

論文 骨材中の水分が再生骨材コンクリートの強度に及ぼす影響に関する研究

佐川 康貴*1・真壁 央稔*2・濱田 秀則*3・池田 隆徳*4

要旨: 本研究は再生粗骨材を使用したコンクリートにおいて、再生骨材中の水分が圧縮強度に及ぼす影響を評価するため、含水状態の異なる再生粗骨材を用い、異なる条件において養生した再生骨材コンクリート供試体の強度発現性について検討を行った。また、X線CT画像およびビッカース硬度の測定により、水分が滲出することを間接的に明らかにした。プレウェッティングした再生骨材に含まれる水分が、練混ぜ時に水セメント比を増大させること、高吸水率の骨材を使用したコンクリートにおいて、骨材周辺のセメントペースト部にはビッカース硬度が低く空隙構造が粗な部分が形成されることを明らかにした。

キーワード: 再生骨材, 再生骨材コンクリート, 吸水率, 水分移動, 空隙構造

1. はじめに

近年、あらゆる分野において環境に配慮した社会へ向けての取り組みが推進されている。コンクリート分野においては、環境性能を評価する動きが始まっている^{1), 2)}。コンクリート塊の再利用については、コンクリート用再生骨材 H, M, L が JIS 化されている。また、JIS A 5308「レディーミクストコンクリート」の改正により、再生骨材 H が普通コンクリートおよび舗装コンクリートに使用可能であることが規定された。しかし、再生骨材 H のような高品質な再生骨材の製造については、コスト、微粉の処理の問題や、製造箇所に関する制約がある。よって、中品質～低品質の再生骨材、すなわち再生骨材 M や L の更なる利用が必要である。

再生骨材コンクリートの強度および耐久性は、普通骨材を使用したコンクリートと比べ低下することが多くの研究者によって報告されている³⁾。また、麓らは、再生骨材を用いたコンクリートの強度および耐久性は、再生骨材に含まれる水量を加味した総水量 TW と単位セメント量 C の比、すなわちセメント総水量比 C/TW によって一義的に評価できることを報告している⁴⁾。また、筆者らも再生骨材を使用したコンクリートまたはモルタルの強度・耐久性に関して、 C/TW によって概ね評価可能であることを示している⁵⁾。さらに、再生コンクリートの空隙構造に関して、筆者らは、新ペースト部の 50nm～2μm の細孔容積が強度および物質透過抵抗性と良い相関があることを示しており⁶⁾、再生コンクリートの強度・耐久性のメカニズムとして、再生骨材中の水分が新ペースト部に滲出する可能性について述べている。

以上より、再生骨材中の水分がコンクリートの強度低

下および空隙の粗大化に影響を与えていることは明らかである。しかしながら、再生骨材中の水分の作用機構に関しては、十分に明確ではない。つまり、再生コンクリートの強度低下メカニズムについても、十分に明らかではないと言える。

そこで本研究では、再生骨材コンクリートの強度低下メカニズムの解明に向け、高吸水率の再生骨材とペースト間の水分移動現象を実験的に明らかにすることを目的とした。まず、含水状態および養生条件の異なる再生骨材コンクリートの強度特性から間接的に骨材とペースト間での水分移動について考察した。その上で、高吸水率骨材と周囲のペーストを模擬したモデル供試体を用い、骨材とペーストの境界近傍における物性の変化について検討した。

2. 骨材の含水率が再生骨材コンクリートの強度に及ぼす影響の検討

2.1 目的

本研究では、再生骨材中の水分の挙動を把握するため、含水状態の異なる再生粗骨材を用いたコンクリートおよびそれをウェットスクリーニングしたモルタルに対して養生条件を変化させ、これらの圧縮強度の相互比較した。その結果より、ウェットスクリーニングした再生骨材に含まれる水分の影響について考察を行った。

2.2 使用材料

使用材料の種類および物理的性質を表-1 に示す。本研究で用いた再生粗骨材は、建設から約 40 年経過した橋梁の解体時に発生したコンクリート塊を、ジョークラッシャーで一次破砕、インパクトクラッシャーで二次破砕

*1 九州大学大学院 工学研究院 建設デザイン部門 准教授 博士 (工学) (正会員)

*2 九州大学 工学部 地球環境工学科 建設都市工学コース (非会員)

*3 九州大学大学院 工学研究院 建設デザイン部門 教授 博士 (工学) (正会員)

