

報告 東京都圏における再生骨材コンクリートの状況から見た改質再生骨材の有効性

松田 信広*1・伊代田 岳史*2

要旨: 東京都圏における再生骨材コンクリートの現状と将来的な必要性について検討し、改質再生骨材の有効性について確認を行った。その結果、解体コンクリート塊の発生量は年々増加し、2050年では2015年と比較して1.5倍程度増加することが予測された。将来的には解体コンクリート塊の発生量が路盤材の需要を上回り、再生骨材コンクリートの需要を促進させる方策の検討が必要である。改質再生骨材は、品質グレードをクラスアップできる可能性があり、低エネルギー・低コストで製造することができる。再生骨材コンクリートに使用した場合、乾燥収縮や凍結融解に対する抵抗性が向上し、適用範囲を拡大できる可能性がある。

キーワード: 再生骨材, 再生骨材コンクリート, 改質, 低品質再生骨材

1. はじめに

近年、解体コンクリート塊の再資源化率は90%を上回り、そのほとんどが再生利用されている¹⁾。しかし、その用途の大部分が路盤材としての利用である。これまでの解体コンクリート塊の再資源化率は、路盤材として大半が利用されることで高い水準を維持できていた。しかし、将来的には路盤材としての需要が望めないことが考えられ、解体コンクリート塊の需給バランスが崩れることが予測されることから、再生骨材コンクリートの普及を目指す必要があると考える。再生骨材コンクリートの普及、実用化に向けては、これまでに多くの研究が報告されている。JIS規格については、2005年にJIS A 5021「コンクリート用再生骨材 H」が制定され、続いて2006、2007年とJIS A 5023「再生骨材 Lを用いたコンクリート」、JIS A 5022「再生骨材 Mを用いたコンクリート」が制定された。また、再生骨材 Hに関しては、2009年にJIS A 5308「レディーミクストコンクリート」の附属書Aに規定され、普通コンクリート用の骨材として取り扱うことができるようになった。この様に基準類は整備され、一部では実構造物への適用^{2), 3)}も報告されている。再生骨材コンクリート普及連絡協議会(以下、ACRAC)の統計から、全国の再生骨材コンクリートの出荷量を図-1に示す。再生骨材コンクリートの出荷量は、2006年では10万m³を超えていたものの、それ以降は概ね右肩下がりに減少し、2016年の出荷量は2006年に対して1/3程度となっている。したがって、JIS等の基準類が整備されたにも関わらず本格的に普及しているとは言い難い。一般的に、解体コンクリート塊の発生は都市部に偏っており、都市部以外の地域で再生骨材コンクリートの需要がある場合

に、解体コンクリート塊または再生骨材を都市部から運搬する必要がある。これも再生骨材コンクリートが全国的に求められない原因の一つであると考えられるが、まずは、都市部における再生骨材コンクリートの現状を把握し、将来的な必要性を検討することは重要であると考えられる。

一方で、筆者らは、その普及を阻害している要因として、再生骨材の品質と骨材製造時のエネルギー・コストであると考えている。その問題解決に向けて、これまでに低エネルギー・低コストで製造できる低品質再生骨材の品質を向上させ、その一方で二酸化炭素の排出量を削減できる技術の検討を進めてきた。そして、二酸化炭素を使用した強制炭酸化による低品質再生骨材の改質技術を考案⁴⁾している。この技術は、コンクリートの炭酸化メカニズムに着目し、再生骨材にCO₂ガスを吹き付けることで骨材に付着または混入しているモルタルやセメントペースト(以下、混入モルタル)部分を炭酸化させ、再生骨材自体の改質(以下、改質再生骨材)を図るもの

