論文　品質の異なる再生骨材を組み合わせて使用したコンクリートの力学性状および収縮性状

竹川翔馬[*1]・高巣　幸二[*2]・小山田　英弘[*3]・陶山　裕樹[*4]

要旨：品質の異なる再生細骨材と再生粗骨材の組み合わせによるコンクリートの強度特性や乾燥収縮への影響を検討した。圧縮強度が 30N/mm^2 程度の時は細骨材の品質に影響を受け，細骨材の品質が低い場合は粗骨材の品質は圧縮強度にそれほど影響を与えず，圧縮強度が 50N/mm^2 以上の高強度領域になると粗骨材の品質が圧縮強度に影響を及ぼすことが明らかになった。再生骨材の品質を組み合わせて使用しても，圧縮強度を C/TW で統一的に評価できる可能性が示された。AIJ 式を用いて再生細骨材を使用した乾燥収縮予測値を算出する場合，細骨材の品質ごとに係数を変化させると，より正確に乾燥収縮率を予測できる可能性が示された。

キーワード：　再生骨材，圧縮強度，割裂引張強度，静弾性係数，乾燥収縮率，乾燥収縮予測式

1. はじめに

現代社会では，“エコ”（3R）に対する関心が高まってきており，このことは建築業界においても例外ではない。建設廃棄物は全産業廃棄物排出量の約 2 割を占めるとも言われており，高度経済成長期に建設された多くの建築物の解体に伴い，今後大量のコンクリート塊が発生することが予想され，その再利用の拡大が期待されている。2005 年に再生骨材 H，2007 年に再生骨材 M・L コンクリートが JIS 化され，日本建築学会では 2014 年に指針（案）[1)]を発行して再生骨材コンクリートの使用を積極的に促しているが，必ずしも普及しているとは言い難い状況である。特に再生細骨材を使用した場合および再生細骨材と再生粗骨材を組み合わせたコンクリートの構造体への使用はほとんど見受けられない。再生骨材コンクリートの建築構造物への利用拡大のためには，品質の異なる再生骨材を組み合わせた再生骨材コンクリートの強度・乾燥収縮の予測方法が重要であると考えられる。

本研究では，品質の異なる再生細骨材と再生粗骨材の組み合わせによるコンクリートの強度特性や乾燥収縮への影響を明らかにすることを目的とした。また，再生骨材コンクリートの圧縮強度と乾燥収縮を評価する際，コンクリート中の総水量による統一的な評価および既往の乾燥収縮予測式が適用可能であるか検討した。

2. 実験概要

表－1 に使用材料の物性を示す。セメントは普通ポルトランドセメント，細骨材として海砂と再生細骨材（JIS A 5022 の M 規格，JIS A 5023 の L 規格），粗骨材として砕石と再生粗骨材（JIS A 5022 の M 規格，JIS A 5023 の L 規格）を使用した。なお，使用した再生骨材の原コンクリートの諸元は不明である。**表－2** に配（調）合を示す。本実験では品質の異なる細骨材と粗骨材を組み合わせ，単位水量を 180 kg/m^3 で一定とし，W/C を 50％と 30％の 2 水準とした計 18 調合とした。W/C=50%を 50 シリーズ，W/C=30%を 30 シリーズとし，海砂を使用したものを N シリーズ，再生細骨材 M を使用したものを M シリーズ，再生細骨材 L を使用したものを L シリーズとした。配（調）合記号は細骨材の品質，粗骨材の品質の順に表記しており，例として NL-50 とは海砂と再生粗骨材 L 種を使用した水セメント比 50％のことである。目標空気量は 4.5±0.5％とし，測定項目は圧縮強度，割裂引張強度，静弾性係数，乾燥収縮および細孔容積とした。なお，乾燥収縮と細孔容積の測定は 50 シリーズのみとした。圧縮強度試験は JIS A 1108，割裂引張強度試験は JIS A 1113，静弾性係数は JIS A 1149 に準拠して行った。供試体作製に使用した型枠はφ100×200mm のプラスチック円柱型枠とした。練混ぜ時の骨材は表乾状態のものを使用し，練混ぜは強制二軸練ミキサを用いて行い，練混ぜ時間は 2 分から 6 分の範囲で目標空気量が得られる時間とした。脱型は材齢 1 日に行い，その後 20±1.0℃の水中で目標材齢まで養生した。乾燥収縮試験は JIS A 1129-2 の「モルタルおよびコンクリートの長さ変化試験方法」に準拠し，100×100×400mm の角柱供試体を作製した。打設後材齢 1 日で脱型し，20℃水中養生を 7 日間行った。材齢 7 日に水中から取り出し，ステンレス製チップ(10×10mm)を供試体の両端面に貼り付けた後，両端面をエポキシでシールし，基長を測定した。乾燥収縮を測定する供試体は，温度 20±1.0℃，相対湿度 60±5%の恒温恒湿室で保

