抗線歪ゲージにより測定

表-3 使用粗骨材の種類と基礎性状

記号	種類	絶対乾密度 (g/cm^3)	表乾密度 (g/cm^3)	吸水率 (%)
T1	砕石	2.60	2.66	2.42
S	砕石	2.69	2.71	0.44
KG	砕石	2.51	2.60	3.56
KB	砕石	2.42	2.54	4.70
T2	砕石	2.63	2.69	2.24
OU	砕石	2.64	2.66	0.66
MB	川砂利	2.67	2.69	0.75
YN	山砂利	2.57	2.64	2.42
HM	砕石	2.69	2.70	0.61
KZ	砕石	2.73	2.74	0.63

表-4 使用乾燥収縮低減剤の種類と使用量

記号	種類	成分	密度 (g/cm^3)	使用方法
A	乾燥収縮 低減剤 1	有機界面 活性剤系	1.07	セメントの質量の2%を 水と置換
B				セメントの質量の4%を 水と置換
SO				粗骨材に含浸
D	乾燥収縮 低減剤 2	低級アルキレン オキソド系	1.03	6 kg/m^3 を水と置換
E				12 kg/m^3 を水と置換 ²

² メーカー推奨使用量の2倍使用量である。

表-5 調合表

記号 ³	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位 水量 (kg/m^3)	絶対容積(l/m^3)			質量(kg/m^3)		
				セメント	細骨材	粗骨材	セメント	細骨材	粗骨材
T2-Vs	55	40	185	106	279	419	336	746	1127
T2-N	55	49	185	106	345	354	336	919	952
T2-Vb	55	59	185	106	410	289	336	1093	777

³ その他の粗骨材や乾燥収縮低減剤を用いる場合もT2-Nと同様の調合である。

法は、それぞれ $10 \times 20\text{cm}$ 、 $5 \times 10\text{cm}$ とした。試験体は、打ち込み後約24時間で脱型し、材齢7日まで水中養生を行った後、所定の材齢まで実験室内で気中養生した。なお、圧縮試験方法はJIS A 1108によった。静弾性係数は歪ゲージを圧縮強度試験体の両側面に貼付し測定した。

(3) 粗骨材の乾燥収縮率の測定

粗骨材の乾燥収縮率は、使用した骨材の一面を平滑にし、防水型歪ゲージを貼付し測定した。一部の骨材では原石から $5 \times 5 \times 10\text{cm}$ の角柱を切り出し、

両側面に防水型歪ゲージを貼付けて測定し、その平均値を原石角柱の収縮率とした。測定方法はゲージを貼った骨材および原石角柱を水中浸漬し膨張が収束した時点を目長とし、乾燥期間は乾燥収縮が収束する時点とした。

3. 実験結果及び考察

3.1 粗骨材の特性に関する考察

骨材の乾燥収縮率試験結果を図-1に示す。粗骨材KG, KBにおいては粗骨材と原石角柱の収縮率の平均値に近い値を示しており、粗骨材からでもその岩石の乾燥収縮率を測定可能であると考えられた。粗骨材毎の乾燥収縮率の測定値は最大 3×10^{-4} のばらつきの範囲内であった。

コンクリートの乾燥収縮に影響する粗骨材の性質として、粗骨材の弾性係数が挙げられる。骨材そのものから静弾性係数を精度よく測定することは難しいので⁵⁾、ここでは材齢1週、4週のコンクリート及びモルタルの静弾性係数を用いて粗骨材の静弾性係数をHasin-Hansen式⁶⁾により推定することとした。