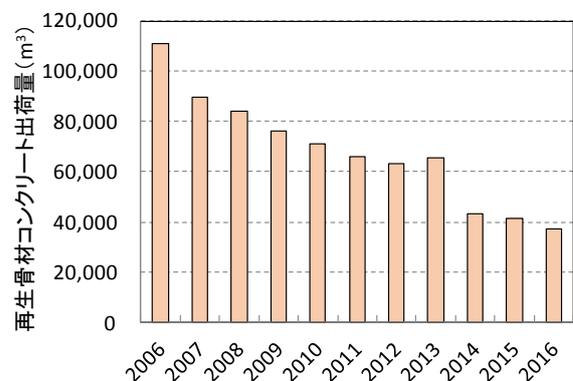


図-1 全国の再生骨材コンクリートの出荷量

*1 (株)東京テクノ 工場長 (正会員)

*2 芝浦工業大学 工学部土木工学科 教授 博士(工学) (正会員)

である。混入モルタル部分を取り除く磨砕やすりもみ等の技術と比較して、低エネルギー・低コストとなり、再生骨材の普及に対し、貢献できる技術になると考える。

そこで本報では、東京都圏での再生骨材コンクリートの現状と将来的な必要性について検討し、筆者らが提案する低品質再生骨材の改質技術によって得られた改質再生骨材の有効性について確認することを目的とした。なお、本報では地方公共団体の「東京都」と区別するため、東京都全域を表す用語として「東京都圏」としている。

2. 東京都圏における解体コンクリート塊の発生量の現在と将来

解体コンクリート塊は、産業廃棄物処理施設に関する条項では「がれき類」に分類される。そこで、東京都圏におけるがれき類の発生量の推移^{5), 6)}を図-2に示す。がれき類の発生量は、1999年から徐々に増加の傾向にあったものの2008年に一度減少している。その理由として、2007年の米国サブプライムローン問題や2008年のリーマン・ブラザーズ破綻（リーマンショック）を経て世界的な景気後退に陥ったことが要因の一つであると考えられる。しかし、それ以降は年々増加し、2015年では680万トンとなっている。したがって、一概には言えないが、解体コンクリート塊の発生量は、経済状況に左右されると考えられる。次に東京都圏における解体コンクリート塊の将来の発生量の予測を算出した。発生量予測の方法は、既往の文献⁷⁾を参考に建築物の着工床面積から推定した。建築物の着工床面積は1950年から2016年度版の建築統計年報⁸⁾の値を使用し、それ以降は国内総生産（GDP）の実質成長率を0.558%と仮定し算出した。なお、この値は過去10年間の平均値を用いた。また、算出にあたり建築物の寿命年数を木造で41年、非木造で54年と仮定し、構造物のコンクリート排出量の原単位は木造で $0.14\text{m}^3/\text{m}^2$ 、鉄筋コンクリート造で $0.80\text{m}^3/\text{m}^2$ 、鉄骨造で $0.50\text{m}^3/\text{m}^2$ とした。なお、これらの値は既往の文献⁷⁾の値をそのまま採用している。東京都圏における解体コンクリート塊の発生量の予測を図-3に示す。1970年あたりから年々増加し、2000年と2015年を比較すると、おおよそ2倍程度増加している。実際の東京都圏におけるがれき類の発生量においてもおおよそ2倍程度増加しており、両者の傾向は同等であると考えられる。解体コンクリート塊の発生量は、将来的には増加し、2050年では2015年と比較して1.5倍程度増加すると予測する。また、これらには土木構造物が含まれていないため、更に増加する可能性がある。