*1 北九州市立大学　国際環境工学部建築デザイン学科　大学院生　(学生会員)
*2 北九州市立大学　国際環境工学部建築デザイン学科　教授　工博　(正会員)
*3 北九州市立大学　国際環境工学部建築デザイン学科　准教授　工博　(正会員)
*4 北九州市立大学　国際環境工学部建築デザイン学科　講師　工博　(正会員)

管した。

3. 実験結果および考察

3.1 圧縮強度

図－1 に全配（調）合の圧縮強度結果を示す。全ての試験体において材齢の経過とともに圧縮強度が増進する傾向を示した。50 シリーズの細骨材種類毎に着目すると，細骨材の品質が低下するに従って圧縮強度が小さくなる傾向を示した。N シリーズにおいて材齢 28 日では，NN と比較して NL は強度の低下が見られたが NM は NN と同等の値を示した。M シリーズでは，MN と比較して ML は同等の値を示し，MM は MN よりも高い値を示した。L シリーズでは，LN と比較して LM，LL ともに同等の値を示した。従って，50 シリーズの圧縮強度は細骨材の品質に大きな影響を受け，細骨材の品質が低い場合は粗骨材の品質は圧縮強度にそれほど影響を与えないことが明らかになった。

30 シリーズに着目すると，海砂と再生細骨材 M 種による圧縮強度の違いがほとんど見受けられなかったが，再生細骨材 L 種を使用すると圧縮強度が顕著に低下した。50 シリーズとは異なり粗骨材の品質が低下すると圧縮強度が低下した。従って，圧縮強度が 50N/mm^2 以上の高強度領域になると粗骨材の品質が圧縮強度に影響を及ぼすことが明らかになった。NN に対する LL の圧縮強度低下率は 50 シリーズで約 33%，30 シリーズで約 28%となっており，水セメント比が大きい方が強度低下率は大きくなった。なお，NN-30 の 28 日強度は 91 日に対してかなり低い強度となっており，正確な測定値が得られていない可能性がある。本実験の範囲内で，水セメント比 50 シリーズと 30 シリーズにおいて細骨材の品質と粗骨材の品質が圧縮強度に与える影響が異なっていたが，そのメカニズムの理由を明確にすることができなかったので，今後の検討課題とする。

