

再生骨材Mを用いた低炭素型のコンクリートの研究

神代泰道 田中寛人
松尾克也 植松俊幸
(大阪本店生産技術部)

Research on Low Carbon Concrete Using Recycled Aggregate Class M

Yasumichi Koshiro Hiroto Tanaka
Katsuya Matsuo Toshiyuki Uematsu

Abstract

The supply of high-quality natural aggregates is decreasing annually. Therefore, a resource recycling system that reuses concrete debris from building construction, particularly in urban areas with a high concentration of demolished buildings, is necessary. To address global warming, low-carbon concrete with reduced CO₂ emissions is required. This study experimentally investigated low-carbon concrete using a medium-quality recycled aggregate M to promote a circular economy and carbon neutrality. The crushed concrete debris, processed once using a grinding device, yielded fine and coarse aggregates. Concrete with recycled coarse aggregate M exhibited mechanical properties similar to those of conventional concrete with ordinary aggregates. When using the recycled fine aggregate, a higher dosage of AE superplasticizer was required. Although the compressive strength at 7 days was relatively high, the strength gain after 28 days was limited.

概要

良質の天然骨材は年々減少しており、特に解体建物が集中する都心部においてはコンクリート塊を再び建物へ再利用する資源循環システムの構築が必要である。また地球温暖化の観点から、これまで以上にCO₂排出量を削減した低炭素型のコンクリートが求められる。そこで本研究では、サーキュラーエコノミーとカーボンニュートラルに資するコンクリートの開発を目指し、中品質の再生骨材Mを用いた低炭素型のコンクリートについて実験的に検討した。その結果、コンクリート塊を破碎したものを摩碎装置に1回通すことで、再生細骨材M、再生粗骨材Mをそれぞれ製造できた。再生粗骨材Mを用いた低炭素型のコンクリートの力学特性は、普通骨材を用いた際と概ね同様であった。再生細骨材を用いた場合は、高性能AE減水剤の添加率が多くなり、材齢7日の圧縮強度は比較的高くなるが、材齢28日以降の伸びは小さくなつた。

1. はじめに

サーキュラーエコノミー（循環型経済）は、資源を効率的に利用し、廃棄物を最小限に抑える経済システムであり、従来の生産→使用→廃棄という直線型経済に対して、リサイクルや再利用を考慮し、資源の循環を促進するものである。我が国においては2000年に循環型社会形成推進基本法が制定され、これを基にした2024年の第5次基本計画においては、循環経済が未来につなげる国家戦略として位置付けられた。具体的には、中期的な施策として、建設資材の環境配慮設計、建築物の長寿命化による廃棄物の抑制、副産物・廃棄物の利用拡大などが施策の方向性として示された。

建設業ではその活動に多くのエネルギーと資材が投入されている。建設業の持続可能のためには、これらのサーキュラーエコノミーの実現に資する研究開発が必要である。特に、コンクリート分野においては、良質の天然骨

材は年々減少しており、解体建物が集中する都心部においてはコンクリート塊を再び建物へ再利用する資源循環システムの構築が必要となっている。また地球温暖化の観点から、これまで以上にCO₂排出量を削減した低炭素型のコンクリートが求められる。

そこで、本研究ではサーキュラーエコノミーとカーボンニュートラルに資する低炭素型の再生骨材コンクリートについて、実際の解体建物から排出されるコンクリート塊を原料とし、再生細骨材と再生粗骨材を製造した。これらを用いた低炭素型のコンクリートのフレッシュおよび力学的性状を確認し、その実現可能性について実験的に検討した。

2. 技術の現状

大林組が開発した低炭素型のコンクリート「クリーンコンクリート」は、CO₂排出量の多いセメントを産業副産物で

ある高炉スラグ微粉末やフライアッシュなどの混和材と多量に置換することで、コンクリート1m³あたりのCO₂排出量をセメント100%使用したコンクリートよりも最大80%低減できるコンクリートである¹⁾。2010年に適用して以来、44万m³の適用実績を有し、約10万tのCO₂削減に貢献している。

