

論文 CO₂ガスの強制吸着による低エネルギー型再生骨材製造方法の検討

松田 信広*1・亀山 敬宏*2・松田 美奈*3・伊代田 岳史*4

要旨：これまでの研究において、再生骨材に CO₂ガスを吹き付けることで、再生骨材の混入モルタルを炭酸化させ、再生骨材の品質改善、またコンクリートに用いた場合の強度の増進および乾燥収縮低減効果を確認した。本研究は再現実験を実施し、低エネルギー型の再生骨材製造方法について検討した。その結果、モルタル混入率が 50%を超える破砕処理程度の製造工程から製造された再生粗骨材は、CO₂ガスを吹き付けることでコンクリート用再生骨材として使用できることを確認した。また、モルタル混入率の指標として破砕値試験が有効であることを確認した。

キーワード：再生骨材, 再生骨材コンクリート, CO₂ガス, 混入モルタル, 破砕値, 低エネルギー

1. はじめに

近年、コンクリート用骨材は、採取制限や品質確保の問題からその数量が減少しており、骨材の確保が困難な状況となりつつある。その一方で、今後、ストックされている社会基盤構造物は、近い将来にその多くが寿命を迎えることとなり、その更新に伴いコンクリート塊が大量に発生することが予測されている。しかし、コンクリート塊の再利用先であった路盤材への需要が減少している中で、今後は、コンクリート用再生骨材（以下、再生骨材）として利用していくことが望まれている。再生骨材および再生骨材コンクリートの実用化に向けては、これまでに多くの研究が報告されており、JIS 規格・基準類は整備され、実構造物への適用も報告^{例え1), 2)}されている。しかし、本格的に普及していないのが現状である。一般的に低品質再生骨材の製造工程は、コンクリート塊をジョークラッシャ等の破砕処理を行う。したがって製造コストおよびエネルギー消費は小さいが品質が劣り適用範囲が限定されている。その後、更に破砕、分級等を行うか、磨砕、すりもみ処理を行うことで中品質再生骨材を製造することが可能となる。高品質再生骨材の製造工程は、加熱すりもみ、偏心ロータ、スクリュウ磨砕、旋回磨砕板、比重選別等の特殊な処理が必要となっている。したがって品質が向上するのに比例して、製造コストおよびエネルギー消費が増加し、副産微粉末の発生量も増加する。なお、低品質再生骨材の製造時の環境負荷は、高品質再生骨材の製造時の環境負荷と比較すると、品質水準の相違からかなり低い値となっていることが報告³⁾されている。よって、今後の普及に向けては、製造コストおよびエネルギー消費や、副産微粉末の発生が少くない破砕処理程度の工程によって製造された再生骨材の

品質改善が可能な低エネルギー型の再生骨材製造方法の検討が必要であると考えられる。これまでの研究⁴⁾において再生骨材に CO₂ガスを吹き付けることで混入モルタルを炭酸化させ、再生骨材の品質改善、またコンクリートに用いた場合の強度の増進および乾燥収縮低減効果を確認した。そこで本研究では、低エネルギー型再生骨材製造方法の検討を目的に再現実験を実施し、再生骨材の炭酸化に伴う品質の変化を確認するとともに、それらが再生粗骨材コンクリートに及ぼす影響について確認した。

2. 再生骨材の品質改善

2.1 再生骨材の炭酸化

一般にコンクリートの炭酸化は、水酸化カルシウムが二酸化炭素と化合し、炭酸カルシウムに変化する現象であり、炭酸化することでコンクリート中の細孔が減少し、密度が増加することで内部組織が緻密化するとされている⁵⁾。また、コンクリートは、炭酸化することで圧縮強度が増加することが認められている。そこで、再生骨材に CO₂ガスを吹き付け、再生骨材に混入するモルタル部分を炭酸化させ、緻密化することで、混入モルタルの強度が増進し、結果、再生骨材自体の品質が改善すると想定している。なお、近年コンクリート破砕物は、相当量の CO₂を固定化する可能性があることが報告^{例え6), 7)}されている。