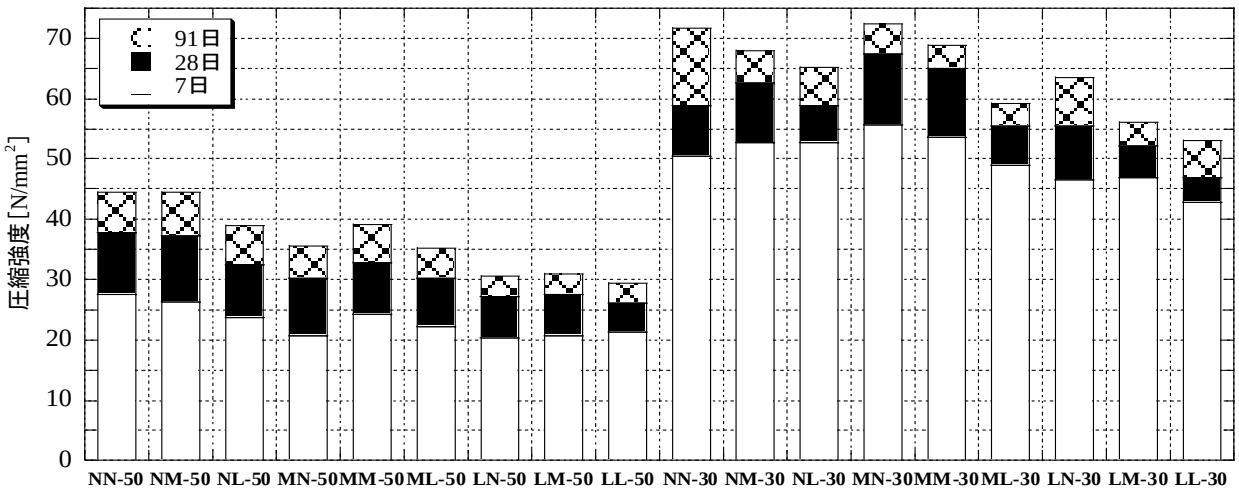
表－1　使用材料

項目	種類	物性	記号
セメント	普通ポルトランドセメント	密度 3.16 [g/cm^3]	C
水	上水道水	－	W
細骨材	海砂（北九州市岩屋沖）	絶乾密度 2.59g/cm^3，粗粒率 2.4 吸水率 0.76 %，実績率 62.3 %	NS
	再生細骨材M種	絶乾密度 2.28g/cm^3，粗粒率 2.6 吸水率 5.93 %，実績率 65.1 %	MS
	再生細骨材L種	絶乾密度 2.01g/cm^3，粗粒率 2.2 吸水率 12.4 %，実績率 73.8 %	LS
粗骨材	砕石（岡垣町上爛）	絶乾密度 2.69g/cm^3，粗粒率 6.9 吸水率 1.41 %，実績率 56.7 %	NG
	再生粗骨材M種	絶乾密度 2.45g/cm^3，粗粒率 6.6 吸水率 2.94 %，実績率 58.2 %	MG
	再生粗骨材L種	絶乾密度 2.30g/cm^3，粗粒率 6.5 吸水率 6.72 %，実績率 55.1 %	LG
混和剤	高性能減水剤	ポリカルボン酸エーテル系	AD1
	AE剤	アルキルエーテル系陰イオン界面活性剤	AD2

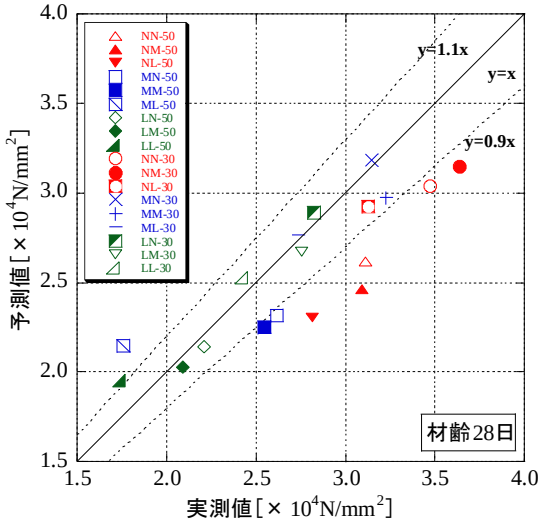
表－2　配（調）合

調合記号	W/C(%)	単位質量(kg/m^3)			
		W	C	S	G
NN-50	50	180	360	802	949
NM-50				802	886
NL-50				802	865
MN-50				749	949
MM-50				749	886
ML-50				749	865
LN-50				700	949
LM-50				700	886
LL-50				700	865
NN-30	30		600	605	949
NM-30				605	886
NL-30				605	865
MN-30				565	949
MM-30				565	886
ML-30				565	865
LN-30				528	949
LM-30				528	886
LL-30				528	865