一方、再生骨材コンクリートはコンクリート塊から骨材を製造し、再度コンクリートとして利用するものであり、再生骨材の品質に応じてH, M, Lの3種類がある。それぞれJIS A 5021（コンクリート用再生骨材H）、JIS A 5022（再生骨材コンクリートM）、JIS A 5023（再生骨材コンクリートL）として規格が定められており、これらは主に骨材の密度、吸水率で区分されている。再生骨材Hは、普通骨材と同様に扱うことができるが、再生骨材Lは高い強度や耐久性が要求されない部材（例えば捨てコン、土間コンなど）に用途が限定されている。再生骨材Mはその中間に位置付けられ、乾燥収縮の影響を受けにくい部材（例えば杭など）に適用できる。

大林組における再生骨材コンクリートに関する研究開発においては、2014年の技術研究所再整備(Photo 1)において、竣工後24年の免震ビルの解体から発生したコンクリート塊をFig. 1に示す工場において、加熱すりもみ方式による処理を行い、高品質の再生細骨材Hと再生粗骨材Hを製造した²⁾。これらの再生骨材を用いて再生コンクリートを製造し、計画内の施設においてコンクリート打放し仕上げの壁に適用した。しかし、再生骨材Hを製造する場合は、製造処理に手間がかかること、製造量（歩留まり）が低下することにより普通骨材を用いる場合よりも高価となることが明らかとなった。さらに解体から使用するまでのタイミングが違うため、保管場所の確保なども課題となつた。このようなことから高品質の再生骨材Hについては他の建築物へ普及することはなかつた。

2022年度の東京都における廃棄物排出量の中で建設業からの廃棄物は1,047.9万tであり、上下水道分野を除外すると全体の86%を占める³⁾。種類別ではコンクリート塊が含まれる「がれき類」が618.1万tで全体の50.7%と最も多い。コンクリート塊の処理の現状は、中間処理場で再生碎石に加工され、道路用の路盤材などに99%と高い再資源化率で再利用されている⁴⁾。

しかし、2024年度における東京都内における再生路盤材の出荷量は292万tであったが、このうち19万tが都外に搬出されており、都内で処理しきれずに余剰となる再生碎石は年々増加している⁵⁾。近い将来、都市部においては、高度経済成長期に建設された建築物やコンクリート構造物の解体によってコンクリート塊の発生は多くなる一方で、路盤材の需要は減少すると予想されており、行き場のない再生碎石が増加すると考えられる。

解体現場で発生するコンクリート塊は中性化していない部分を多く含むことから、コンクリート塊を再生碎石に加工した場合、1tあたり5.1～12.6kgのCO₂を固定する能力があるとされる⁶⁾。東京都における1年間に出荷され



免震ビル
守衛所
Photo 1 技術研究所における解体建物と適用建物
Demolished Building and Applicable Building



Fig. 1 再生骨材製造工場と製造フロー²⁾
Recycled Aggregate Manufacturing Plant and
Manufacturing Flow

る再生碎石が292万tであると仮定すると、この再生碎石によるCO₂を固定できるポテンシャルは1.4～3.6万tとみなせる。骨材に付着しているモルタル分が多いほど、すなわち品質が低いものほどCO₂の吸収量は大きくなる。

再生骨材Hはコストの問題があり、普及が難しいと思われる。そこで本報ではCO₂吸収源としての活用も考慮して中品質の再生骨材Mを用いた低炭素型のコンクリートについて、その品質について実験的に検討することとした。このような取組みは、万が一の際の災害がれきの処理にも備えることができる。