3. 東京都における施策と再生骨材コンクリートの現状

将来的な解体コンクリート塊の需給バランスは、路盤

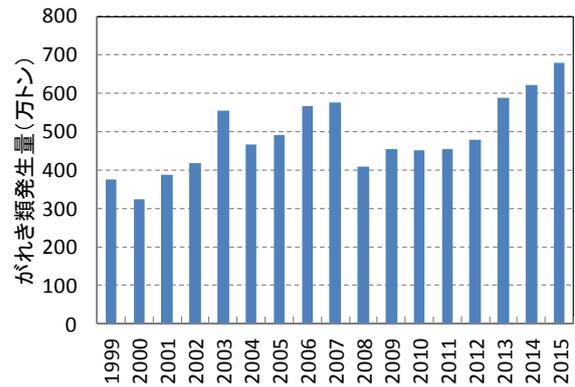


図-2 東京都圏におけるがれき類の発生量の推移

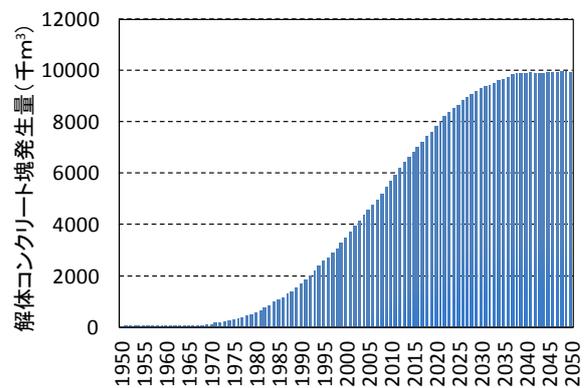


図-3 東京都圏における解体コンクリート塊の発生量の予測

材としての需要がなくなり、崩れることが指摘されている。既往の研究⁹⁾では、東京都圏における再生路盤材の需要量に対する供給量の比率（需要比率）を評価しており、2006年から2030年で45.5%から82.4%に増加するとされ、再生路盤材の供給量が需要量を上回る可能性があることを指摘している。東京都圏での将来的な解体コンクリート塊のリサイクルは、再生路盤材のみでは困難になる可能性があり、再生路盤材以外の用途を検討する必要があると報告している。東京都では、東京都建設リサイクル推進計画¹⁰⁾における戦略の一つとして「コンクリート塊を活用する」としている。その中においても、再生路盤材の滞留が顕在化してきていることを懸念し、解体コンクリート塊の再資源化にとどまらず、再生建設資材の活用までを見据えた取組みを推進していくことが必要であると明記している。そして、具体的な取組の一つとして「再生骨材を用いたコンクリートの活用」が示されている。また、東京都資源循環・廃棄物処理計画¹¹⁾では、主要な施策の一つに、「エコマテリアルの利用と持続可能な調達の普及の促進」を掲げ、建設工事におけるエコマテリアルの利用促進として、再生骨材コンクリートの利用促進が示されている。

一方で、ACRACの統計から、東京都圏の再生骨材コ

ンクリートの出荷量を図-4 に示す。再生骨材コンクリートの出荷量は、2006年から2013年までは20000m³を超えていたものの、2014年は大きく減少している。その理由として、開発工事の減少、型枠工および鉄筋工等の職人不足や工期の問題、工法の変化等が複合的に重なり、東京都圏の生コンクリートの出荷量自体が減少したことが一因であると考えられる。しかし、2015年には増加に転じ、徐々に回復の傾向にある。東京都では、2013年に土木材料仕様書¹²⁾および東京都環境物品等調達方針（公共工事）¹³⁾が改訂され、再生骨材コンクリートに関する事項が明記された。したがって、これらの改訂が出荷量を増加させた要因の一つと考えられる。東京都圏および全国の生コンクリートに対する再生骨材コンクリートの出荷量割合を図-5 に示す。東京都圏および全国の生コンクリート出荷量は、全国生コンクリート工業組合連合会の統計である。再生骨材コンクリートの出荷量は、生コンクリートの出荷量に対して低い水準であるものの、東京都圏では全国と比較すると割合が高い結果となった。これらは、東京都は他の地方公共団体に比べて各仕様書に再生骨材コンクリートに関連する事項を取り入れており、また、新規建設物件自体が多いことが理由として考えられる。今後については、東京都建設リサイクル推進計画では、東京都が発注する東京2020オリンピック・パラリンピック競技施設について再生骨材を用いたコンクリートの活用が明記されており、2020年まではある程度出荷量は増加する傾向にあると考えられる。しかし、将来的には解体コンクリート塊の発生量が路盤材の需要を上回することは明白であり、引続き再生骨材コンクリートの需要を促進させる方策の検討が必要である。