2.2 検討概要

本研究は、再生粗骨材のみ検討した。使用した再生粗骨材の概要を表-1 に、再生粗骨材の外観を表-2 に示す。再生粗骨材は、実際の再生骨材製造プラントから製造された粒度が 20mm~5mm のものを対象とし、原コンクリートが異なる再生粗骨材を 7 種類使用した。再生粗

*1 (株) 東京テクノ 工場長 (正会員)

*2 芝浦工業大学 大学院理工学研究科建設工学専攻 (学生会員)

*3 芝浦工業大学 工学部土木工学科

*4 芝浦工業大学 工学部土木工学科准教授 博士 (工学) (正会員)

骨材の品質は、絶乾密度および吸水率により区分すると、再生骨材 M クラスが 3 種類、L クラスが 3 種類、L の規格を外れているものが 1 種類である。CO₂ ガスの吸着は、7 種類全ての再生粗骨材について実施し、温度 20℃、相対湿度 60%、CO₂ 濃度 5% で中性化促進装置に 1 週間静置させた。これまでの検討において、2 週間中性化促進装置にて静置したものと質量および密度、吸水率を比較したが変化が確認できなかったため、本研究においては、中性化促進期間を 1 週間とした。なお、CO₂ ガスを吸着した粗骨材は、骨材名称に「CO₂」と表記している。

2.3 試験項目

本研究における再生粗骨材の試験項目は、密度および吸水率（試験方法：JIS A 1110）、モルタル混入率、混入モルタルが分担している吸水率（以下、混入モルタル分担吸水率）および破砕値、原骨材吸水率試験を実施した。モルタル混入率の測定は、再生粗骨材の絶乾質量と、塩酸洗浄後のモルタルを除去した原骨材の絶乾質量の差を、再生粗骨材全体の絶乾質量で除した値とした。混入モル

タル分担吸水率は、既往の研究⁸⁾において現在の JIS 規格に考慮されていない混入モルタルの量および原粗骨材の品質を考慮したものと報告され、本研究においても文献⁸⁾と同様に、酸洗浄後のモルタルを除去した原骨材の吸水率を測定し、そこから再生粗骨材の吸水率の差を混入モルタル分担吸水率とした。破砕値試験は、British Standards の BS812 に規定されており、これまでに高強度コンクリートの圧縮強度を評価する指標に有効であると報告⁹⁾されている。わが国では、JIS A 5023 再生骨材 L を用いたコンクリート 附属書 C 「再生骨材の製造工程管理用品質試験方法－再生粗骨材 L の吸水率の推定試験方法」（以下、規格）に破砕値試験が示されており、規格に示されている方法に準拠して実施した。破砕値試験は、各試料につき 3 回測定し、その平均値を破砕値とした。高橋らの報告¹⁰⁾によると載荷荷重は規格で示される 100kN よりも 200kN の方が測定値は明確となっていることから、本研究においても載荷荷重は 200kN で実施した。また、載荷後に 2.5mm のふるいを通過するものの質量の、全試料の質量に対する割合を破砕値とした。

2.4 試験結果および考察

再生粗骨材の絶乾密度を図-1 に、吸水率を図-2 に示す。CO₂ ガスを吸着した再生粗骨材は、全ての種類で絶乾密度および吸水率の改善が見られており、M クラスの MA および MC はそれぞれ H クラスに、L クラスの LA および LB は M クラスに、また、L の規格を外れていた LD については、L の規格を満足する結果が確認された（図-3）。再生粗骨材のモルタル混入率と吸水率の関係を図-4 に示す。一般に、再生粗骨材のモルタル混