3. 本研究の概要

技術の現状で述べたように、良質の天然骨材は年々減少しており、特に解体建物が集中する都心部においてはコンクリート塊を再び建物へ再利用する資源循環システムの構築が必要である。また地球温暖化の観点から CO₂排出量を削減した低炭素型のコンクリートが求められる。そこで本研究では、サーキュラーエコノミーとカーボンニュートラルを両立できるコンクリートの開発を目指し、低炭素型の再生骨材コンクリートについて実験的に検討した。再生骨材の品質は、再生骨材コンクリートの拡大普及を念頭におき、製造量とコストの制約を受ける高品質ではなく、中品質とした。本コンクリートの適用対象は、杭や地下躯体などのうち乾燥収縮や凍結融解作用への考慮が不要な個所を想定している。本研究では、再生骨材Mを使用した低炭素型のコンクリートの性状を実験的に確認するため、まず原料となるコンクリート塊が発

生する解体建物の調査を行い、そのコンクリート塊を用いて再生骨材を製造した。次に再生骨材の品質に応じて骨材の組み合わせを変えた低炭素型のコンクリートについて各種試験を行った。

4. 解体建物の調査

4.1 解体建物の概要および調査項目

再生骨材を製造する際の原料となる原コンクリートの性状を把握するため、躯体コンクリートの調査を行った。解体建物はPhoto 2に示す関西圏にあるRC・SRC造のごみ処理場であり、竣工から約33年が経過していた。原コンクリートは普通ポルトランドセメントを使用しており、設計基準強度は 24N/mm^2 であることを事前に設計図書で確認した。

コンクリート塊を採取する箇所は熱や化学的な作用を受けていない箇所とし、その近傍の外壁($t=250\text{mm}$)からコア供試体を採取し、圧縮強度および中性化深さを測定した。仕上げは屋外側が吹き付けタイル、屋内側が仕上げのない素地であった。またひび割れやアルカリシリカ反応と思われる変状についても目視で確認されなかった。中性化深さはコア供試体を割裂し、断面にフェノールフタレイン溶液を噴霧して測定した。

4.2 解体建物の調査結果

直径 $\phi 125\text{mm}$ 、高さ 250mm の円柱型のコア供試体を6本採取し、このうち3本を圧縮強度試験、3本を中性化試験にそれぞれ供した。Table 1に圧縮強度の試験結果を示す。供試体の密度の平均は $2,215\text{kg/m}^3$ 、圧縮強度の平均は 29.4N/mm^2 であり、設計基準強度の 24N/mm^2 を満足していることを確認した。なお、強度にばらつきは認められなかった。

3本のコア供試体から測定した中性化深さの結果とフェノールフタレイン溶液噴霧後の状況をTable 2に示す。中性化深さは屋内側より屋外側の方が小さい。これは内外の CO_2 濃度の違いの他に、外壁仕上げの吹付けタイルの影響と考えられる。なお、屋内側の中性化速度係数は $1.11\text{mm}/\sqrt{\text{年}}$ であり、既往の研究²⁾とほぼ同等であった。

5. 再生骨材の製造

5.1 再生骨材の製造

解体建物から採取したコンクリート塊をFig. 2に示す摩碎方式の再生骨材専用の製造プラントを有する中間処理場において再生骨材を製造した。同図に再生骨材の製造フローを示す。まず1次処理として、コンクリート塊を 40mm 以下に破碎した（破碎処理）。これを以降、破碎品と呼ぶ。2次処理として、破碎品を摩碎装置に投入した（摩碎処理）。この摩碎装置では、破碎品同士を斜めに取り付けられた摩碎板ですり合わせることでモルタル分を剥離させる。その後、湿式分級により摩碎後の骨材を洗浄



Photo 2 解体中の建物

Building under Demolition

Table 1 コア供試体の圧縮強度試験結果

Compressive Strength Test Results of Core Specimens

供試体	密度 (kg/m^3)	圧縮強度 (N/mm^2)
No.1	2,206	30.9
No.2	2,207	28.8
No.3	2,233	28.4
平均	2,215	29.4