※LM-50:細骨材の品質 L,粗骨材の品質 M,W/C50 を示す



図－1　圧縮強度



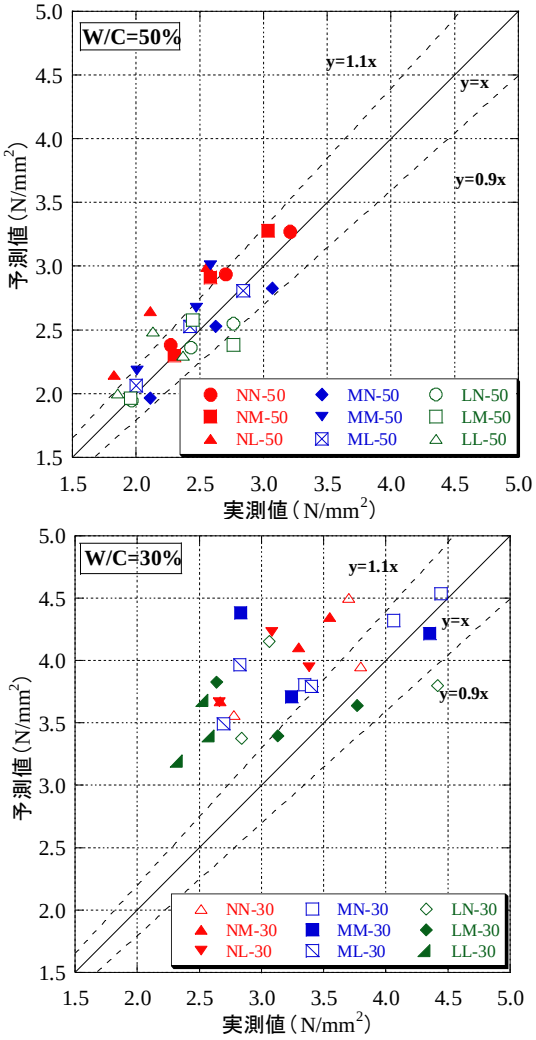
図－2　静弾性係数の実測値と予測値の関係

3.2 静弾性係数

図－2 に材齢 28 日における静弾性係数の実測値と New-RC 式による圧縮強度からの予測値の関係を示す。なお，粗骨材の種類により定まる修正係数 k_1=1.0 とし、コンクリートの単位容積質量で評価した。海砂を使用した調合は 50 シリーズ，30 シリーズともに予測値より実測値の方が大きな値を示しており，再生細骨材を使用した調合の静弾性係数は 50 シリーズ，30 シリーズともに予測値と良好な対応を示した。50 シリーズと 30 シリーズは同様な傾向を示し，圧縮強度のように両者間で違いが生じなかった。また，砕石を使用した場合と比較して再生粗骨材 M 種を使用した場合，静弾性係数の低下は小さく，再生粗骨材 L 種の場合には静弾性係数は大きく低下した。従って，骨材の品質は静弾性係数に影響を与え，再生細骨材・粗骨材ともに L 種を使用することによって静弾性係数が大きく低下することが明らかになった。また，本実験の範囲内では，品質の異なる再生骨材を組み合わせて使用したコンクリートの方が天然骨材コンクリートより New-RC 式の予測値と良好な対応を示すことが明らかになった。

3.3 割裂引張強度

図－3 に材齢 7 日，28 日，91 日における割裂引張強度の実測値と予測値の関係を示す。予測値は，野口ら [2)]によって提案された圧縮強度から割裂引張強度を予測する式により算定した。50 シリーズにおいて，予測値は，概ね実測値と同等の値を示した。30 シリーズに着目すると，実測値と比較して，予測値の方が高い値を示す傾向が見られ，50 シリーズよりも予測値との乖離が多く見られた。従って，再生骨材および天然骨材の使用に関わらず，低水セメント比では実測値と比較して予測値の方が大きくなる傾向にあり，高水セメント比では概ね予測式で割裂引張強度を評価することができると考えられる。



