論文　振動付与練混ぜによる強度改善に関する基礎的研究

牛尾　仁[*1]・本田　陵二[*2]・渡辺　健[*3]・橋本　親典[*4]

要旨：振動付与２軸強制練りミキサを用い，使用骨材の種類およびW/Cなどの配合条件を変化させ，振動付与練混ぜによる強度改善について実験的に検討した。その結果，振動付与によりコンクリートの簡易断熱温度上昇試験における最高上昇温度が大きくなる骨材の種類および配合条件を確認し，振動付与練混ぜによる強度改善は，水とセメント粒子の接触が多くなる水和活性化および骨材とセメントペースト界面の機械的改善によることが明らかとなった。

キーワード：振動付与練混ぜ，強制２軸ミキサ，再生骨材，簡易断熱温度上昇試験，細孔容積

1. はじめに

コンクリート塊の再資源化率は95%を超えるが，多くは舗装用再生路盤材であり，今後の道路建設の減少，増大するコンクリート塊には対応できない。平成 17～19 年にコンクリート塊を再生するコンクリート用再生骨材H（JISA5021），再生コンクリートM（JISA5022），再生コンクリートL（JISA5023）が制定され，平成 21 年には，コンクリート用再生骨材Hがレディーミクストコンクリート(JISA5308)付属書１に規定された。しかし，コンクリート用再生骨材Hは，再生に多大のエネルギーが必要になり，製造時に発生する多量の微粉の処理方法が十分確立されていない。中品質の再生骨材Mおよび低品質の再生骨材Lは，骨材界面とセメントペーストとの付着が脆弱となり，普通骨材と比較して高吸水率であるが，低コスト・低エネルギーで環境負荷の少ない再生骨材コンクリートが製造できる。しかし，現状では再生骨材M・Lを使用したコンクリートは品質が低く，使用可能な部位・用途に制限があり普及には至っていない。

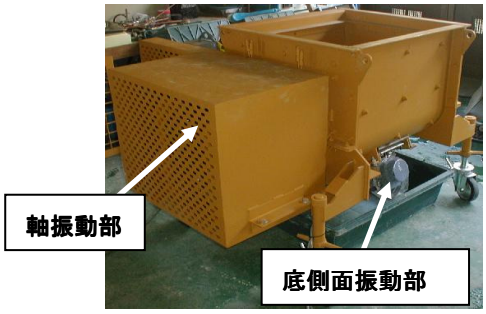
これらの現状を踏まえ，筆者らは全量低品質の再生骨材を使用した再生骨材コンクリートの品質向上を目的に振動付与練混ぜ方法の研究を行ってきた。Nhar ら[1)]は，低度処理再生骨材・粗骨材を用いたコンクリートの練混ぜ途中に棒バイブレーターを挿入することによって骨材の界面が改善され，20%の圧縮強度の増進が図れることを明らかにした。その後，振動付与２軸強制ミキサ（容量 60 リットル）を開発し，低度処理再生骨材コンクリートのフレッシュ性状および硬化性状について実験的に検討した結果，振動付与練混ぜで圧縮強度の増進は図れたが凍結融解抵抗性の向上には至らなかった。江口ら[2)]は，振動付与練混ぜした低度処理再生骨材コンクリートは振動付与しないものと比較してフレッシュ性状が向上し，高いW/Cの場合，15%以上の圧縮増進を得ることを明らかにした。さらに，原コンクリートがＡＥコンクリートか Non-ＡＥコンクリートか不明であっても，W/Cを 30%未満，単位水量 155kg 以下とすることによって普通骨材コンクリートと同様な強度および耐久性を有する再生骨材コンクリートを明らかにし，全量低度処理再生骨材の配合・練混ぜ方法の工夫による高品質化の可能性を示した。

本研究では，60 リットルの振動付与２軸強制練りミキサを用いて，使用骨材およびW/Cなどの材料・配合条件を変化させ，これまでの研究で明らかになっていない振動付与練混ぜによる強度改善の機構を圧縮強度，水和熱および細孔容積の関係から実験的に検討を行った。