4. 改質再生骨材の有効性

4.1 今後の再生骨材コンクリートの需要と問題点

ここまでの検討から、将来的に解体コンクリート塊をコンクリート用再生骨材として再利用することは必要不可欠であることがわかる。再生コン指針¹⁴⁾では、再生骨材コンクリートLの適用部位として、耐久性確保の観点から、要求性能の低い捨てコンクリートや無筋コンクリート等の非構造部材と示されている。そこで、将来的に何らかの施策ですべての建築物の捨てコンクリート部分に再生骨材コンクリートの適用が推進された場合を想定した。まず、東京都圏の捨てコンクリート需要予測量を図-6 に示す。捨てコンクリート需要予測量は、東京都圏における建築敷地面積¹⁵⁾に、東京都が報告¹⁶⁾した東京都圏の建ぺい率の平均値51%を乗じることでおおよその建築面積を算出し、そこに捨てコンクリートの厚さを50mmとして算出した。また、将来的にはGDPを0.558%と仮定して予測した。捨てコンクリート需要予

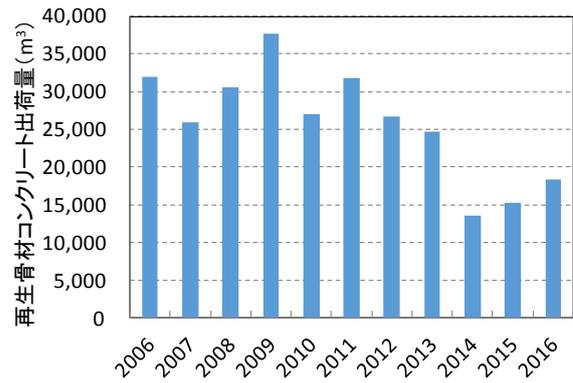


図-4 東京都圏の再生骨材コンクリートの出荷量

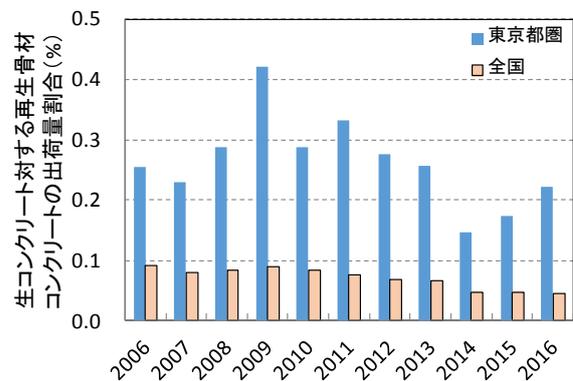


図-5 東京都圏および全国の生コンクリートに対する再生骨材コンクリートの出荷量割合

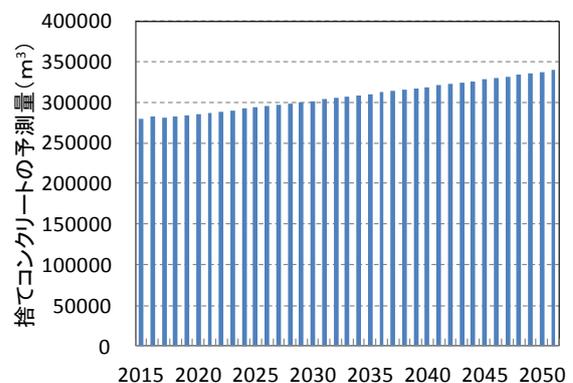


図-6 東京都圏の捨てコンクリート需要予測量

測量は、2016年の東京都圏の再生骨材コンクリートの出荷量に対して15倍近くになる。したがって、仮にこの捨てコンクリート部分に再生骨材コンクリートが適用されれば、再生骨材コンクリートの普及が大きく前進するものと考えられる。しかし、実際に再生骨材コンクリートが普及した場合、再生骨材を安定的に供給できるかが大きな課題であると考えられる。図-7は、ACRAC会員の東京都圏の再生骨材製造工場の所在地である。再生骨材製造工場は、東京都圏に4工場、都外で東京都圏に供給出来る可能性がある2工場の計6工場である。再生骨材のク