表-1 再生粗骨材の概要

| 骨材名称 | 品質区分 | 絶乾密度 (g/cm ³) | 吸水率 (%) | 製造方法 | | 原コンクリート |
|------|------|---------------------------|---------|------|----|--------------------|
| | | | | 破砕 | 磨砕 | |
| MA | M | 2.51 | 3.01 | ○ | ○ | 解体ガラ ^{*)} |
| MB | | 2.44 | 3.94 | ○ | ○ | 解体ガラ ^{*)} |
| MC | | 2.50 | 3.06 | ○ | ○ | 解体ガラ |
| LA | L | 2.32 | 5.69 | ○ | — | 解体ガラ |
| LB | | 2.35 | 5.66 | ○ | — | 解体ガラ |
| LC | | 2.26 | 6.82 | ○ | — | 不明 |
| LD | | 外品 ^{*)} | 2.21 | 7.44 | ○ | — |

*1 再生骨材 L の規格を外れたもの

*2 一部、戻りコンを含む

表-2 再生粗骨材の外観

| 骨材名称 | MA/ MACO ₂ | MB/ MBCO ₂ | MC/ MCCO ₂ | — |
|---------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 外観 |  |  |  | — |
| 粗粒率 ^{*)} | 6.64 | 6.65 | 6.73 | — |
| モルタル混入率 (%) ^{*)} | 19.69 | 28.51 | 15.10 | — |
| 骨材名称 | LA/ LACO ₂ | LB/ LBCO ₂ | LC/ LCCO ₂ | LD/ LDCO ₂ |
| 外観 |  |  |  |  |
| 粗粒率 ^{*)} | 6.80 | 6.70 | 6.81 | 6.70 |
| モルタル混入率 (%) ^{*)} | 40.95 | 40.82 | 57.05 | 53.94 |