2. 実験概要

2. 1 振動付与２軸強制練りミキサ

振動付与２軸強制練りミキサは，ミキサ本体から振動を付与できる底側面振動部および２本の軸部を介してアーム・ブレードから振動を付与できる軸振動部を持つ構造である。振動付与 2 軸強制練りミキサを**写真－1**，ミキサの性能諸元を**表－1** に示す。



写真－１　振動付与２軸強制練りミキサ

*1　（株）セイア　企画開発室　　（正会員）
*2　（株）セイア　企画開発室　博 (工)　　（正会員）
*3　徳島大学大学院ソシオテクノサイエンス研究部助教　博 (工)　（正会員）
*4　徳島大学大学院ソシオテクノサイエンス研究部教授　工博　（正会員）

2. 2使用材料

(1)セメント

セメントは，普通ポルトランドセメント（密度 3.16g/cm^3，比表面積 3380 cm^2 / g）を使用した。

(2) 骨材

骨材の物理特性を**表－2** に示す。再生骨材はコンクリートポールを破砕し，20～5mmおよび 5～0mmに分級した再生粗骨材Ｌ・再生細骨材Ｌを使用した。

(3) 混和剤

混和剤は，リグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸エーテル複合体を主成分とするＡＥ減水剤およびポリアルキレングリコール誘導体を主成分とする空気量調整剤（消泡剤）を使用した。

2.3 配合

本研究に供した示方配合を**表－3** に示す。配合は，W/Cを 40～70%に変えた再生骨材シリーズ，W/Cを一定とし細・粗骨材の組合せを変えた再生骨材・普通骨材組合せシリーズおよびW/Cを 30～60%に変えた普通骨材シリーズとした。配合名は○数字(○○数字)・○数字Ｖ(○○数字Ｖ)とし，数字がW/C，○がＲ－全量再生骨材，Ｎ－全量普通骨材(細骨材，粗骨材の順にＲ－再生またはＮ－普通)を示し，数字後のＶは振動付与を行ったことを示す。

再生骨材コンクリートは，消泡剤を用いて空気量を調整する必要があることが明らかになっている[2)]。本研究では，再生細骨材を用いた配合は空気量を調整するため消泡剤を使用した。普通細骨材を用いた配合は空気量の影響を排除し振動付与の効果を明確にするため，ＡＥ剤，消泡剤ともに使用しなかった。

また，普通粗骨材は 15～20mm：5～15mmを重量比 55：45 で混合使用した。

2.4 練混ぜ方法

練混ぜ方法は，細骨材 1/2→セメント→細骨材 1/2→粗骨材の順にミキサに投入し 30 秒間練混ぜ後，水・混和剤を投入して 90 秒間の練混ぜを行った。振動付与練混ぜの場合は，水・混和剤，投入後から排出までの 90 秒間，振動付与を行った。

2.5 試験項目および方法

(1) スランプ試験

スランプ試験は，JIS A 1101：2005 に準拠して行った。

(2) 空気量試験

空気量試験は，JIS A 1128：2005 に準拠して行った。

(3) 圧縮強度試験

圧縮強度試験は，材齢 7，28 日の供試体φ100mm×ｈ200mm を，JIS A 1108：2006 に準拠して行った。

表－1　ミキサの性能諸元

ミキサ諸元		
機種	Ｎ社製 60 リットル 2 軸強制	
動力	200Ｖ、3.7kw	
軸回転数	45rpm	
振動機構諸元		
部位	軸振動部	底側面振動部
加振力	2.5KN	2KN
振動数	116Hz	56Hz

表－2　骨材の物理特性

	再生骨材		普通骨材		
粒径　(mm)	0～5	5~20	0～5	5~15	15~20
粗粒率	3.33	6.56	2.70	6.21	7.04
表乾密度(g/cm^3)	2.30	2.45	2.59	2.58	2.58
絶乾密度(g/cm^3)	2.14	2.34	2.55	2.54	2.54
吸水率　(%)	7.74	4.49	2.66	1.70	1.59
微粒分量　(%)	6.7	1.6	2.5	0.1	0.1