*4 九州大学大学院 工学府 建設システム工学専攻 修士 (工学) (正会員)

表-1 使用材料の種類および物理的性質

材料	種類および物性値
セメント C	普通ポルトランドセメント 密度:3.16g/cm ³ ,比表面積:3360cm ² /g
細骨材 S	海砂 絶乾密度:2.53g/cm ³ ,吸水率:1.92%
粗骨材 G	碎石2005 絶乾密度:2.87g/cm ³ ,吸水率:0.81%
	再生粗骨材 絶乾密度:2.32g/cm ³ ,吸水率:5.29%
混和剤	AE減水剤 (リグニンスルホン酸系)
	AE剤 (アルキルエーテル系)

し、製造したものである。密度および吸水率のみで JIS 規格により区分すると再生粗骨材 L に該当する。再生粗骨材は、24 時間吸水後、表面乾燥飽水状態（表乾状態）にしたものと、105°C で 24 時間乾燥させた絶乾状態のものを使用した。

なお、セメントには普通ポルトランドセメントを、細骨材には海砂を、普通骨材には碎石 2005 を使用した。

2.3 配合

これまでの再生骨材コンクリートに関する研究では、単位水量 W と骨材（細骨材と粗骨材）の含水量との和を TW と表わしてきたが、本研究では、再生粗骨材中の水分量と単位水量の和を TWG と定義し、TWG を単位セメント量で除したものを TWG/C とした。TWG/C を一定とした配合と水セメント比 W/C を一定とした配合の 2 種類の配合でコンクリートを作製した。以下に、配合決定の詳細な手順を示す。

まず、普通粗骨材を使用し、水セメント比 W/C=50% でスランプ 10±1cm、空気量 4.5±1% が得られるように単位水量および細骨材率を決定した。この配合は TWG/C=53% となるため、配合名を N-53 とした。

次に、粗骨材体積一定の条件で、N-53 の粗骨材の全てを表乾状態の再生粗骨材としたものを Rs-63 とした。混和剤使用量一定のため、Rs-63 では、スランプは 7.0cm に低下した。なお、配合 Rs-63 では TWG/C は 62.8% である。

さらに、絶乾状態の再生粗骨材を使用し、W/C=62.8%

となる配合を Rd-63 とした。すなわち、Rs-63 と Rd-63 では TWG は同じであるが、再生細骨材の吸水率に相当する水を、再生骨材に含ませて用いる (Rs) のと、単位水量として与える (Rd) のが異なる。

最後に、TWG/C=62.8% となる普通骨材を用いた配合を N-63 とした。このコンクリートの W/C は 59.3% である。表-2 にコンクリートの示方配合を示す。なお、表中には TWG の値をカッコ内に併記している。

また本研究では、各配合について、練混ぜ直後に 5mm ふるいでウェットスクリーニングしたモルタルを作製した。

2.4 供試体および試験方法

圧縮強度試験用の供試体は、コンクリートは φ100×200mm、ウェットスクリーニングしたモルタルは φ50×100mm の円柱供試体とした。供試体は打設後 24 時間で脱型し、温度 20°C での標準養生 (W) もしくは封緘養生 (S) を行った。圧縮強度試験は、材齢 7, 28 日で行い、供試体の本数は各要因ごとに 3 本とした。

以下では、供試体名は、「配合名」-「養生方法 (W or S)」の形で表記する。また、ウェットスクリーニングを行った供試体には添え字 m を付した。

2.5 実験結果および考察

圧縮強度試験の結果を表-3 に示す。各供試体の圧縮強度の試験値は、3 本の平均値に対し概ね ±5% 以内の値となった。結果および考察を要因ごとに以下に記す。

(1) 含水量の差異による強度への影響

標準養生を行ったコンクリート供試体の圧縮強度を図-1 に示す。N-53-W と Rs-63-W の圧縮強度を比べると、Rs-63-W の方が小さい。よって、水セメント比 W/C が同じであれば、再生骨材コンクリートは普通骨材使用コンクリートより強度が小さくなることが明らかとなった。強度の低下原因として、骨材の含水量の他に、骨材自身の強度の影響が考えられる。すなわち、低品質の再生骨材の場合には、付着モルタルの影響により骨材自身の強度が小さく、コンクリート強度にも影響を及ぼすと考えられる。しかし、本研究では W/C=50~60% の普通強度レベルを対象としているため、含水量の方が影響が大きいものと仮定し、以下の考察を進める。