*1 CO₂ 吸着前の値

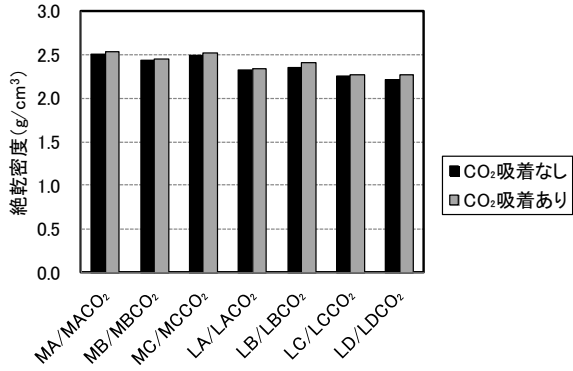


図-1 再生粗骨材の絶対乾密度

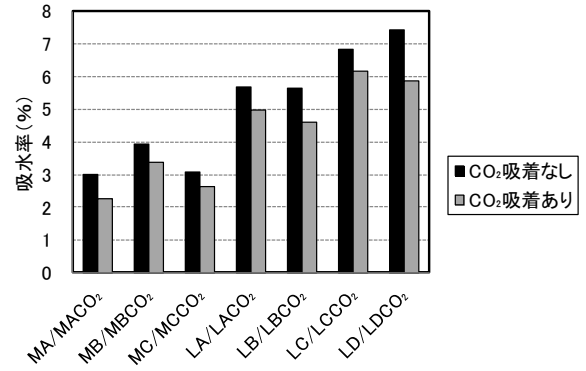


図-2 再生粗骨材の吸水率

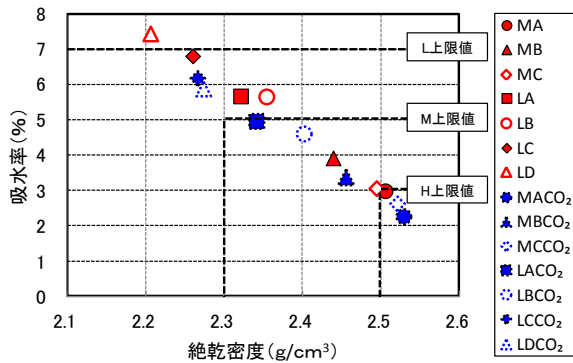


図-3 再生粗骨材の絶対乾密度および吸水率

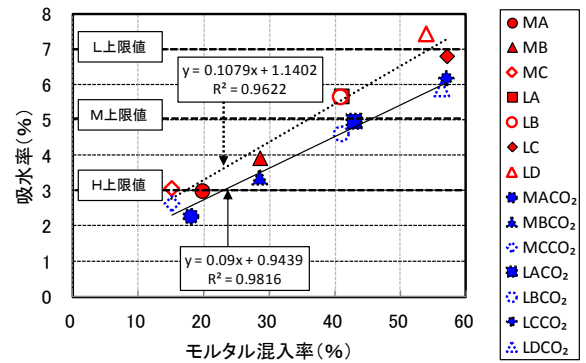


図-4 モルタル混入率と吸水率の関係

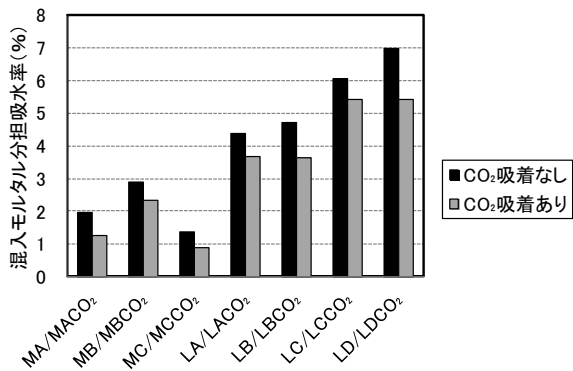


図-5 混入モルタル分担吸水率試験結果

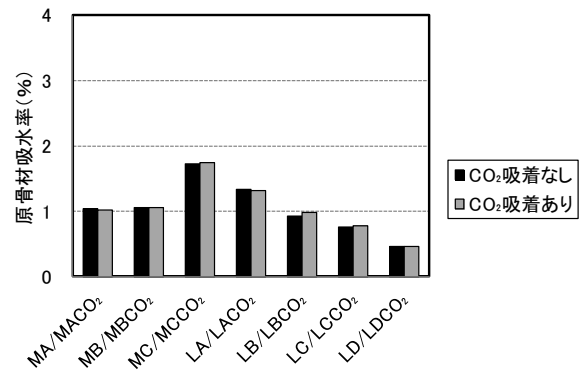


図-6 原骨材吸水率試験結果

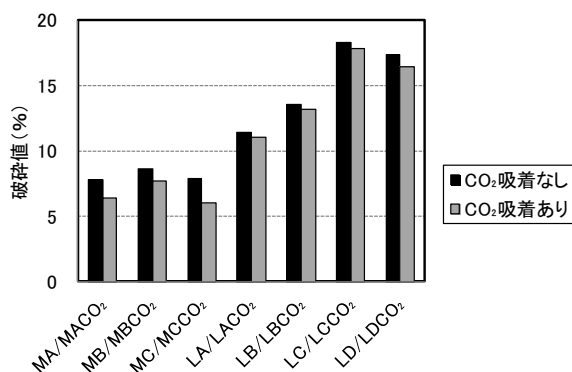


図-7 破砕値の試験結果

入率と吸水率の間には直線的な関係¹¹⁾がみられ、本研究においても同様の関係が確認された。また、それぞれのCO₂吸着あり、なしのモルタル混入率を比較すると、ほぼ同等の値となっていることから、試料採取に伴う品質の変動誤差はないものと考えられる。したがって、絶対乾密度および吸水率が改善した要因としては、CO₂ガスによる炭酸化が寄与したものと考えられる。混入モルタル分担吸水率およびその測定に伴う原骨材吸水率試験結果を図-5および図-6に示す。全ての種類で混入モルタル分担吸水率の改善が確認された。CO₂吸着あり、なしの原骨材吸水率はほぼ同等であることから、CO₂ガスによる