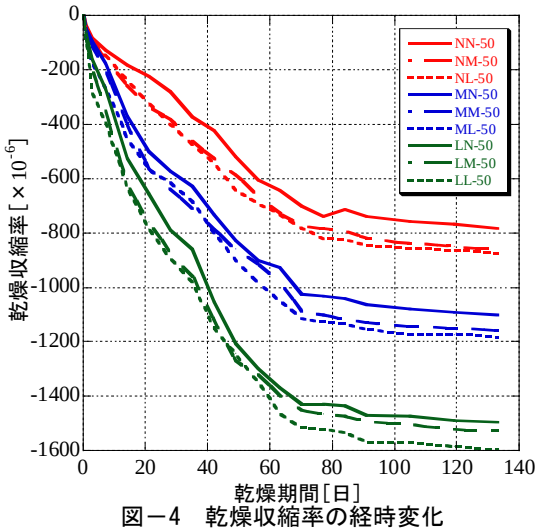
図－3　割裂引張強度係数の実測値と予測値の関係

3.4 乾燥収縮

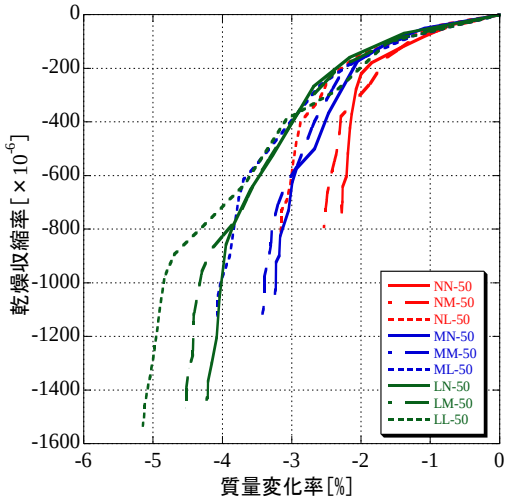
図－4 に 50 シリーズにおける乾燥収縮の経時変化を示す。細骨材の品質ごとに着目すると，品質の低下とともに乾燥収縮率が顕著に大きくなる傾向を示した。粗骨材の品質に着目すると，品質の低下とともに若干の乾燥収縮率の増加が見られるが，粗骨材の品質は乾燥収縮率へ及ぼす影響が小さかった。従って，乾燥収縮率は細骨材の品質が大きく影響を及ぼすことが明らかになった。

図－5 に 50 シリーズにおける乾燥収縮率と重量変化率の関係を示す。同じ乾燥収縮率でも再生細骨材の品質が低下すると重量変化率が顕著に大きくなった。砕石と再生粗骨材 M 種を使用したコンクリートでは重量変化率に大きな違いが生じなかったが，再生粗骨材 L 種を使用すると重量変化率が大きくなった。従って，再生粗骨材は M 種と L 種の品質の違いが重量変化率に及ぼす影響が大きくなることが明らかになった。

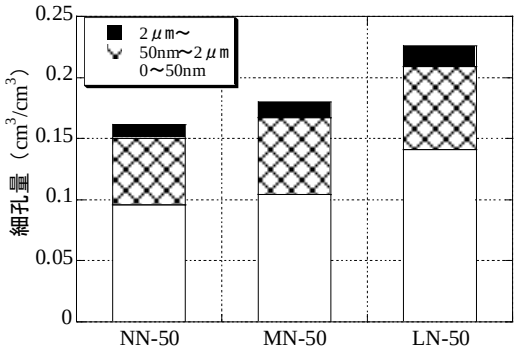
図－6 に材齢 28 日における NN-50・MN-50・LN-50 の総細孔量を示す。全調合において再生細骨材の品質の低下とともに総細孔量が増加する傾向を示し，特に LN-50



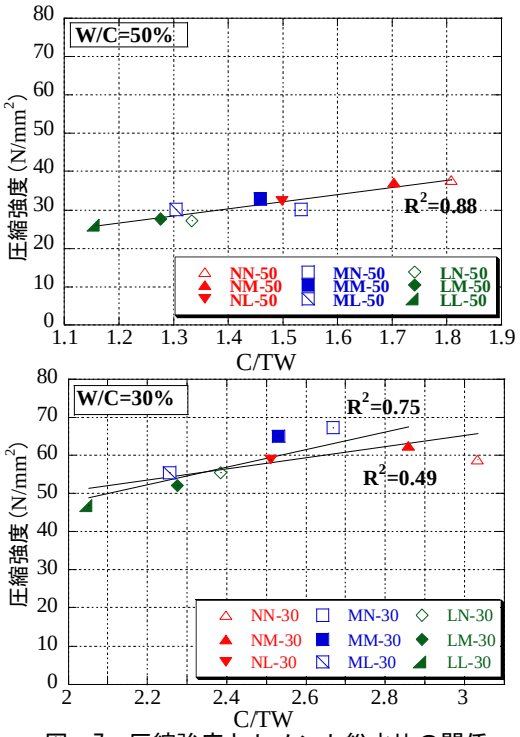
図－4　乾燥収縮率の経時変化



図－5　乾燥収縮率と質量変化率の関係



図－6　細孔量



図－7　圧縮強度とセメント総水比の関係

は，他 2 調合と比較して 0-50nm の細孔量の増加が見られた。従って，0-50nm の範囲の細孔量の増加が乾燥収縮率の増加に影響を及ぼしたと考えられ，この結果は Bentur ら [3]の 30nm 以下の細孔量と乾燥収縮率との間に密接な関係がある実験結果とほぼ一致する。