$$E_{sc}/E_{sm} = [n+1+(n-1)V_a]/[n+1-(n-1)V_a] \quad (1)$$

$$n = E_a/E_{sm} \quad (2)$$

ここに E_a : 粗骨材の静弾性係数(GPa),

E_{sm} : モルタルの静弾性係数(GPa),

E_{sc} : コンクリートの静弾性係数(GPa),

V_a : 粗骨材容積比とする。

ここで、式(1)を用いて材齢1週、材齢4週のコンクリート等の静弾性係数から推定した粗骨材の静弾性係数をそれぞれ E_{a1w} と E_{a4w} と表し、両者を比較すると図-2のようである。同じ粗骨材でも静弾性係数の推定値はコンクリートの材齢により異なっているが、各種粗骨材の E_{a1w} , E_{a4w} と、粗骨材の表乾密度、絶乾密度、吸水率、乾燥収縮率の値を比較したところ、各種粗骨材の乾燥収縮率は、 E_{a4w} と比較的相関が良い結果となった。図-3に粗骨材の乾燥収縮率と E_{a4w} の関係を示す。粗骨材の乾燥収縮率は、その弾性係数が大きいほど小さくなっていることがわかる。

3.2 粗骨材量がコンクリートの乾燥収縮に及ぼ

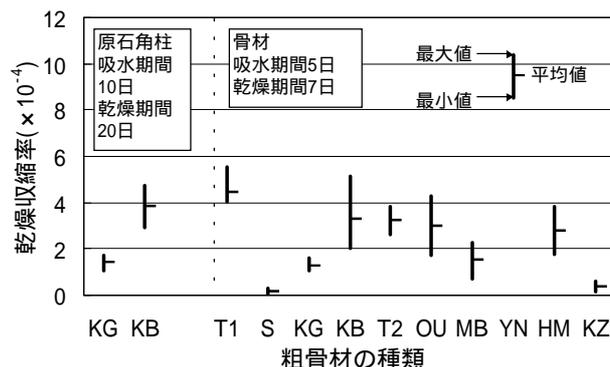


図-1 粗骨材の乾燥収縮率

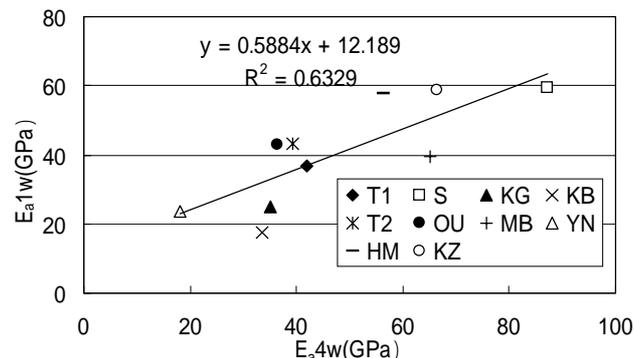


図-2 E_{a1w} と E_{a4w} の比較

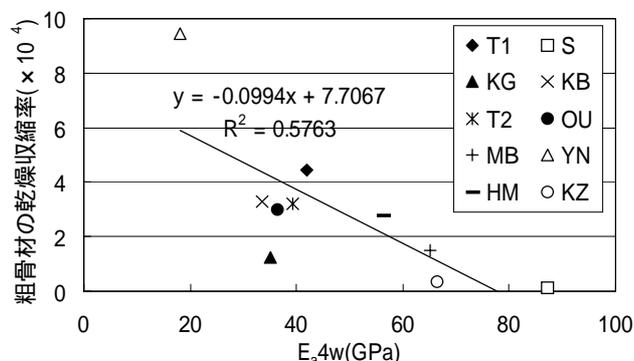


図-3 粗骨材の乾燥収縮率と E_{a4w} の関係

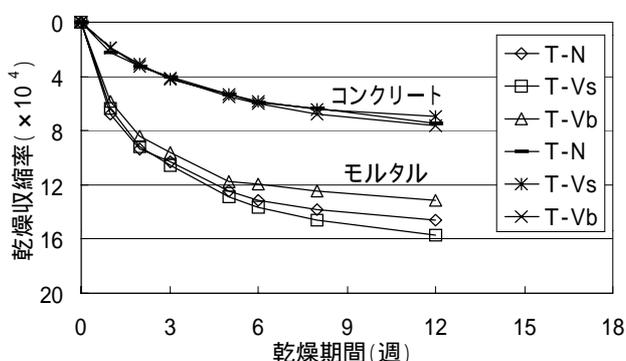