表－3　示方配合

配合名	スランプ cm	W/C %	空気量 %	s/a %	単位量 (kg/m^3)						ＡＥ減水剤C×%	消泡剤 C×%	練上り温度	
					W	C	再生Ｓ	再生Ｇ	普通Ｓ	普通Ｇ			振動無	振動有
R40・R40Ｖ	18	40	5	46	181	453	662	828	－	－	1.3	0.002	20.9	21
R50・R50Ｖ	18	50	5	48	181	362	723	834	－	－	1.1	0.002	20.2	20.5
R60・R60Ｖ	18	60	5	50	181	302	774	825	－	－	1.1	0.01	22	22.1
R70・R70Ｖ	18	70	5	52	181	259	822	808	－	－	1.1	0.01	20.5	20.6
NN60・NN60Ｖ	18	60	5	50	181	302	－	－	865	872	1.3	0	20.1	20.2
NR60・NR60Ｖ	18	60	5	50	181	302	－	825	865	－	1.1	0	20.3	20.3
RN60・RN60Ｖ	18	60	5	50	181	302	774	－	－	872	1.1	0.01	19.7	20.3
N30・N30Ｖ	18	30	4.5	40	175	583	－	－	613	925	1.0	0	18.7	18.7
N40・N40Ｖ	18	40	4.5	44.3	175	438	－	－	731	925	1.0	0	17.2	17.9
N50・N50Ｖ	18	50	4.5	46.6	175	350	－	－	802	925	1.0	0	17.5	17.5
N60・N60Ｖ	18	60	4.5	48.9	175	292	－	－	864	910	1.0	0	17.4	17.8

(4) 簡易断熱温度上昇試験

簡易断熱温度上昇試験は，振動の有無によるセメント粒子の分散効果を初期の水和熱上昇比較により明らかにするため考案した。試験方法は，W240mm×L240mm×h350mmの厚さ0.2mmのブリキ容器に入れたコンクリートを全面厚さ100mmの発砲スチロールで簡易断熱し，中心部の温度上昇を室温20℃の試験室で試料作製後より7日間，熱電対により 10 分間隔の測定を行った。事前に測定位置による温度差を確認し，試料中心部より試料表面に測定位置が 10mm 動いた場合，0.05℃程度温度が低くなることを確認し，熱電対を中心±10mm以内に設置した。

簡易断熱温度上昇試験の模式図を**図－1**に示す。

(5) 細孔容積測定

コンクリート中の空隙構造を調べるため，材齢 56 日まで水中養生した供試体φ100mm×ｈ200mm の細孔径分布を水銀圧入式ポロシメータにより測定を行った。

3. 実験結果および考察

3. 1 フレッシュ性状

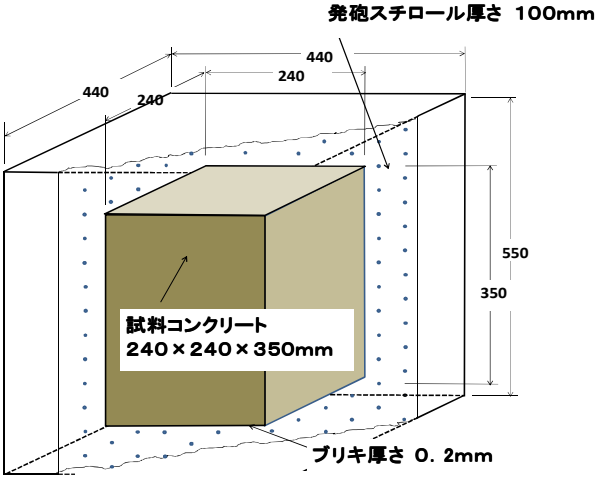
振動付与練混ぜによるスランプおよび空気量に与える影響について，再生骨材シリーズは**図－2** に，再生骨材・普通骨材組合せシリーズは**図－3** に，普通骨材シリーズは**図－4**に示す。

なお，再生骨材シリーズの空気量は空気量試験で得られた見かけ空気量から骨材修正係数の 0.7%を差し引いた値，再生骨材・普通骨材の組合せシリーズの再生細骨材を使用した配合は骨材修正係数の 0.3%を差し引いた値を用いた。