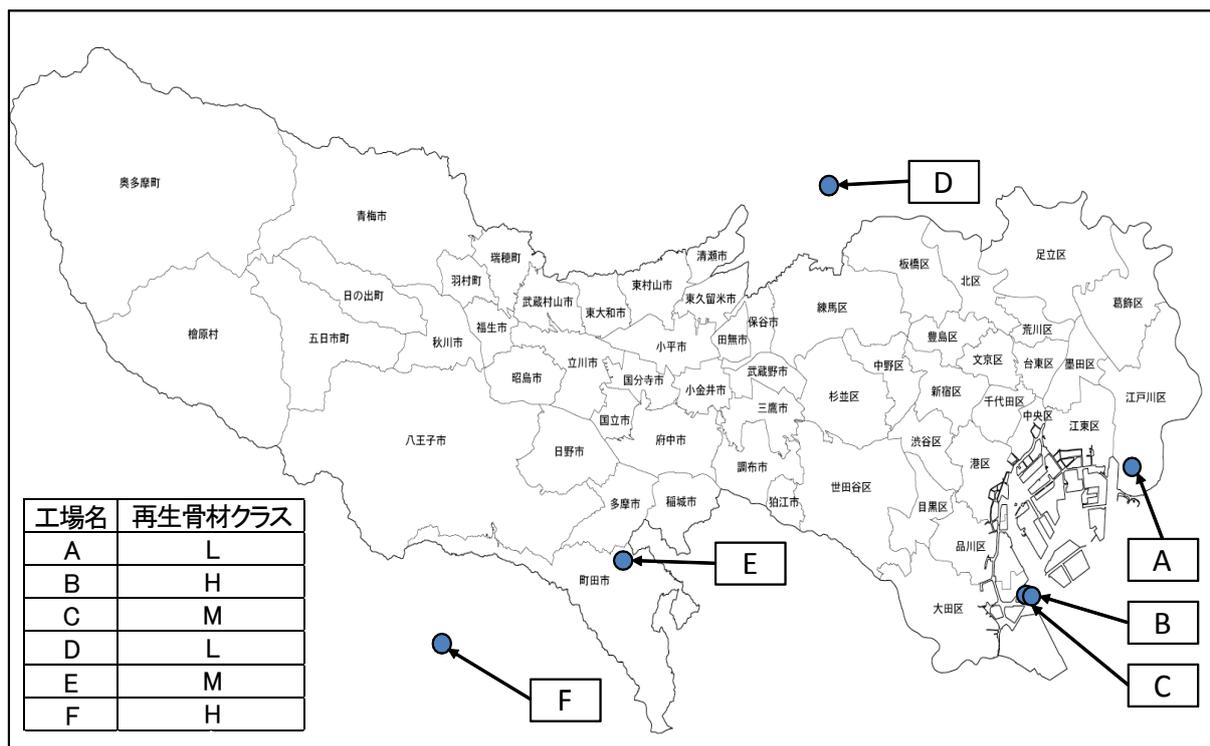


図-7 ACRC 会員の東京都圏の再生骨材製造工場の所在地

ラス別でみると、H、M、Lを製造出来る工場がそれぞれ2工場である。再生骨材の製造フローの一例を図-8に示す。一般的に、低品質再生骨材であるLは、ジョークラッシャ等の破碎処理で製造することができ、歩留まりが良く製造能力は高い傾向にある。中品質再生骨材であるMは、破碎の処理から更に破碎、分級等を繰り返すか、磨砕、すりもみ処理等の磨砕処理を行う。また、高品質再生骨材であるHは、加熱すりもみや偏心ロータ、スクリュウ磨砕、旋回磨砕板等の特殊な処理が必要となっている。そのため、副産微粉末の発生量が増加し、歩留まりが悪く、これらの製造能力は低い傾向にある。したがって、将来的に東京都圏における再生骨材コンクリートの需要が高まった場合、再生骨材を供給する能力は十分ではなく、今後の再生骨材コンクリートの普及を見据えると、歩留まりの良い低品質再生骨材の供給量を増大させることが必要であると考えられる。