図-4 コンクリートとモルタルの乾燥収縮率

す影響

図 - 4に粗骨材 T2を用いた粗骨材量を変えたコンクリート及びモルタルの乾燥収縮率の経時変化を示す。乾燥期間12週では、収縮はまだ収束には至っていないがほぼ安定した状態になっており、また試験体寸法が乾燥収縮に及ぼす影響は乾燥期間13週以降は小さいという報告⁶⁾もあるので、ここでは乾燥期間12週の結果をもとに論じることとする。図より、コンクリートの乾燥収縮はモルタルより小さく、粗骨材量によらずほぼ同じ値であること、モルタルの乾燥収縮率は細骨材容積の多いモルタルの方が大きいことなどがわかる。

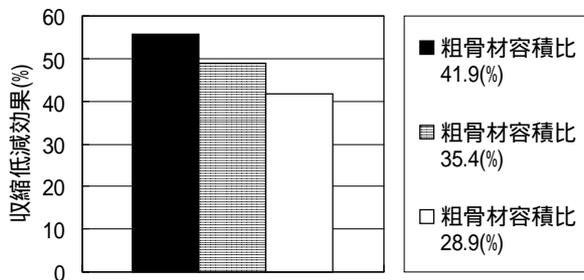


図 - 5 単位粗骨材容積別に見た粗骨材による収縮低減効果 (乾燥期間12週)

ここで、モルタルの収縮率とコンクリートの収縮率の差を、モルタルの収縮率で除したものをコンクリートにおける「粗骨材による収縮低減効果」と定義し、粗骨材量の異なるコンクリートについて求めると、図 - 5のようになる。これより粗骨材容積比が大きいものほど粗骨材による収縮低減効果が大きくなることを確認できる。

3.3 粗骨材の種類がコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響

図 - 6に各粗骨材を使ったコンクリートの収縮率の経時変化を示す。使用粗骨材によりコンクリートの収縮率は異なることがわかる。そこで、乾燥期間12週の各粗骨材の収縮低減効果を図 - 7に示す。粗骨材によってその収縮低減効果は異なっており、この事からコンクリートの乾燥収縮において、粗骨材種類の影響が大きいことがわかる。乾燥期間12週の粗骨材による収縮低減効果と、粗骨材の吸水率、