表-2 コンクリートの示方配合とスランプおよび空気量の試験結果

配合	粗骨材最大寸法 (mm)	水セメント比 (%)	TWG/C (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m ³)				AE減水剤 (g)	AE剤 (ml)	スランプ (cm)	空気量 (%)
					W (TWG)	C	S	G				
N-53	20.0	50.0	53.0	45.5	175 (189)	350	786	1054	1094	14	11.0	5.4
Rs-63		50.0	62.8	45.5	175 (220)	350	786	890	1094	14	7.0	4.2
Rd-63		62.8	62.8	48.8	220 (220)	350	786	845	1094	14	11.0	4.5
N-63		59.3	62.8	46.9	175 (185)	295	830	1054	922	12	8.0	5.7

次に、Rd-63-W と N-63-W を比べると、TWG/C が同じにも関わらず、Rd-63-W の圧縮強度が若干高い。これは、絶乾骨材がセメントペースト中の水分を吸収し、Rd-63-W のモルタルマトリックス中の水セメント比が見かけ上低下したためと考えられる。

(2) ウェットスクリーニングモルタルの強度の比較

ウェットスクリーニングモルタルの強度を図-2 に示す。再生骨材コンクリートをウェットスクリーニングしたモルタルの Rsm-63-W と Rdm-63-W には、大きな差が認められなかった。すなわちモルタルのスクリーニング後の実質の W/C に大きな差がないことが推察される。このことより、表乾状態で用いた再生粗骨材からは、水分が滲出し、絶乾状態で用いた再生粗骨材は、水分を吸収したと考えられる。

また、両モルタル供試体の 28 日強度は約 42.5N/mm² である。ウェットスクリーニングモルタルの実質の水セメント比の推定のため、海砂モルタルの W/C を変化させ圧縮強度と C/W の関係を求めた。その結果によると、強度 42.5N/mm² は概ね W/C=60% のモルタルの 28 日強度に相当する。つまり、練混ぜ時において再生骨材は、表乾状態で用いると水分滲出し、絶乾状態で用いると吸水の効果を持ち、水分滲出効果の方が大きいと言える。

(3) 養生条件が強度に及ぼす影響

養生条件の異なる再生コンクリート供試体の圧縮強度を図-3 に示す。

図より、各供試体で強度に差が生じていることが分かる。前述の通り、練混ぜ直後は Rs-63-S と Rd-63-S で、骨材外の水分は同量であると考えられたので、圧縮強度の差異は養生期間中の水分移動によって生じたものと考えられる。

また、材齢 7 日から 28 日にかけての強度の増加量を比較すると、材齢 7 日では、Rs-63-W は Rd-63-W より強度が大きいのに対し、材齢 28 日では Rd-63-W の強度の増加量が大きく、Rs-63-W の強度に近づいている。また、Rs-63-S と Rd-63-S を比較すると、材齢 28 日における強度差は、材齢 7 日の時点よりも大きくなっている。これは、Rs-63-S に関しては、自己養生効果により強度が増進する⁷⁾のに対し、Rd-63-S は、Rs-63-S と骨材外の水分量が同量にもかかわらず、自己養生効果が低いことを示している。これらのことより、絶乾骨材は練混ぜ時に吸水したと考えられるが、養生期間において再度モルタルマトリックスに水分が滲出することはないと考えられる。

以上の圧縮強度試験結果の相互比較により、練混ぜ時における水分移動を間接的に確認することができた。

表-3 圧縮強度試験結果(N/mm²)

	コンクリート				ウェットスクリーニングモルタル	
	標準養生		封緘養生		標準養生	
	7日	28日	7日	28日	7日	28日
N-53	30.2	37.4	27.3	36.7	33.9	47.2
Rs-63	28.2	34.8	29.2	36.6	34.4	42.9
Rd-63	24.7	33.2	27.5	31.1	32.3	42.4
N-63	22.7	32.2	23.2	30.8	22.2	39.5