炭酸化に伴って混入モルタルの吸水率が改善されることで、再生粗骨材自体の吸水率が改善されていると考える。破砕値の試験結果を図-7に示す。ほとんどの骨材でCO₂ガスを吸着したもののほうが破砕値は小さくなった。これは、再生粗骨材を炭酸化させたことで混入モルタルの緻密化、または強度が増加し、再生粗骨材自体の強度が増進していると考えられる。しかし、Lクラスの再生粗骨材は、吸水率および混入モルタル分担吸水率の改善傾向と比較するとそれほど大きな変化は確認されなかった。既往の文献¹⁰⁾においても破砕値に及ぼす原コンクリートの水セメント比の影響はあまりないと報告されていることから、破砕値はそれほど改善されないものとする。

3. 再生骨材コンクリート実験概要

3.1 使用材料

本実験に使用した材料は、セメントは高炉セメントB種（密度：3.05g/cm³）を用いた。細骨材は山砂（表乾密度：2.61g/cm³）とし、粗骨材は表-1に示す再生粗骨材およびそれらのCO₂ガスを吸着させたもの計14種類の再生粗骨材をそれぞれ用いた。また、比較用として普通砕石：記号NA（表乾密度：2.71g/cm³）を用いた。

3.2 試験項目

本実験で行った試験項目を表-3に示す。フレッシュコンクリート試験は、スランブおよび空気量を実施した。硬化コンクリート試験は、標準養生における圧縮強度および割裂引張強度を実施した。長さ変化試験は、材齢56日までの値とし、MCおよびLCにおける供試体の保存は、脱型後、材齢28日まで標準養生し、その後温度20±2℃、相対湿度60%の環境下で保存した。それ以外のものについては、脱型後、材齢7日まで標準養生し、その後上記と同様の環境下で保存した。

3.3 実施配合

本実験の配合は、W/C50%とし、s/a50%、単位水量は170kg/m³で一定とした。スランブおよび空気量の目標値は、10±2.5cmおよび4.5±1.5%とし、所要の性状を得るために、減水剤およびAE剤の添加量により調整した。

4. 実験結果および考察

4.1 フレッシュコンクリート

フレッシュコンクリートの試験結果を表-4に示す。全ての配合について、スランブおよび空気量ともに目標値を満足する結果が得られた。

4.2 圧縮強度

材齢28日における圧縮強度試験結果を図-8に示す。CO₂ガスを吸着したMCおよびLC、LDは、圧縮強度が増進する結果が得られ、普通砕石を用いたコンクリートと同等若しくは上回る結果となった。その他のものにつ

表-3 試験項目

| 対象 | 試験項目 | 試験方法 | 備考 |
|-----------------|--------------------|-------------------|----------|
| フレッシュ コンクリート | スランブ | JIS A 1101 | 10±2.5cm |
| | 空気量 | JIS A 1128 | 4.5±1.5% |
| 硬化 コンクリート | 圧縮強度 | JIS A 1108 | 材齢28日 |
| | 割裂 引張強度 | JIS A 1113 | 材齢28日 |
| | 長さ変化 ^{*1} | JIS A 1129-2 | MC・LC |
| JIS A 1129-3 | | MA・MB LA・LB・LD | |

*1 CO₂吸着あり、なしについてそれぞれ実施した。

表-4 フレッシュコンクリート試験結果

| 種類 | CO ₂ 吸着 | スランブ (cm) | 空気量 (%) |
|-------------------|--------------------|--------------|------------|
| NA | — | 11.0 | 5.9 |
| MA | なし | 9.5 | 4.0 |
| MB | | 8.0 | 5.6 |
| MC | | 10.0 | 5.4 |
| LA | | 8.0 | 5.0 |
| LB | | 11.5 | 5.3 |
| LC | | 12.5 | 5.5 |
| LD | | 12.0 | 5.4 |
| MACO ₂ | あり | 9.5 | 3.9 |
| MBCO ₂ | | 10.0 | 5.7 |
| MCCO ₂ | | 8.5 | 3.8 |
| LACO ₂ | | 11.5 | 5.5 |
| LBCO ₂ | | 12.0 | 5.7 |
| LCCO ₂ | | 9.0 | 3.5 |
| LDCO ₂ | | 9.0 | 5.9 |