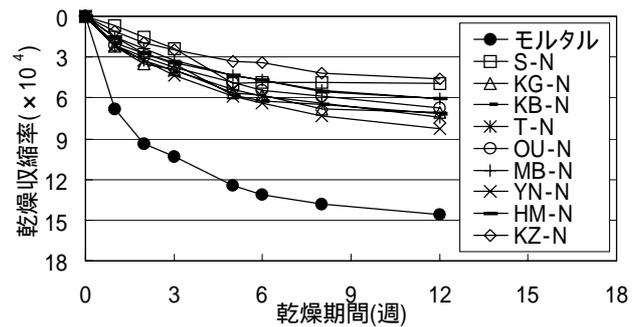


図 - 6 粗骨材種別にみた乾燥収縮率

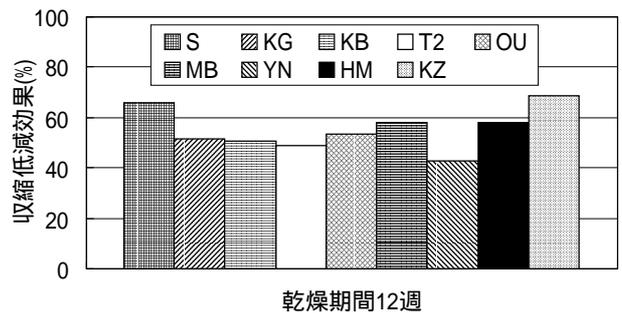


図 - 7 粗骨材による収縮低減効果

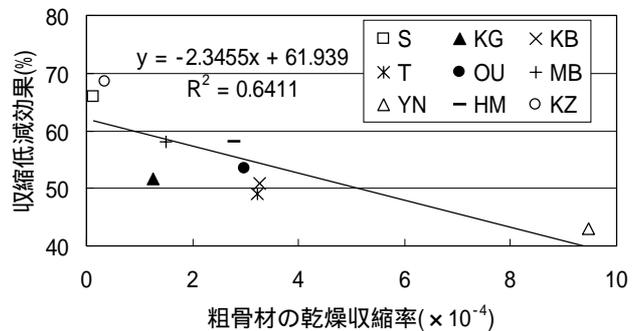


図 - 8 粗骨材の乾燥収縮率と収縮低減効果の関係

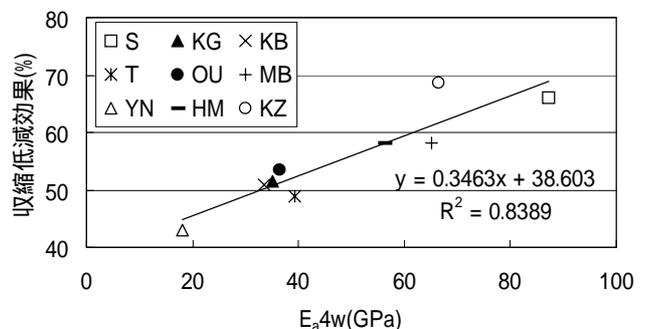


図 - 9 粗骨材の静弾性係数(Ea4w)と収縮低減効果の関係

絶乾密度，乾燥収縮率および静弾性係数との関係を見ると，粗骨材の乾燥収縮率，静弾性係数との相関がよいことがわかった。それら図 - 8，図 - 9 に示す。このように乾燥収縮率が小さく静弾性係数の大きい粗骨材ほどその乾燥収縮低減効果は大きく，その値は骨材 Y N の 4.2 % に対し，骨材 K Z，S では，6.5 ~ 7.0 % になることがわかる。

3.4 乾燥収縮低減剤がコンクリート、モルタルの乾燥収縮率に及ぼす影響

図 - 10 に，乾燥収縮低減剤を用いたコンクリート及びモルタルの乾燥収縮率の乾燥期間12週までの経時変化を示す(粗骨材は，T2)。コンクリート，モルタルともに，どの材齢においても乾燥収縮低減剤を使ったA，B，D，Eの方が収縮率が小さく，乾燥収縮低減剤がコンクリート，モルタルの乾燥収縮低減に大きい効果を持っていることがわかる。乾燥収縮低減剤を粗骨材に含浸させてコンクリートに用いたSOはNと同程度の収縮率を示しており，乾燥収縮低減剤の粗骨材への含浸はあまり効果がないことがわかった。