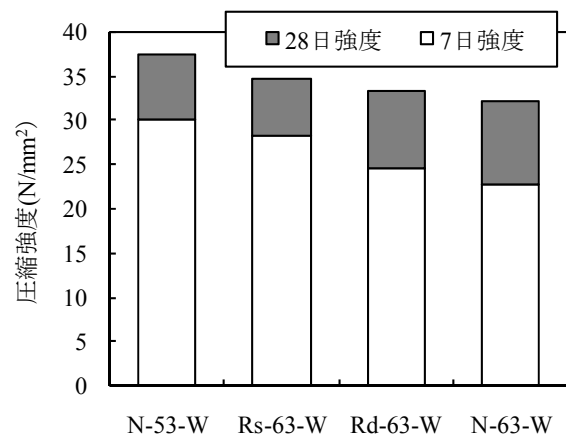


図-1 圧縮強度の比較 (標準養生)

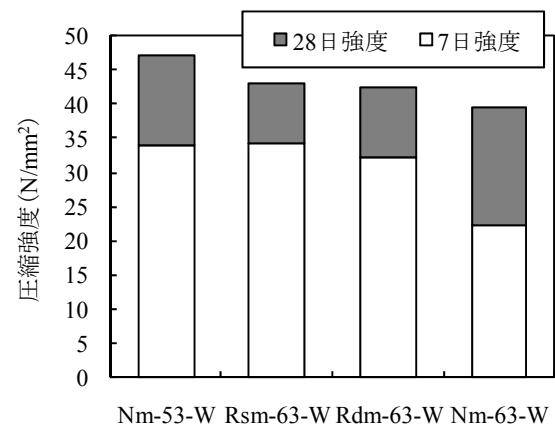


図-2 圧縮強度の比較 (モルタル)

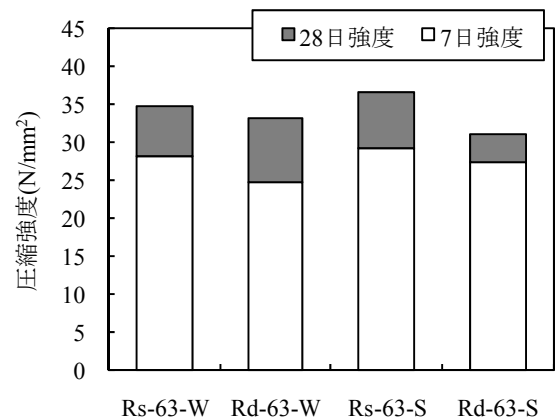


図-3 圧縮強度の比較 (養生条件の影響)

3. 水分移動の可視化に関する検討

3.1 目的

含水状態の異なる再生粗骨材を用いたコンクリートの圧縮試験の結果、再生粗骨材とモルタルマトリックス間で水分移動が生じていることが推察された。そこで、水分移動の観察を行うため、X線CTスキャナによる可視化を試みた。

3.2 使用材料および供試体

本実験では高吸水率骨材とセメントペーストの境界領域を模擬したモデル供試体によって、水分移動の評価を行った。高吸水率骨材のモデルとして市販のレンガブロック（吸水率約10%）からφ25mmのコアをコアドリルにより採取し、これをφ50×100mmの型枠中心に設置し、周囲に水セメント比40%のセメントペーストを流し込んだもの（写真-1）を作製した。

レンガコアは、24時間吸水後、さらに真空飽和処理を行い、表面乾燥飽水状態としたものと、24時間105℃乾燥させた絶乾状態のものを準備した。ペースト中にそれぞれ埋設したものを、以下では、B-W、B-Dと称する。

打設後材齢2日で脱型し、その後は温度20℃でポリエチレン製フィルムにより封緘養生とした。

3.3 X線CTスキャナについて

X線CTスキャナは、X線源、回転テーブル、イメージ管の3つが基本的な構成部材であり、回転テーブルに試験体を置き、イメージ管において試験体を透過したX線を検出する仕組みとなっている。

X線CTスキャナによる計測は、X線をある水平面上にファンビーム状に照射し、回転テーブルを360度回転させ、連続的に透過X線量を検出することでデータを取得する。透過X線量から逆解析によって、断面内のX線吸収率の分布を求める。これに適当なカラーチャートを当てはめることによって、CT画像として見ることができ、X線CTスキャナからはX線吸収率と比例関係にあ

る値（GL値）⁸⁾が取得できる。また、X線吸収率は密度と概ね比例関係にある。

本実験では、材齢28日において、X線CTスキャナによる撮像を行った。

撮像範囲は、61.44mm×61.44mm×75.00mmとし、1voxel=0.12×0.12×0.15mmとなるよう計測条件を設定した。また、測定条件は、管電圧200kV、管電流300μAとした。