Table 2 コア供試体の中性化試験結果

Neutralization Test Results of Core Specimens

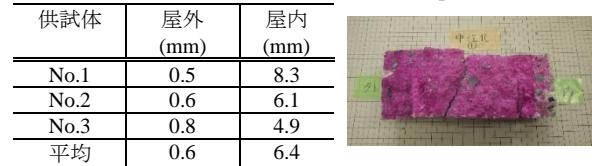


Fig. 2 再生骨材製造工場および製造フロー
Recycled Aggregate Manufacturing Plant and Manufacturing Flow



Fig. 3 再生骨材の製造量の割合
Percentage of Recycled Aggregate Manufactured

後、振動ふるいにて粒径 $5\sim20\text{mm}$ の粗骨材と粒径 5mm 以下の細骨材に分けた。今回は摩碎処理を0, 1, 2回として骨材の品質を確認した。なお、0回のものは破碎品をふるい分けしたものとした。



Photo 3 再生骨材の外観
Appearance of Recycled Aggregates

Table 3 骨材試験の結果

Results of Aggregate Tests

(1) 再生粗骨材 (Recycled Coarse Aggregate)

項目	試験方法	試験結果 (摩碎回数)		
		0回	1回	2回
絶乾密度(g/cm ³)	JIS A 1110	2.26	2.37	2.46
吸水率(%)	JIS A 1110	6.20	4.45	3.41
微粒分量(%)	JIS A 1103	2.2	0.9	0.4

(2) 再生細骨材 (Recycled Fine Aggregate)

項目	試験方法	試験結果 (摩碎回数)	
		0回	1回
絶乾密度(g/cm ³)	JIS A 1110	1.83	2.31
吸水率(%)	JIS A 1110	16.51	5.76
微粒分量(%)	JIS A 1103	8.0	1.9

5.2 再生骨材の製造結果

再生骨材の製造割合をFig. 3に示す。摩碎1回目の歩留まりは概ね粗骨材5:細骨材4:微粒分1程度であり、摩碎2回目の歩留まり（摩碎1回目から得られる粗骨材のみ使用）は概ね粗骨材9:細骨材+微粒分1程度となった。2回目の摩碎時に得られる細骨材は微量であるため、今回の検討対象外とした。Photo 3に製造した再生骨材を示す。

製造した再生骨材の品質として、絶乾密度、吸水率、微粒分量および粒度分布を測定した。Table 3に試験結果、Fig. 4および5に絶乾密度と吸水率の試験結果を示す。また、Fig. 6に粒度分布の試験結果を示す。Fig. 4および5に示したように、再生骨材の絶乾密度および吸水率は、破碎品をふるい分け処理した摩碎0回では、再生粗骨材はLとなつたが、再生細骨材はLの基準を満たさなかつた。摩碎処理をしたもののは1回目で再生粗骨材、再生細骨材ともMの範囲となつた。摩碎回数を2回行った再生粗骨材は、1回のものと比べ、骨材に付着したモルタル分がより剥離され、より高品質となっていることが分かる。粒度分布はすべて基準値内であることを確認した。

今回は再生骨材を中性化させていないが、中性化させた場合は、文献⁷⁾を参考にして再生粗骨材Mの付着モルタル量が20%であると仮定するCO₂吸収量のポテンシャルは8kg-CO₂/t-骨材になると推定される。したがって、仮にコンクリート1m³あたり再生粗骨材Mを900kg用いると7.2 kg-CO₂/m³の削減効果が期待できる。