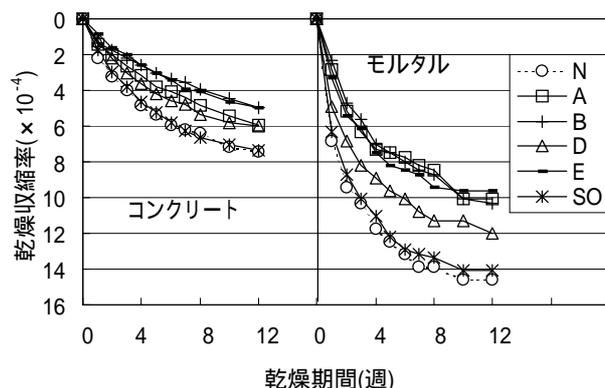


図 - 10 乾燥収縮低減剤を使用したコンクリートとモルタルの乾燥収縮率

乾燥収縮低減剤を用いたコンクリート(またはモルタル)の乾燥収縮率と，用いないコンクリート(またはモルタル)の乾燥収縮率の差を，乾燥収縮低減剤を用いないコンクリート(またはモルタル)の乾燥収縮率で除したものを「乾燥収縮低減剤による収縮低減効果」という指標で定義し考察する。乾燥期間3週と12週の収縮低減剤の収縮低減効果を図 - 11 に示す。乾燥期間によらず，各種乾燥収縮低減剤による収縮低減効果の大きさの順序はほぼ同様であり，また使用量を多くするとその効果が大きくなっている。

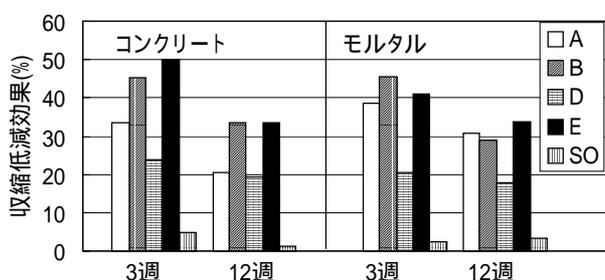


図 - 11 乾燥収縮低減剤による収縮低減効果

また，乾燥収縮低減剤の収縮低減効果は，乾燥初期に大きく，少なくとも乾燥期間12週までは，乾燥期間が長くなると小さくなっていることがわかる。

3.5 各種粗骨材を使ったコンクリートにおける乾燥収縮低減剤の効果

乾燥収縮低減剤を用いないコンクリート及び乾燥収縮低減剤Aを用いたコンクリートの材齢12週における乾燥収縮率を図 - 12 に示す。図より乾燥収縮低減剤Aは粗骨材種類に関わらず一様にコンクリート

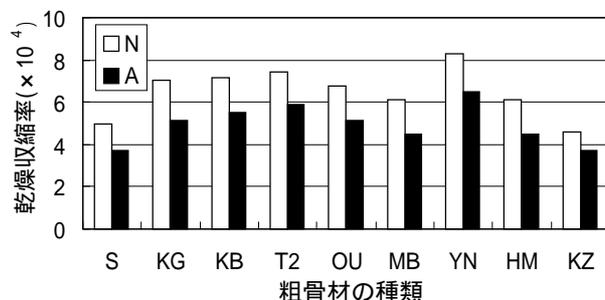


図 - 12 コンクリートの乾燥収縮率(乾燥期間12週)

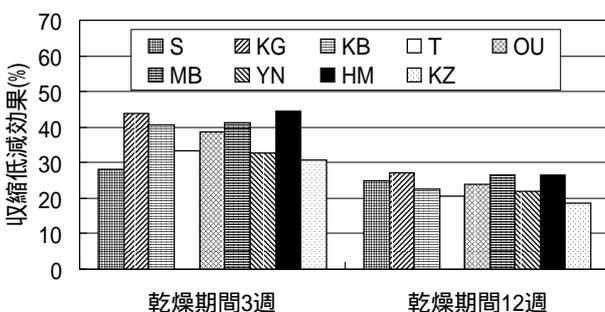


図 - 13 使用粗骨材別にみた乾燥収縮低減剤による収縮低減効果

の乾燥収縮を低減している。各粗骨材を用いたコンクリートに対する乾燥期間3週と12週における乾燥収縮低減剤の収縮低減効果を図 - 13に示す。ここでも同様に少なくとも乾燥期間12週までは、乾燥期間が長くなると乾燥収縮低減剤の収縮低減効果は低くなっているが、乾燥期間12週では、粗骨材種が異なっても、その収縮低減効果は20～25%の範囲であり、粗骨材種別に関わらず、ほぼ同様であると考えられる。