3.5 コンクリート中の総水量と圧縮強度および乾燥収縮の関係

麓ら [4]の研究によると再生骨材を用いた再生骨材コンクリートの圧縮強度および耐久性は，単位セメント量(C)と骨材の全含水量を考慮したコンクリート中の総水量(TW)の比である C/TW と相関が高いことを明らかにしている。ここで，TW は単位骨材体積と骨材吸水率および骨材絶乾密度の積による骨材中の水量と単位水量の和によって求めている。**図－7** に材齢 28 日における圧縮強度とセメント総水比関係を示す。50 シリーズにおいて，C/TW の増加とともに圧縮強度は増加する傾向を示し，その決定係数は 0.88 となり直線関係を示した。30 シリーズにおいて，概ね C/TW の増加とともに圧縮強度が増加する傾向を示したが，NN-30 の測定値が低かったので，決定係数が 0.49 と低い値を示した。NN-30 の 28 日強度は正確な測定値が得られていない可能性があるので，普通骨材のみを使用した NN-30 の調合を除いたところ，その決定係数は 0.75 となり概ね直線関係を示した。 従って，水セメント比の違いにかかわらず，品質の異なる細骨材と粗骨材を組み合わせた場合でも C/TW による統一的な評価が可能であることが確認された。

図－8 に材齢 91 日における単位セメント容積あたりの乾燥収縮率と C/TW の関係を示す。C/TW の低下とともに乾燥収縮率が増加する傾向を示し，その決定係数は 0.82 となり，直線関係を示した。**図－9** に材齢 91 日における重量変化率と C/TW の関係を示す。乾燥収縮率と同様，C/TW の低下とともに重量変化率が増加する傾向を示し，その決定係数は 0.96 と乾燥収縮率よりもさらに高い値を示し，直線関係を示した。従って，品質の異なる細骨材と粗骨材を組み合わせた場合においても，乾燥収縮率，重量変化率ともに，C/TW による統一的な評価が可能であると考えられる。

3.6　既往の乾燥収縮予測式との対応

品質の異なる再生骨材を組み合わせて使用したコンクリートの乾燥収縮率が，既往の乾燥収縮予測式で評価可能であるかを試みた。今野ら[5]は再生粗骨材に付着するセメントペーストに起因する単位水量の増分と収縮に対する骨材の拘束効果の低減について定式化した結果を土木学会コンクリート標準示方書式に加えた再生コンクリートの乾燥収縮率の予測式を提案している。この提案式を式(1)に示す。

$$\varepsilon'_{cs}(t,t_0)=\left[1-\exp\left\{-0.108(t-t_0)^{0.56}\right\}\right]\cdot\varepsilon'_{sh} \qquad \cdots(1)$$

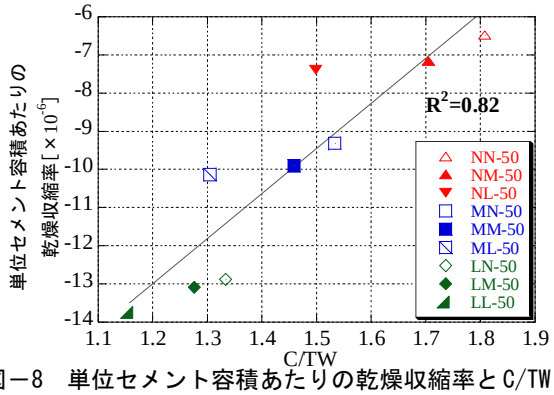
図－10 に今野式による乾燥収縮率の予測値と本実験による実測値の関係を示す。実測値と予測値を比較すると乾燥開始から乾燥収縮率-600μ までは実測値の方が高い値を示し，それ以降は予測値の方が高い値を示しているが，概ね予測値と実測値は一致しており，本実験の範囲内においても，今野式は品質の違う粗骨材を使用した再生コンクリートに対して有効であることが明らかになった。しかし，この予測式は，細骨材の品質については考慮されておらず，再生細骨材を使用した再生骨材コンクリートに対しては適用できない。今回の実験結果から，乾燥収縮には細骨材の吸水率が大きく影響すると考えられるため，今後細骨材の吸水率も考慮した乾燥収縮予測式の提案が必要であると考えられる。