3.4 X線CTスキャナによる観察結果

図-4に両供試体の鉛直断面の中心部のCT像を示す。図-4では、GL値の分布を下部に示すカラーチャートによって表わしている。また、セメントペーストとレンガとの境界線を破線で示している。B-Wは、レンガ周りでGL値が $4.25\sim 4.50\times 10^4$ 程度の領域が広く、セメントペーストの密度が小さくなっていると考えられる。それ以外の領域に関しては、両供試体に大きな差はない。

図-5にレンガ中心からの距離とGL値の関係を示す。B-Dは境界部でGL値が大きく変化する箇所が存在するのに対し、B-Wはレンガ周りの密度変化が比較的緩やかに起こっている。セメントペーストおよびレンガの平均的なGL値はそれぞれ、 $4.30\sim 4.35\times 10^4$ 、 $4.45\sim 4.55\times 10^4$

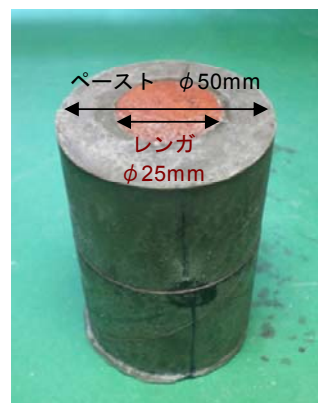


写真-1 供試体外観

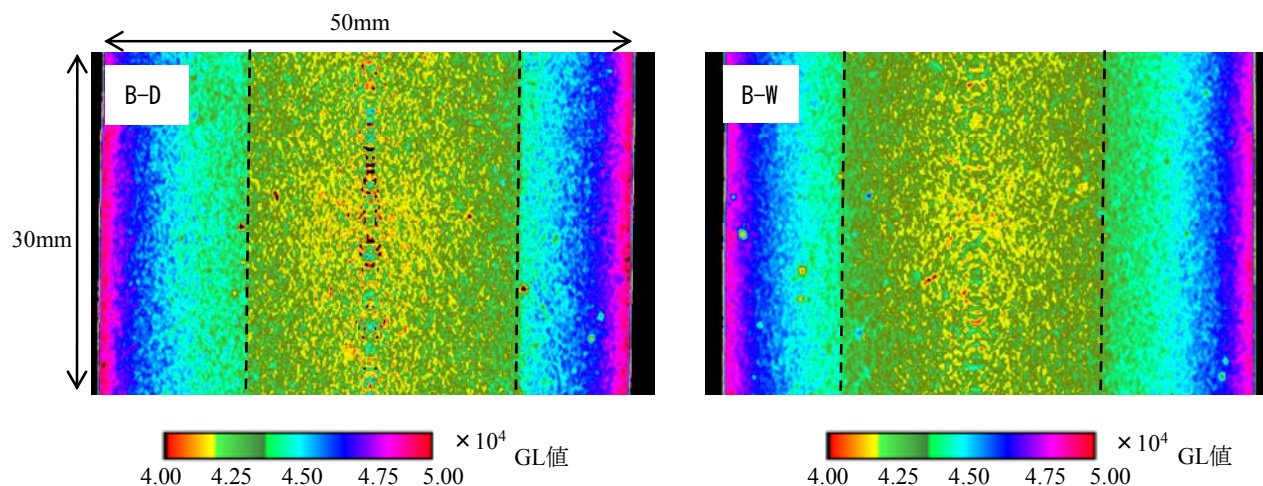


図-4 鉛直断面のCT像

程度と考えられる。B-DにおいてGL値が大きく変化したのは、絶乾状態のレンガがセメントペースト中の水分を吸収したことによるものと考えられる。一方、B-Wにおいてレンガ周辺にGL値がセメントペーストの値よりも低い領域が生じ、GL値が緩やかに変化した結果は、レンガに含まれていた水分がセメントペーストへと移動し、空隙構造が粗になったことを表しているものと推察される。

以上より、高吸水率の骨材を模擬したレンガとセメントペーストとの境界部についてX線CTスキャナによる観察を行った結果、表乾状態のレンガを用いた供試体と絶乾状態のレンガを用いた供試体とでは性状に差が生じており、境界部における水分移動現象が生じることを確認した。