3.6 コンクリートの乾燥収縮率の推定値と実測値

コンクリートの乾燥収縮率の推定式は数多くの研究がなされており、ここでは馬場らによる(3)、(4)で表される複合式²⁾を用いて推定されるコンクリートの乾燥収縮率の推定値と実際に測定した値(実測値)を比較した。

$$sc / sm = [1 - (1 - mn)V_a][n + 1 - (n - 1)V_a] / [n + 1 + (n - 1)V_a] \quad (3)$$

$$m = sa / sm \quad (4)$$

ここに sc : コンクリートの乾燥収縮率,

sm : モルタルの乾燥収縮率,

sa : 粗骨材の乾燥収縮率, 単位はいずれも ($\times 10^{-4}$), 他記号: 式(1), (2)参照とする。

図 - 14にコンクリートの乾燥収縮率の実測値と推定値の比較を示す。図より推定値と実測値はほぼ比例しており、乾燥収縮低減剤を使用したコンクリートの乾燥収縮を、この推定式を用いて予測できることがわかった。しかし、今回の実験において、推定値の方が実測値よりも大きい値を示しており、適切な推定がなされていない可能性が示唆された。

4. 結論

乾燥期間12週までのコンクリートの乾燥収縮において以上のことがわかった。

1. 粗骨材による収縮低減効果は、粗骨材の乾燥収縮率、静弾性係数と大きく関係しており、粗骨材種別によって大きく異なる。
2. 乾燥収縮低減剤は、今回の実験の使用量範囲内

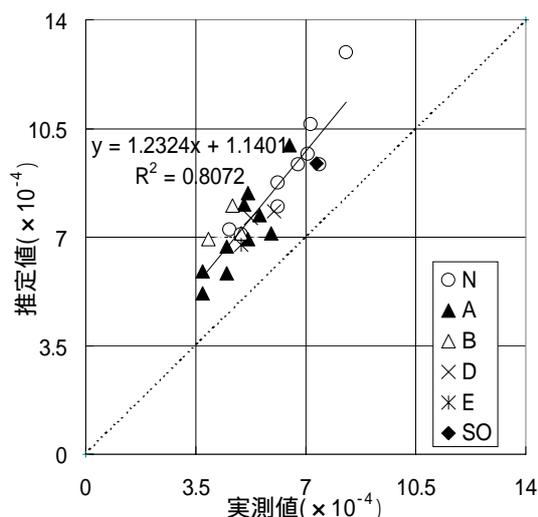


図 - 14 コンクリートの乾燥収縮率の実測値と推定値(乾燥期間12週)

では、使用量を倍にすると収縮低減効果は大きくなり、乾燥期間が長くなると小さくなる。

3. 今回使用した乾燥収縮低減剤による収縮低減効果は、材齢12週では粗骨材の品種に関わらず、20～25%であった。

謝辞: 本研究の実験は、北海道大学大学院の足立裕介君の協力によるものである。ここに記し感謝を示します。

参考文献

- 1) 岸谷孝一他: 建築材料の乾燥収縮機構、セメントコンクリート, No.346, pp.30-40, 1975.12
- 2) 馬場明生: 鉄筋コンクリート建物のひびわれと対策、井上書院「ワンポイント建築技術」pp.37-74
- 3) 阿部道彦: コンクリート用骨材の課題、コンクリート工学, Vol.4, pp.4-7, 1996.7
- 4) 佐藤健他: セメント効果体の乾燥収縮を低減する有機質混和剤の作用機構、セメント技術年報, Vol.37, pp.65-68, 1983
- 5) 趙力采 小林一輔: コンクリートの弾性係数における複合特性、コンクリートジャーナル, Vol.12, pp.27-34, 1974.7
- 6) 江口清他: 複合モデルの段階的適用によるコンクリートの乾燥収縮率の推定、日本建築学会大会学術講演梗概集(材料施工), pp.635-640, 2000.9