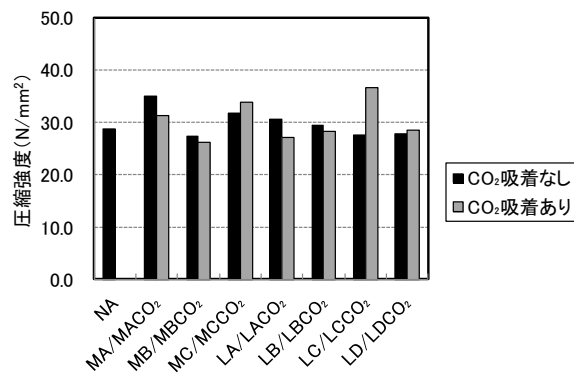


図-8 圧縮強度試験結果

いては、強度の増進は確認できなかった。

4.3 割裂引張強度

材齢28日における割裂引張強度試験結果を図-9に示す。CO₂ガスを吸着したことでほとんどの種類で強度の増進が確認された。これは、混入モルタルが緻密化したことにより、再生粗骨材自体の強度が増進したことに起因したものと考えられ、更に付着強度が増進され割裂時の原骨材と付着モルタルの境界で破断する骨材が減少し、コンクリート自体の強度増進に寄与したものとする。

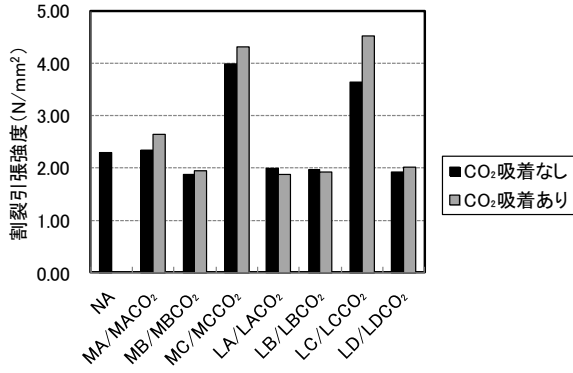


図-9 割裂引張強度試験結果

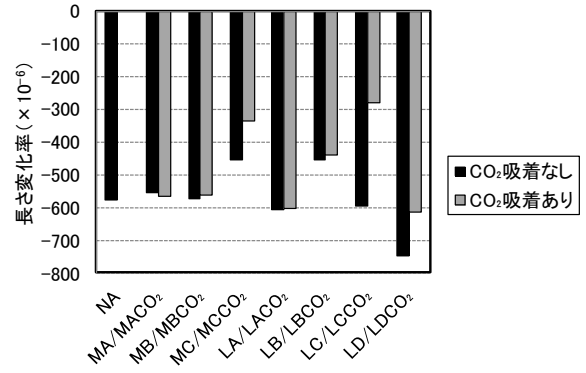


図-10 長さ変化率試験結果 (材齢 56 日)