一方、将来的に再生路盤材の需要が見込めないと考えると、既存のがれき処理を行う中間処理業者がコンクリート用再生骨材の製造を行うことが望ましいと考える。図-8に示すとおり、再生路盤材は一般的にジョークラッシャ等の破碎処理によって製造することができ、再生骨材Lと同様の工程によって製造することが可能である。したがって、再生骨材の供給量を増大させる方法として、新たに再生骨材製造工場を新設するよりも、既存の中間処理業者が低品質再生骨材である再生骨材Lの製造を行

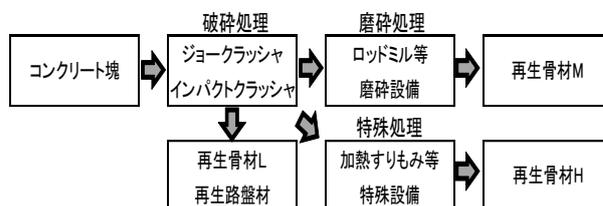


図-8 再生骨材の製造フローの一例

うことが最善であると考えられる。そのためには、上記に示す様な再生骨材Lを用いたコンクリートが使用され易い仕組み作りや適用範囲の拡大を検討することが必要であり、それらによって再生骨材コンクリートの普及が促進し、解体コンクリート塊の再資源化に大きく寄与するものと考えられる。一方で、それらには再生骨材の品質確保が重要であり、例えば、炭酸化による改質技術によって品質の確保やその安定性に寄与することができれば、より安全に低品質再生骨材を使用することができると考える。

4.2 低品質再生骨材の改質

再生骨材の品質を左右するものとして、混入モルタル部分の割合やその品質が指摘^{17), 18)}されている。そのため、再生骨材の品質を向上させるための方法として、一般的に磨砕やすりもみ等の製造技術によって混入モルタル部分を削除することが行われる。しかし、それには多大なエネルギーとコストを要し、副産微粉末の発生が

増加する。それならば、混入モルタル部分を削除せずにその部分の品質を改善することで再生骨材自体の改質が可能となれば、低エネルギー・低コストで品質の高い再生骨材を製造することができる。そこで、表-1 に示す低品質再生粗骨材を用いて、強制炭酸化による再生骨材の改質効果を確認した。強制炭酸化による再生骨材の改質方法は、促進中性化装置（温度 20℃、相対湿度 60%、CO₂濃度 5%の環境下）を用いて 1 週間実施した。改質前後の再生粗骨材の密度・吸水率を図-9 に示す。改質を行ったものは骨材名称の頭に「C」と表記している。強制炭酸化による改質によってすべての再生粗骨材で絶乾密度および吸水率は改善し、クラスアップしている骨材も確認できた。即ち、この技術によって L クラス骨材を M クラスに、また、L の規格外品を L クラスとして扱うことができる可能性がある。