4. 骨材とセメントペースト境界近傍におけるセメントペースト部の性状変化に関する検討

4.1 目的

高吸水率骨材を用いたコンクリートにおいて、骨材周辺のセメントペースト部において、組織がポーラスな部分が形成されることが予想される。そこで、低密度の部分においてどのような性状変化が起こるかを、モデル供試体を用いたビッカース硬度試験により確認する。

4.2 供試体

モデル供試体は、上述の3.で使用した供試体(B-W, B-D)とした。それぞれはレンガを表乾状態で用いたもの、絶乾状態で用いたものである。

供試体中心部を水平方向に厚さ約5mmの円板状に切り出し、研磨を行ったものを測定用試料とした。レンガとセメントペーストの境界から200 μ mまでは20 μ m間隔で、200 μ mから400 μ mまでは50 μ m間隔でビッカース硬度の測定を行った。なお、各測定範囲において、約15点の測定を行った。

4.3 ビッカース硬度試験結果

図-6、図-7にB-W, B-Dのレンガとセメントペーストの境界からの距離とビッカース硬度の関係を示す。それぞれの図中には測定値の最大値・最小値と平均値(太線)を併せて示している。B-Dのビッカース硬度は、境界部から、ほぼ一定値を保っているのに対し、B-Wでは、境界から100 μ mまでの領域においてビッカース硬度が低下していることが分かる。これは、レンガに含まれていた水分が周囲のペーストに滲出したことで、見かけ上の水セメント比が増大したためと考えられる。

図-6 および図-7によれば、水分の滲出がビッカース硬度の低下に影響する範囲は境界より約100 μ mと読み取れるのに対し、X線CTスキャナによる計測結果である図-5では、両供試体のGL値がほぼ等しくなるの

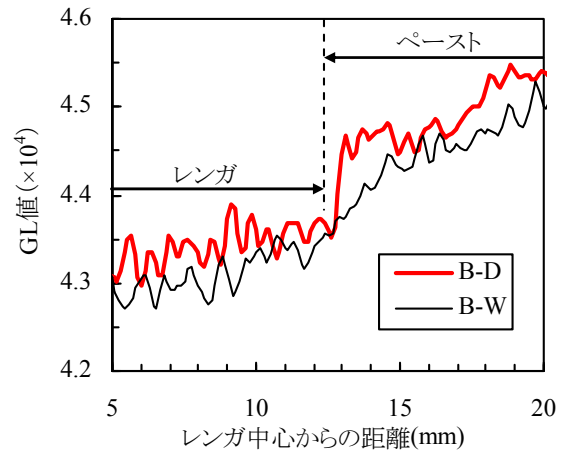


図-5 GL値の分布

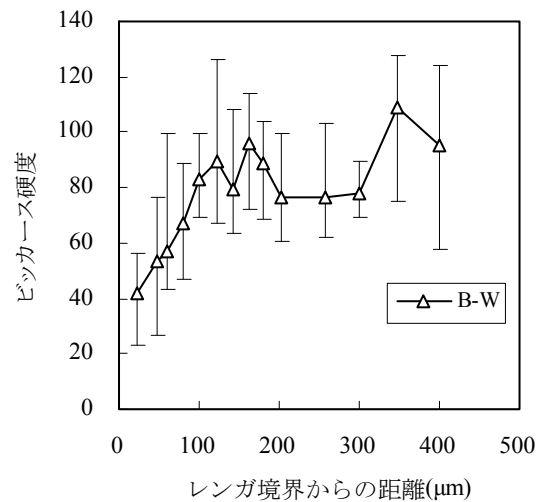


図-6 ビッカース硬度分布 (B-W)

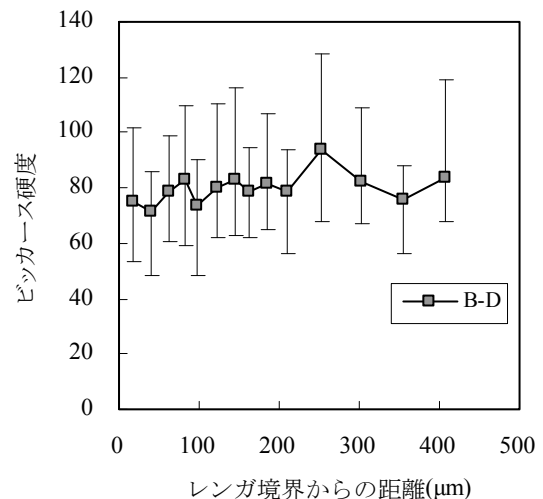


図-7 ビッカース硬度分布 (B-D)