次に AIJ による乾燥収縮予測式[6]を式(2)に示す。

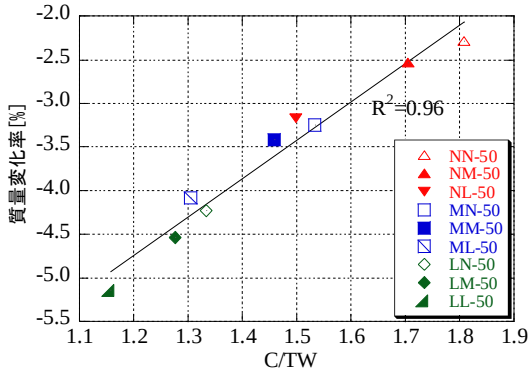
$$\varepsilon_{sh}(t,t_0)=k\cdot t_0^{-0.08}\cdot\left\{1-\left(\frac{h}{100}\right)^3\right\}\cdot\left(\frac{(t-t_0)}{0.16\cdot(V/S)^{1.8}+(t-t_0)}\right)^{1.4\cdot(V/S)^{-0.18}} \qquad \cdots(2)$$

$$k=(11\cdot W-1.0\cdot C-0.82\cdot G+404)\cdot\gamma_1\cdot\gamma_2\cdot\gamma_3 \qquad \cdots(3)$$

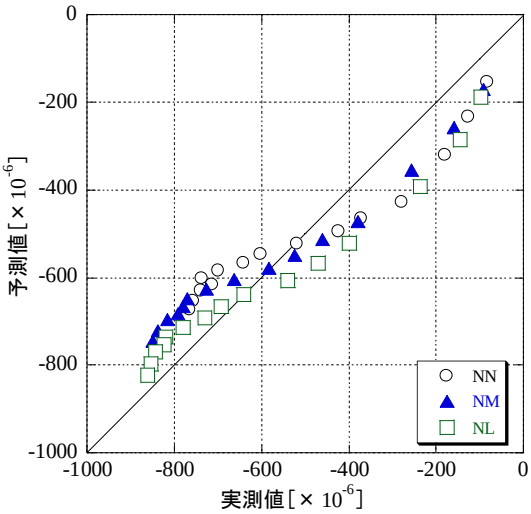
AIJ の乾燥収縮予測式には，骨材の種類によって決まる係数 γ_1 があり，天然骨材は 1.0，再生骨材は 1.4 と設定されているが，再生骨材の品質の違いと再生細骨材および再生粗骨材の区別まで考慮されていない。そこで，細骨材は天然骨材（本研究では海砂）とし粗骨材を砕石，再生粗骨材 M 種・L 種の 3 種類の実測値と予測値を比較した。**図－11** に乾燥収縮率の実測値と予測値を示す。予測式中の γ_1 には，砕石の場合 γ_1=1.0，再生粗骨材の場合 γ_1=1.4 を代入し，骨材の品質に対応した単位粗骨材量の値を使用している。NN 実測値は予測値より若干乾燥収縮率が大きくなっているが概ねよく対応しており，NM 実測値および NL 実測値と予測値は精度よく一致している。従って，細骨材に天然骨材を使用して粗骨材に再生骨材を使用した乾燥収縮予測式は，粗骨材の品質が変化しても既往の AIJ 予測式で適切に評価できると考えられる。次に細骨材の品質を変化させた場合の実測値と予測