4.3 改質再生骨材の有効性

上記のように強制炭酸化による改質を行うことで、品質グレードをクラスアップできるものも存在する。それによって、低エネルギー・低コストで再生骨材 M を製造することができるので、一般的な再生骨材 M の製造方法と比較して供給能力が向上し、適用範囲が拡大するものとする。更に、L の規格外品を再生骨材 L として扱うことができれば、中間処理業者で再生路盤材を製造している業者において、再生骨材が造り易くなるものと考えられ、再生骨材の問題点の一つとして考えられる供給不足による安定供給への課題解決に向けた技術となるものと考えられる。一方、再生骨材コンクリートは、再生骨材中の混入モルタルの影響から、一般的に乾燥収縮や凍結融解抵抗性に劣ることが知られている。したがって、これらも解体コンクリート塊を再生骨材コンクリートとして利用するための課題である。改質再生骨材は、混入モルタル部分を炭酸化させることで、混入モルタル中の水和生成物である水酸化カルシウムが炭酸カルシウムに変化する。両者の分子量と密度から体積は約 12% 増加すると計算でき、その部分の空隙が減少し緻密になる。この検討は既報¹⁹⁾を参照されたい。この現象によって、吸水率の改善や乾燥収縮の低減効果、物質移動抵抗性に寄与できると考えている。図-10 および図-11 は改質再生骨材を用いたコンクリートの長さ変化率および改質再生骨材の FM 凍害指数である。長さ変化率は、乾燥期間 26 週の結果であり、使用した低品質再生粗骨材は、普通粗骨材との置換率を 50 および 100% で用いたものである。改質再生骨材を用いたコンクリートの長さ変化率は、再生コン指針¹⁴⁾で示されている 8×10^{-4} を満足している。また、FM 凍害指数は、再生粗骨材 M の規格値 (JIS A 5022 附属書 D) を満足している。この様に改質再生骨材を用いることで、再生骨材コンクリートの欠点とされていた

表-1 低品質粗再生骨材の種類

骨材名称	品質区分	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)
LA	L	2.32	5.69
LB		2.35	5.66
LC		2.24	6.13
LD		2.26	6.82
OA	外品	2.21	7.44
OB		2.20	10.79

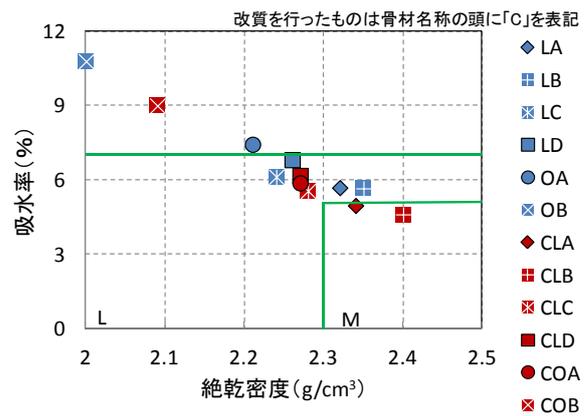


図-9 改質前後の再生粗骨材の密度・吸水率

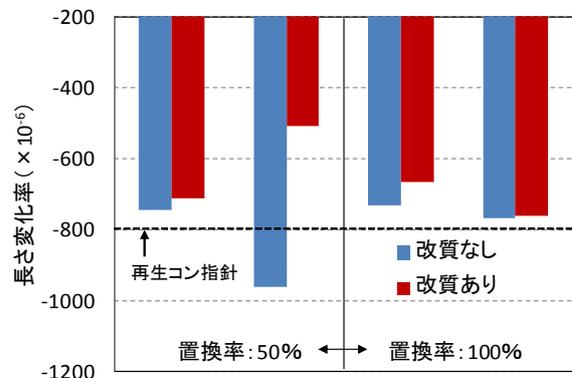


図-10 改質再生骨材を用いたコンクリートの長さ変化率

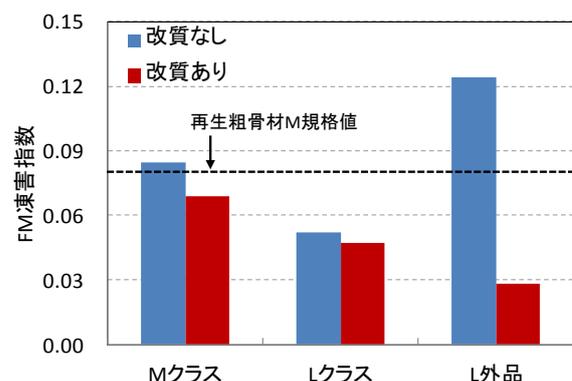


図-11 改質再生骨材の FM 凍害指数

乾燥収縮や凍結融解に対する抵抗性が向上することから、更に適用の範囲を拡大できる可能性がある。

5. まとめ

本報では、東京都圏における再生骨材コンクリートの現状と将来的な必要性について検討し、改質再生骨材の有効性について検討を行った。その結果、以下の内容について確認した。