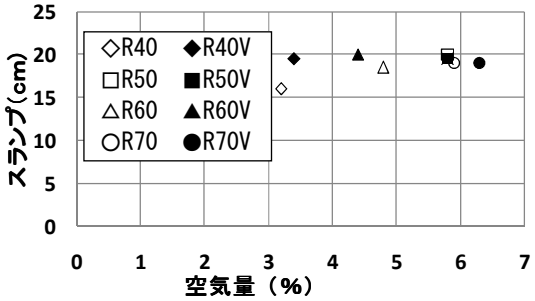
スランプは再生骨材Ｒ50→Ｒ50Ｖ，Ｒ70→Ｒ70Ｖおよび普通骨材Ｎ50→Ｎ50Ｖで差がなく，普通細骨材・再生粗骨材ＮＲ60→ＮＲ60Ｖ，普通骨材Ｎ30→Ｎ30Ｖのスランプは1.5～2ｃｍ減少したが，他６配合は1～3.5ｃｍ増加した。このスランプ増加および減少に空気量の増減による関係は見られず，振動付与練混ぜは再生骨材および普通骨材を使用したコンクリートのスランプを増加させる傾向が認められた。振動付与によるスランプ増加は，普通粗骨材の使用で効果が大きく，W/C30%で効果が無かった。この理由は，再生粗骨材より普通粗骨材の方が練混ぜ中のコンクリートに効果的に振動を伝達できるが，W/C30%の高粘性のコンクリートは振動が減衰されると推察される。

空気量は再生骨材を使用した配合では振動付与の有無による増減に傾向は無いが，普通骨材シリーズは振動付与した場合，空気量が増加した。

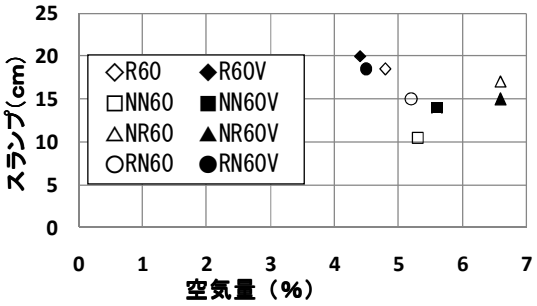
以上の結果から，フレッシュ性状に対しては普通骨材の使用およびW/C40%～60%の配合において振動付与練混ぜの効果が大きいことが明らかとなった。



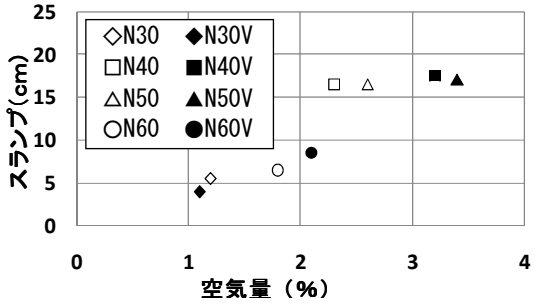
図－1　簡易断熱温度上昇試験の模式図



図－2　スランプと空気量の関係（再生骨材シリーズ）



図－3　スランプと空気量の関係
（再生骨材・普通骨材組合せシリーズ）



図－4　スランプと空気量の関係（普通骨材シリーズ）

3. 2 圧縮強度試験

水セメント比と圧縮強度の関係を**図－5** に振動付与による圧縮強度の増進率（振動有－振動無）/振動無 を**図－6**に示す。W/C60%の場合，全量普通骨材，普通細骨材・再生粗骨材，再生細骨材・普通粗骨材，全量再生骨

材を使用した順に材齢 28 日の圧縮強度は大きくなった。全量普通骨材と全量再生骨材を比較すると全量再生骨材のW/C40%と全量普通骨材W/C60%が 40N/mm² 程度のほぼ同じ圧縮強度となった。したがって，本研究に使用した骨材の場合，普通骨材コンクリートと同じ圧縮強度を全量再生骨材コンクリートで確保するためには，W/Cを 20%，小さくする必要がある。