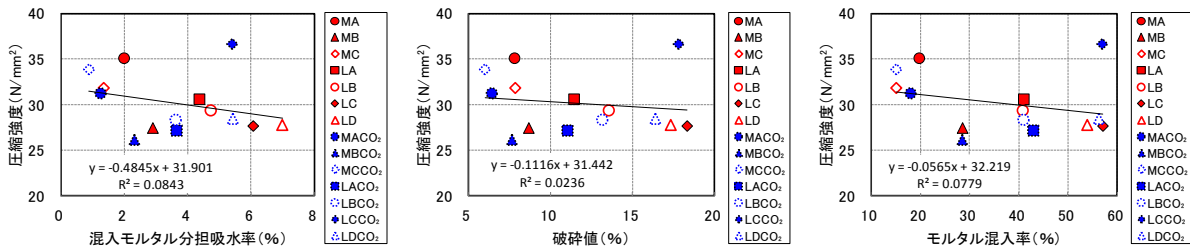


図-11 圧縮強度と各指標との関係

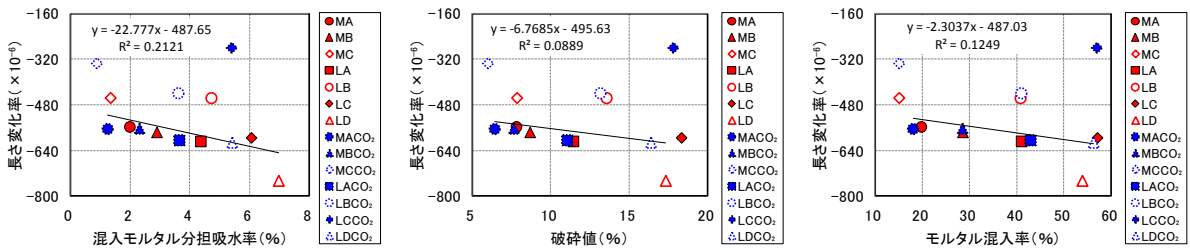


図-12 長さ変化率と各指標との関係

4.4 長さ変化

材齢 56 日における長さ変化率試験結果を図-10 に示す。MA 以外のほとんどの配合で長さ変化率は小さくなる結果が得られた。その中でも、モルタル混入率の大きい LC, LD で顕著に小さくなり、普通砕石に近い若しくは小さい結果となった。これらは、圧縮強度同様に混入モルタル量が多いことで、炭酸化による何らかの影響を及ぼしていることが考えられるが、そのメカニズムは確認できなかった。

4.5 各指標とコンクリートの特性との関係

混入モルタル分担吸水率および破砕値、モルタル混入率の各指標と、圧縮強度および長さ変化率との関係を図-11 および図-12 に示す。なお、長さ変化率における MC および LC は、標準養生期間が違うためそれらを除いて回帰式を求めた。圧縮強度は、混入モルタル分担吸水率が大きくなるにつれて若干低下する傾向にあった。破砕値では、大きな傾向は確認されなかった。モルタル混入率では、モルタル混入率が大きく

なるにつれて若干低下する傾向にあった。しかし、各指標との関係においては、相関性は認められなかった。また、モルタル混入率が 50% を超えるものについては CO₂ ガスの吸着により圧縮強度は増進した。長さ変化率は、混入モルタル分担吸水率が大きくなるにつれて若干大きくなる傾向が確認された。破砕値では、大きな傾向は確認されなかった。モルタル混入率では、モルタル混入率が大きくなるにつれて長さ変化率は若干大きくなる傾向が確認された。また、各指標との関係は、圧縮強度と比較して高い相関性が認められ、圧縮強度と同様に、モルタル混入率が 50% を超えるものについては CO₂ ガスの吸着により長さ変化率は顕著に小さくなる結果が得られた。

5. 低エネルギー型再生骨材製造方法の検討

これまでの結果から、CO₂ ガスを強制的に吸着させることで再生粗骨材の品質が改善された。また、モルタル混入率が 50% を超える再生粗骨材に CO₂ ガスを吹

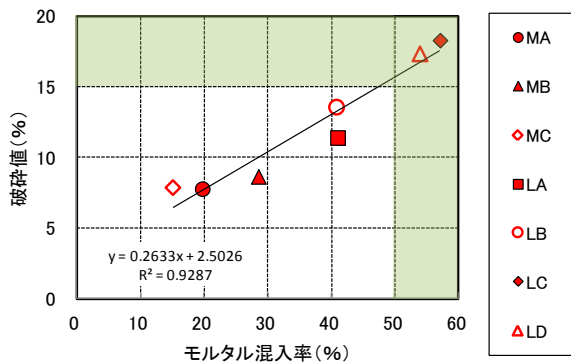


図-13 モルタル混入率と破砕値の関係

き付けることで、その有効性は高いことが確認され、コンクリート用骨材として使用できることが可能であると考える。しかし、実的にモルタル混入率の測定は難しい。そこでモルタル混入率と破砕値の関係を図-13に示す。モルタル混入率と破砕値には高い相関性が認められ、モルタル混入率の指標として有効であると考えられる。なお、既往の文献¹⁰⁾においてもこれらの関係が認められている。そこで破砕値試験を実施し、破砕値が15%を超えたもの、すなわち破砕処理程度の製造工程から製造された再生粗骨材を対象にCO₂ガスを強制的に吸着させることで、低エネルギー型再生骨材の製造が可能であると考えられる。