は境界から約2mmの位置となっている。このような差異が生じたのは、ビッカース硬度試験は空隙を避けて計測を行っているため、空隙による硬度や密度への影響を考慮していないのに対し、X線CTスキャナでは空隙の

存在を包含した結果であるためと考えられる。

以上の結果より、高吸水率の骨材を用いたコンクリートでは、骨材周辺のセメントペースト部分において、強度の比較的低い領域が形成されることが予想される。一般に、コンクリートの破壊機構は境界より進展する微細ひび割れに起因する。よって、吸水率の高い再生骨材を用いたコンクリートの骨材周辺の強度は普通骨材使用コンクリートの場合よりも低下し、その結果コンクリートの強度も低下すると考えられる。

6. 結論

本研究は、再生骨材中の水分が新セメントペースト部の強度発現性に及ぼす影響を評価するため、異なる含水状態および養生条件によって、強度による検討およびモデル供試体の X 線 CT 画像解析およびペースト部のビッカース硬度計測による検討を行った。以下に本研究から得られた知見を示す。

- (1) 表乾状態および絶乾状態の再生粗骨材を用いたコンクリートよりウェットスクリーニングして得られたモルタルの強度を比較した結果、ほぼ同じであった。これより、再生骨材中の水分が練混ぜ時にモルタルマトリックスへ滲出し、見かけ上、水セメント比を増大させることが明らかになった。
- (2) 表乾状態および絶乾状態の再生粗骨材を使用したコンクリートを封緘養生した場合、7日強度はほぼ同等であったのに対し、28日強度では表乾状態の再生粗骨材を用いたコンクリートの方が大きくなった。このことから、再生粗骨材中の水分が養生時にもモルタル部に移動し、自己養生効果を発揮することが推察された。
- (3) 高吸水率レンガを用いたモデル供試体を CT スキャナで観察した結果、表乾レンガを用いた場合にセメントペーストの境界近傍において GL 値の低い部分を確認した。これより、高吸水率骨材を使用したコンクリートにおいて骨材近傍のセメントペースト部には、密度の低い部分が形成されることが推察された。
- (4) 高吸水率レンガを用いたモデル供試体のビッカース硬度を測定した結果、レンガとセメントペースト境界近傍において、ビッカース硬度の低い領域が確認でき

た。このことより、高吸水率骨材使用コンクリートにおいて骨材近傍のセメントペースト部の強度が低下することが推察された。

謝辞

本研究における圧縮強度試験およびビッカース硬度試験の結果は、科学研究費補助金 基盤研究(C) (課題番号 21560487) による成果の一部である。

また、本研究における X 線 CT スキャナによる供試体の観察については、(独)港湾空港技術研究所と共同で実施した。地盤・構造部基礎工研究チームをはじめ関係各位に謝意を表する。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート構造物の環境性能照査指針 (試案)，コンクリートライブラリー125，2005，11
- 2) 日本コンクリート工学協会：コンクリートセクターにおける地球温暖化物質・廃棄物の最小化に関する研究委員会報告書，2010.7
- 3) 例えば，笠井芳夫，阿部道彦，柳啓：再生骨材コンクリートの諸物性に関する実験的研究，セメント・コンクリート論文集，No.50，pp.802-807，1996
- 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，Vol.767/V-64，pp.61-73，2004
- 5) 佐川康貴，松下博通，川端雄一郎：再生コンクリートの中酸化及び塩分浸透性に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.1，pp.1345-1350，2005
- 6) 松下博通，佐川康貴，川端雄一郎：再生細骨材を用いたモルタルの細孔構造の粗大化と強度および耐久性の低下，土木学会論文集，Vol.62，No.1，pp.230-242，2006.2
- 7) 村上英明，佐川康貴，川端雄一郎，松下博通：再生モルタルの強度および空隙構造に及ぼす再生骨材の水分の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.2，2008
- 8) 菊池喜昭，水谷崇亮，永留健，畠俊郎：マイクロフォーカス X 線 CT スキャナの地盤工学への適用性の検討，港湾空港技術研究所資料，No.1125，2006.6