圧縮強度はすべて振動付与した場合が増進し，材齢 28 日の圧縮強度の増進率は，再生骨材シリーズで 1～7%，再生骨材・普通骨材の組合せシリーズで 1～11%，普通骨材シリーズでは振動付与により空気量が増加したにもかかわらず 1～6%であった。再生・普通骨材シリーズで振動付与した場合の材齢 28 日圧縮強度の増進率が最も大きくなった配合はW/C50%であった。再生骨材・普通骨材の組合せシリーズでは，普通骨材を使用した配合で振動付与による圧縮強度の増進が材齢 7 日で大きい。また，細骨材を普通骨材に置き換えた配合より粗骨材を普通骨材に置き換えた配合の材齢 28 日での振動付与による圧縮強度の増進が最も大きくなった。

圧縮強度の結果からも，練混ぜ中の振動付与効果が大きくなる適切な材料および配合条件があり，本研究においてはW/C50%の配合および普通粗骨材を使用した配合で振動付与効果が大きい傾向となった。

3.3 簡易断熱温度上昇試験

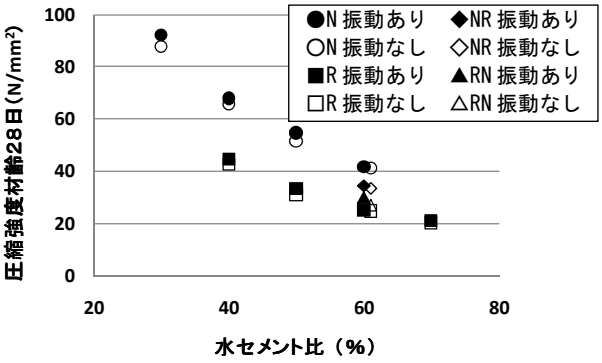
(1) 再生骨材シリーズおよび普通骨材シリーズ

練上り後の上昇温度を再生骨材シリーズは**図－7** に普通骨材シリーズは**図－8** に示す。再生骨材シリーズ・普通骨材シリーズは，低いW/Cの配合順に練上り後の最高上昇温度が大きくなった。最高上昇温度の経過日数 1 日未満の初期領域は，土木学会の予測式[3] とほぼ同じ初期上昇傾向を示し，予測式の終局断熱温度上昇量の 58%～74%となり，高いW/Cの方がその差が大きかった。予測式の終局断熱温度上昇量まで達しない理由は，断熱装置が不完全であり，発生した熱量が放熱したためと考えられる。しかし，水セメント比別の最高上昇温度の順位は，実験値と予測式で一致しており，本研究で用いた簡易断熱温度上昇試験で得られる最高上昇温度は，水和反応の活性度を示す試験として妥当であると考えられる。

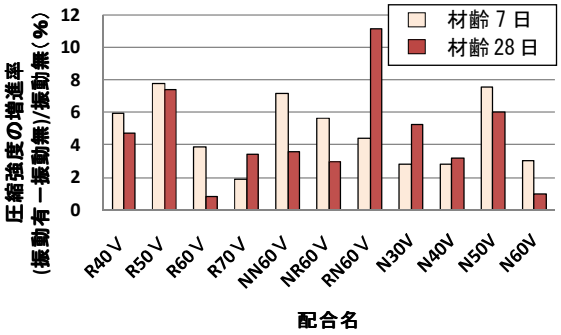
振動付与した場合，再生骨材シリーズのW/C40%および 50%，普通骨材シリーズの全配合で，最高上昇温度は 1～3℃大きかった。また，練上り後 24 時間程度で最高上昇温度に達し，低いW/Cの順に最高上昇温度に達する時間が早くなった。この最高上昇温度が大きく，到達時間が早くなることは，振動付与により硬化中のセメントの水和反応を活発にしていると考えられる。

振動付与によりセメントの水和が活性化するため振動付与しない場合と比べて，最高上昇温度および圧縮強度が大きくなる。この最高上昇温度と圧縮強度の関係を**図－9**，**図－10** に示す。なお，本論文で定義した水和活性とは，振動付与によって付加された温度上昇分の水和活性であり，通常のセメントと水の水和反応とは異なる。