6. まとめ

本研究の範囲において得られた知見を以下に示す。

- (1) 再生粗骨材にCO₂ガスを強制的に吸着させることで、混入モルタルが炭酸化し、混入モルタル自体の吸水率が改善することで、密度および吸水率が改善し、破砕値は小さくなった。
- (2) CO₂ガスの吸着は、モルタル混入率の高い骨材で有効性が高かった。
- (3) CO₂ガスを強制的に吸着させた再生粗骨材を用いたコンクリートの圧縮強度は、モルタル混入率の高い種類で改善した。
- (4) 長さ変化率は、ほとんどの種類で改善した。また、モルタル混入率の高い種類で顕著に改善した。
- (5) モルタル混入率と破砕値には高い相関性が認められ、モルタル混入率の指標に有効であると考えられる。
- (6) 破砕値が15%を超えるものを対象にCO₂ガスを吸着させることが有効であり、それらによって低エネルギー型再生骨材の製造が可能であると考えられる。

今後は、CO₂ガスの強制吸着によるその他耐久性への影響を確認するとともに、混入モルタルの性質の違いによるCO₂吸着効果の影響とその要因について検討する必要があると考える。

謝辞

再生骨材の製造については、武蔵野土木工業(株)、宮松城南(株)、立石建設(株)、樋口産業(株)の関係各位にご協力を頂きました。ここに付記し、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 河野政典, 上西 隆, 小竹琢雄: Mクラス再生骨材を使用したコンクリートの建築物基礎への適用, コンクリート工学年次論文集, Vol30, No2, pp.409-414, 2008.7
- 2) 松田信広, 竹内博幸, 高橋祐一: 中品質再生骨材を用いたコンクリートの実構造物への適用, コンクリート工学年次論文集, Vol34, No1, pp.1516-1521, 2012.7
- 3) 鈴木康範, 小山明男: 低品質再生骨材の製造技術, コンクリート工学, vol.46, No.5, pp.67-72, 2008.5
- 4) 亀山敬宏, 松田信広, 伊代田岳史: 再生骨材の普及に向けた品質改善と提供手法に関する研究, 日本材料学会, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集 13 巻, 1096, p.1-6, 2013.11
- 5) 長嶋正久, 飛内圭之: 二酸化炭素の作用と硬化コンクリートの変化, セメント・コンクリート, No.465, pp.27-33, 1985.11
- 6) コンクリート構造物の補修・解体・再利用におけるCO₂削減を目指して, 土木学会, コンクリートライブラリー第134号, 2012
- 7) 黒田泰弘, 菊池俊文: 解体コンクリートによる二酸化炭素の固定, コンクリート工学年次論文集, vol.20, No.1, pp.15-22, 2009.1
- 8) 高橋祐一: 再生粗骨材における混入モルタルが再生骨材コンクリートの性能に及ぼす影響の評価に関する研究, 宇都宮大学大学院学位論文, 2011.9
- 9) 鶴田浩章, 松下博通, 陶 佳宏: 粗骨材の破砕値が及ぼす高強度コンクリートの圧縮強度への影響, コンクリート工学年次論文集, vol.20, No.2, pp.991-996, 1998.7
- 10) 高橋祐一, 黒田 満, 榊田佳寛, 竹内博幸: 再生骨材中の混入モルタル量の品質管理方法および評価基準の検討, コンクリート工学年次論文集, vol.35, No.1, pp.1453-1458, 2013.7
- 11) 高橋祐一, 榊田佳寛, 竹内博幸: モルタル塊残留率が再生骨材コンクリートの性質に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集 vol.32, No.1, pp.1433-1438, 2010.7