図－8　単位セメント容積あたりの乾燥収縮率と C/TW の関係

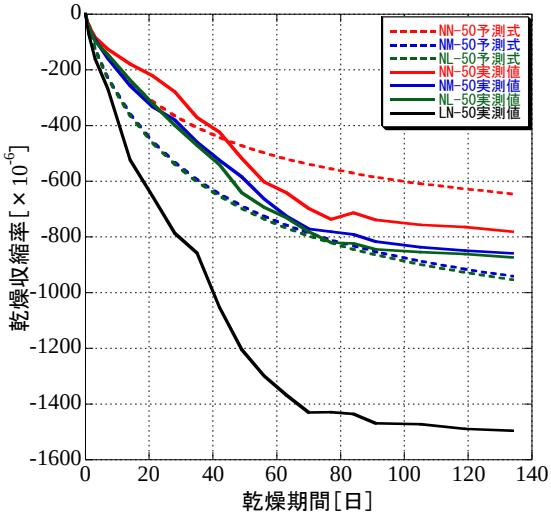


図－9　質量変化率と C/TW の関係

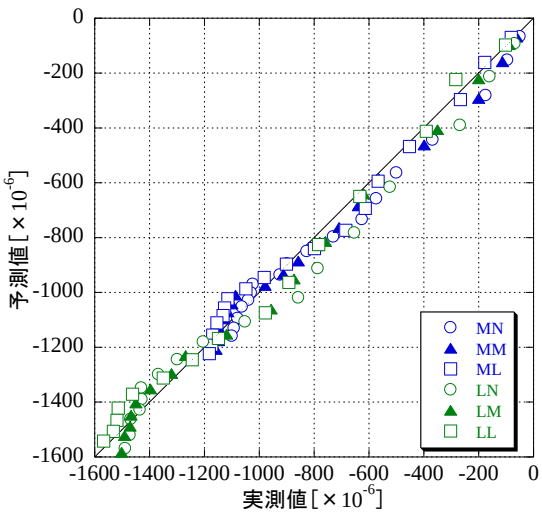


図－10　今野式による乾燥収縮率の予測値と実測値の関係

値を比較したところ，両者の間に大きな乖離が現れた。これは，上述したとおり乾燥収縮率は細骨材の影響を顕著に受けるためであると考えられる。そこで，骨材の種類によって定まる係数 γ_1 を最小二乗回帰により求め，再生細骨材 M 種を使用した場合は γ_1=1.8，再生細骨材 L 種を使用した場合は γ_1=2.5 に設定すると実測値と予測値が最もよく一致した。**図－12** に乾燥収縮率の実測値と予測値の関係を示す。γ_1 を変化させることにより実測値と予測値が同等な値を示し精度よく予測できていることが分かる。従って，本実験の範囲内では AIJ 式を用いて予



図－11　AIJ 式による乾燥収縮率の予測値



図－12　AIJ 式による乾燥収縮率の実測値と予測値の関係

測値を算出する場合，細骨材の品質ごとに γ_1 を変化させた方が，より正確に乾燥収縮率を予測できる可能性が示された。

4.　まとめ

(1) 本実験の範囲内では圧縮強度が 30N/mm^2 程度の時は細骨材の品質に大きな影響を受け，細骨材の品質が低い場合は粗骨材の品質は圧縮強度にそれほど影響を与えず，圧縮強度が 50N/mm^2 以上の高強度領域になると粗骨材の品質が圧縮強度に影響を及ぼすことが明らかになった。再生骨材コンクリートにおいて，高水セメント比では概ね既往の予測式で割裂引張強度を評価することができた。

(2) 再生骨材の品質を組み合わせて使用しても，圧縮強度を C/TW で統一的に評価できる可能性が示された。また，乾燥収縮率，重量変化率においても，C/TW による統一的な評価が可能であることが示された。

(3) 本実験の範囲内では，細骨材に天然骨材を使用して粗骨材に再生骨材を使用した乾燥収縮予測式は，粗骨材の品質が変化しても既往の AIJ 予測式で適切に評価できた。AIJ 式を用いて再生細骨材を使用した予測値を算出する場合，細骨材の品質ごとに γ_1 を変化させると，精度よく乾燥収縮率を予測できる可能性が示された。

謝辞

本研究を遂行するにあたり，平成 26～28 年度科学研究費補助金基盤研究(C)「異種の副産物粉体と再生骨材を複合混合した低炭素コンクリートの高性能化」(課題番号：22760424)の支援を受けて行った。また，実験に際して本学 EA・三倉英史氏，修論生・吉田愛君（現：(株)太平洋セメント），同・河野江真君から協力を得た。末尾に記して謝意を示す。

参考文献

1) 日本建築学会：再生骨材を用いるコンクリートの設計・製造・施工指針（案），2014.10

2) 野口貴文，友澤史紀：高強度コンクリートの圧縮強度と各種力学特性の関係，日本建築学会構造系論文集，No.472，pp.11-16，1995.6

3) A. Bentur，　et al：Influence of Microstructure on the Creep and Drying Shrinkage of Calcium Silicate Pastes, Proceeding of 7th Int. Cong. Chem. Cem (Paris)，　Vol. III, pp.VI-26-31，1980

4) 麓隆行，山田優：再生細骨材の使用がコンクリートの性状に及ぼす影響とその原因について，土木学会論文集，No.767/V-64，pp.61-73，2004.8

5) 今野克幸，佐藤靖彦，桂修，奥山英俊：再生粗骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみの予測，コンクリート工学論文集，第 24 巻，第 3 号，pp.135-148，2013.9

6) 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，pp.53-58，2006.2