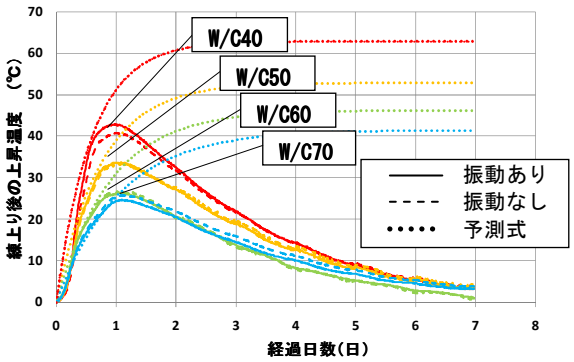
再生骨材シリーズは，最高上昇温度の大きい領域で振



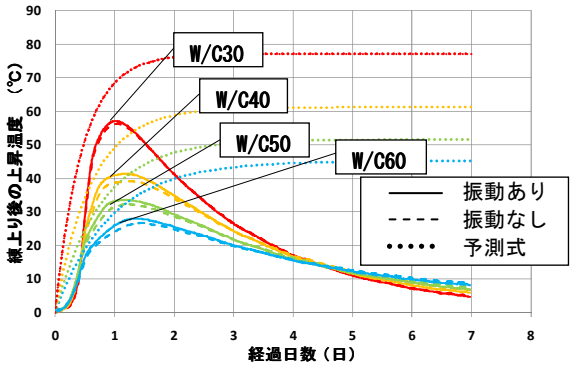
図－5　水セメント比と圧縮強度の関係



図－6　振動付与の有無による圧縮の増進率



図－7　再生骨材シリーズの温度上昇



図－8　普通骨材シリーズの温度上昇

動付与することにより最高上昇温度が上昇し，圧縮強度が大きくなるが，最高上昇温度が 35℃以下の領域では，振動付与による最高上昇温度と圧縮強度の関係がなくなる。しかし，この領域においても圧縮強度が増進するのは，振動付与によるコンクリート中の再生骨材と新セメントペースト界面の品質改善効果である考えられる。最高上昇温度が 35℃の領域に相当するW/C50%の配合では，振動付与による 15%以上の圧縮強度増加が報告[2)]されているが，本研究では 1～7%の圧縮強度増加となった。この原因は本研究で使用した再生骨材の原コンクリートが配合目標強度 70 N/mm^{2}を超えるコンクリートポールで，骨材に付着したモルタル・ペースト分が高品質となり新セメントペーストと再生骨材の界面の品質改善効果が少ないことが考えられる。

普通骨材シリーズでは，振動付与により最高上昇温度が大きくなると圧縮強度が大きくなる関係は明確であった。再生骨材シリーズで最高上昇温度と圧縮強度の増進関係がなかった最高上昇温度 35℃以下の領域においても圧縮強度が大きくなることから，普通骨材を使用した配合の振動付与による圧縮強度の増進は，セメントペーストと骨材界面の改善よりもセメントの水和活性化の寄与が大きいと考えられる。

振動付与による圧縮強度増進効果の概念図を**図－11**に示す。「振動なし」より最高上昇温度が大きい右肩上りに「振動あり」が位置する場合、セメントの水和活性化により圧縮強度が大きくなる。「振動なし」より最高上昇温度が小さい左肩上りに「振動あり」が位置する場合、骨材界面の改善により圧縮強度が大きくなる。

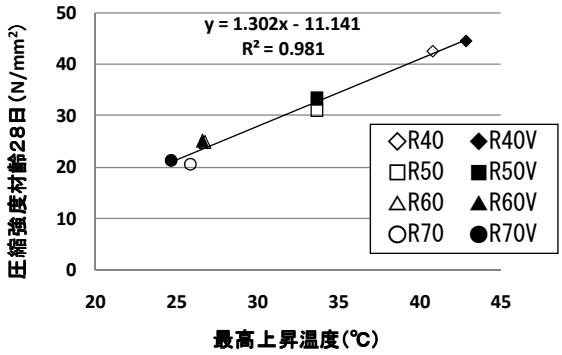
界面改善領域において振動付与により最高上昇温度が大きくならないのは，W/Cの高い配合において再生骨材による水和阻害が生じていると考えられる。

なお，図-11 で説明した界面改善領域と水和活性領域は，本来分離することはできない。なぜなら，セメントの水和反応によって骨材とセメントの遷移帯が強固になるからである。本論文では，振動付与によって最高温度が上昇する場合と上昇しない場合があることから，水和活性効果と界面改善効果をトレードオフの関係にあると仮定し，考察した。この仮設の妥当性については，今後の検討課題である。