- (1) 解体コンクリート塊の発生量は、2008年から年々増加し、2015年では680万トンとなっている。今後は年々増加し、2050年では2015年と比較して1.5倍程度増加することが予測される。
- (2) 東京都圏における再生骨材コンクリートの出荷量は、東京都では各仕様書に再生骨材コンクリートに関する事項が明記されており、2020年まではある程度増加する傾向にあると考える。しかし、将来的には解体コンクリート塊の発生量が路盤材の需要を上回することは明白であり、再生骨材コンクリートの需要を促進させる方策の検討が必要である。
- (3) 将来的に東京都圏における再生骨材コンクリートの需要が高まった場合、現状では再生骨材の供給量が十分ではない。再生骨材の供給量を増大させる方法として、既存の中間処理業者が低品質再生骨材である再生骨材 L の製造を行うことが望ましく、再生骨材 L を用いたコンクリートが使用され易い仕組み作りや適用範囲の拡大を検討することが必要である。一方で、それらには再生骨材の品質確保が重要であり、炭酸化による改質技術によって品質の確保やその安定性に寄与することができれば、より安全に低品質再生骨材を使用することができる。
- (4) 改質再生骨材は、品質グレードをクラスアップできる可能性があり、低エネルギー・低コストで製造することができるので、再生骨材の問題点の一つとして考えられる供給不足による安定供給への課題解決に向けた技術となるものと考えられる。また、再生骨材コンクリートの欠点とされていた乾燥収縮や凍結融解に対する抵抗性が向上することから、更に適用の範囲を拡大できる可能性がある。

謝辞

本報の取りまとめにあたり、樋口産業(株)の吉里哲郎氏、増尾リサイクル(株)細野知之氏にご協力を頂きました。また、東京都における廃棄物発生量の予測について、福岡大学工学部社会デザイン工学科の江本幸雄教授にご協力を頂きました。ACRACの統計について柴谷啓一会長、出願五事務局長にご協力を頂きました。ここに付記し、各位に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 国土交通省：平成 24 年度建設副産物実態調査結果参考資料，2014.3
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 松田信広，亀山敬宏，松田美奈，伊代田岳史：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，コンクリート工学年次論文集，vol.36，No.1，pp.1732-1737，2014.7
- 5) 東京都環境局 HP：東京都の資源循環 2009～2013
- 6) 東京都環境局 HP：東京都環境白書 2014～2017
- 7) 吉里哲郎，平山裕二，江本幸雄，大和竹史：福岡都市圏におけるコンクリート廃材の将来発生量予測，土木学会西部支部研究発表会，pp.A-518-519，2001.3
- 8) 建設物価調査会：建築統計年報 1950～2016
- 9) 渋谷和俊，小川秀夫，三本木満，鈴木健介：再生路盤材の需給バランスの予測，土木学会第 63 回年次学術講演会，PP.131-132，2008.9
- 10) 東京都都市整備局：東京都建設リサイクル推進計画，2016.4
- 11) 東京都環境局：東京都資源循環・廃棄物処理計画，2016.3
- 12) 東京都建設局：土木材料仕様書，2013
- 13) 東京都都市整備局：東京都環境物品等調達方針（公共工事），2013
- 14) 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
- 15) 国土交通省 HP：建築着工統計
- 16) 東京都都市整備局 HP：東京の土地利用 平成 23 年東京都区部，2013
- 17) 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，宇都宮大学大学院博士論文，2011.9
- 18) 竹中寛，笠井哲郎：再生粗骨材の付着モルタルの物質が再生骨材コンクリートの品質に与える影響，コンクリート工学論文集，Vol.19，No.3，pp.21-28，2008.9
- 19) 松田信広，鈴木創太，伊代田岳史：改質再生骨材を用いた骨材置換法でのコンクリートの強度および耐久性に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol34，No1，pp.1791-1796，2016.7