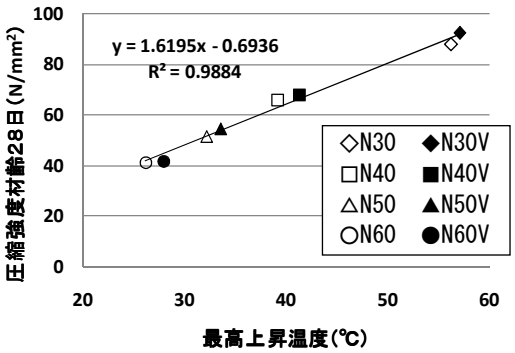
(2)再生骨材・普通骨材の組合せシリーズ

再生骨材・普通骨材の組合せシリーズの練上り後の上昇温度を**図－12**に示す。差は小さいが普通骨材，普通細骨材・再生粗骨材，再生細骨材・普通粗骨材，再生骨材の順に練り上がり後の最高上昇温度が大きくなった。

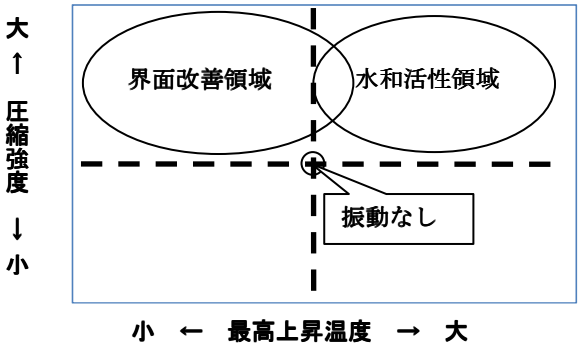
振動付与練混ぜを行った場合，普通骨材および再生細骨材・普通粗骨材で最高上昇温度が 1～2℃大きい結果となった。再生粗骨材を使用した配合では，振動練混ぜによる最高上昇温度の差はなかった。この結果から，普通粗骨材は再生粗骨材より振動付与による水和活性化の効果が大きいことが明らかとなった。



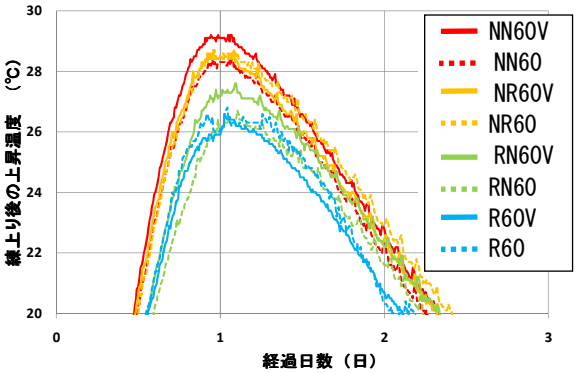
図－9 最高上昇温度と圧縮強度の関係(再生骨材)



図－10 最高上昇温度と圧縮強度の関係(普通骨材)



図－11　振動付与による圧縮強度増進効果の概念図



図－12　再生骨材・普通骨材組合せシリーズの温度上昇

(3)単位セメント量と最高上昇温度の関係

単位セメント量と最高上昇温度の関係を**図－13** に示す。なお，同じ単位セメント量は上昇温度として平均値を用いた。この関係から，単位セメント量 350～450 kg/m^3 で振動付与による最高上昇温度が大きくなることが認められた。単位セメント量 350～450 kg/m^{3}はW/C40～50%に相当し，この領域では振動付与により水とセメントの接触が増え，セメントの水和を活性化している。しかしながら，単位セメント量 600 kg/m^{3}程度の配合はその粘性により振動が減衰し，最高上昇温度の差は小さく，単位セメント量 300 kg/m^{3}以下の配合は振動による最高上昇温度が大きくなることは認められない。

3.4 細孔容積と圧縮強度の関係

再生骨材シリーズの 50nm～2μmの細孔容積と圧縮強度材齢 28 日の関係を**図－14** に示す。圧縮強度が低いほど 50nm～2μmの細孔容積が大きい関係は，再生細骨材を使用したモルタルの既往の研究[4] と同様であり，良い相関を示した。

練混ぜ中の振動付与により 50nm～2μmの細孔容積は増加し，高いW/Cの配合ほど増加は大きい。この増加した細孔容積は新ペースト部であると考えられる。本研究では，振動付与による 50nm～2μmの細孔容積の増加ともに圧縮強度も増進する関係となり， 振動付与による強度増加は，50nm～2μmの細孔容積と強度の関係[4] では説明できない。振動付与による 50nm～2μmの細孔容積の増加は高いW/Cの配合において大きく，この領域での圧縮強度増進は再生骨材とセメントペースト界面の品質改善効果であると判断される。振動付与練混ぜによる再生骨材コンクリートの圧縮強度の増加は，細孔 50nm～2μmの領域が減少したことによるものではなく，Zhang[5] らの軽量骨材コンクリートの多孔質な軽量骨材表面とセメントペーストの機械的絡みによって界面が緻密化したためと考えられる。

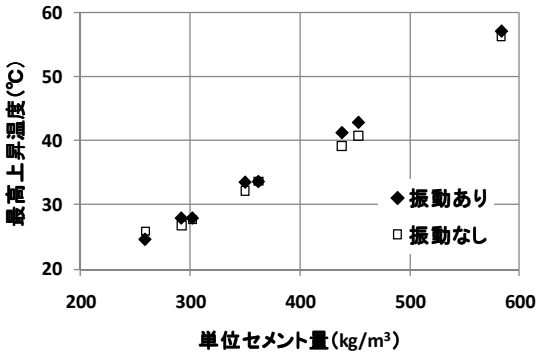
4. まとめ

本研究の範囲内で得られた知見を以下に示す。

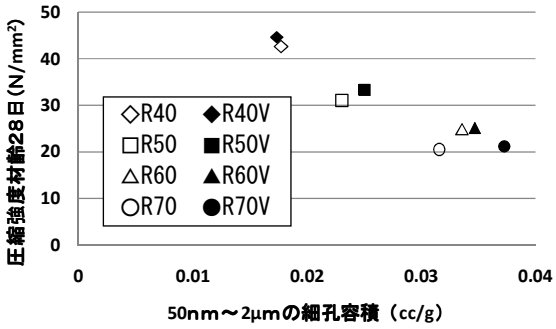
(1)普通骨材コンクリートの振動付与練混ぜは，スランプの増加および圧縮強度の増加が認められ，圧縮強度の増加は振動付与によるセメント粒子の水和活性化によって生じると考えられる。

(2)再生骨材コンクリートの振動付与練混ぜによる圧縮強度増加の効果は，W/C50%以下の領域では振動付与によるセメント粒子の水和活性化の寄与が大きい。一方，W/C50%を超える領域では再生骨材と新セメントペースト界面の機械的改善であると考えられる。

(3)再生骨材を使用した高いW/Cのコンクリートを振動付与練混ぜした場合，最高上昇温度が大きくならないのは，水和反応の阻害が考えられる。



図－13　単位セメント量と最高上昇温度の関係



図－14　50nm～2μmの細孔容積（cc/g）と材齢 28 日圧縮強度の関係

参考文献

1) NHAR HENG，渡辺健，橋本親典，上田隆雄：振動付与練り混ぜ工法が低度処理再生骨材コンクリートの品質に与える影響，セメント・コンクリート論文集，No.58，pp.525-532，2004

2) 江口正晃，NHAR HENG ,渡邉健,橋本親典：骨材全量を再生細・粗骨材Ｌを用いたコンクリートの硬化性状に関する基礎的研究,コンクリート工学年次論文集,Vol.30,No.2,pp.385-390,2008.4

3) 土木学会コンクリート標準示方書設計編 p.342-343, 2007 年制定

4) 佐川康貴，松下博通，川端雄一郎：細孔容積に着目した再生骨材コンクリートの中性化および塩分浸透性状の評価，コンクリート工学，Vol.47，No.2，pp.21-29，2009.2

5) Mino-Hong Zhang and odd E.Gjorv: Microstructure of The Interfacial Zone Between Lightwiehgt Aggregate and Cement Paste, Cement and D concrete Research, Vol.20, pp. 610-618, 1990