6. 再生骨材コンクリートの実験

6.1 実験概要

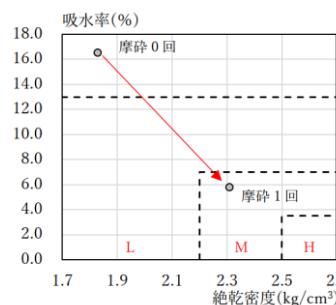


Fig. 4 再生細骨材の品質
Quality of Recycled Fine Aggregate

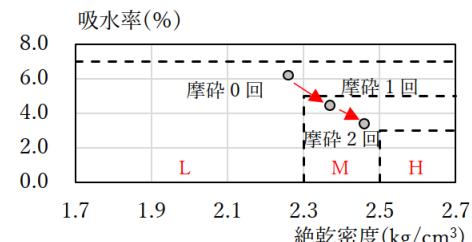


Fig. 5 再生粗骨材の品質
Quality of Recycled Coarse Aggregate

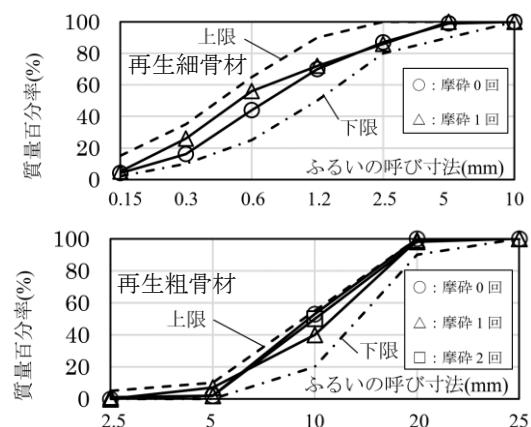


Fig. 6 骨材の粒度曲線
Aggregate Particle Size Curve

コンクリートの使用材料をTable 4に、調合をTable 5に示す。コンクリートは普通ボルトランドセメントと高炉スラグ微粉末の割合を25:75とし、水結合材比を50%とした高炉スラグ微粉末高含有の低炭素型のコンクリートとし、使用する骨材をそれぞれ変えた。細骨材の種類は、

普通細骨材（以下、NS）と再生細骨材の摩碎回数0, 1回（以下、順にROS, R1S）の計3種類とし、粗骨材の種類は、普通粗骨材（以下、NG）と再生粗骨材の摩碎回数1, 2回（以下、順にR1G, R2G）の計3種類とした。なお、NSと再生細骨材の原骨材は異なり、NGと再生粗骨材の原骨材も異なる。また、再生骨材の品質はR1S, R1GおよびR2Gが再生骨材Mとなる。コンクリートの種類（記号名は「細骨材の種類-粗骨材の種類」）は、普通骨材を用いた低炭素型のコンクリートと、再生骨材Mを用いた低炭素型のコンクリートの4調合の計5調合とした。なお、NS+ROS-R1Gは、細骨材として普通細骨材とROSを容積比70:30で混合したものであるが、ROSが再生細骨材Lの基準を満足しなかったため、再生骨材コンクリートMの規格は満足していない。

恒温恒湿室(20°C, 60%RH)にて、二軸強制練りミキサを用いてコンクリートを練り混ぜ、フレッシュ性状を確認して供試体を作製し、各養生方法にて養生した。試験項目および試験方法をTable 6に示す。養生条件は標準養生、封かん養生、簡易断熱養生とし、力学特性の確認として、それぞれの圧縮強度とヤング係数を測定した。

6.2 実験結果

6.2.1 フレッシュコンクリート フレッシュ性状の結果をTable 7に示す。また、スランプ試験の結果の一例をPhoto 4に示す。いずれの調合についても所要のフレッシュ性状を満足した。また、塩化物量は0.3kg/m³未満であった。再生骨材を用いた際のハンドリング性は普通骨材を用いた際と同様に良好であった。また、再生細骨材を用いた際の高性能AE減水剤の添加率は大きくなかった。これは、再生細骨材の吸水率が高く、さらに微粒分量が多いためと考えられる。今回は単位水量を175kg/m³に固定したが、高性能AE減水剤の添加率を調整することで再生骨材の種類に関わらず、所要のフレッシュ性状を得られることができた。

6.2.2 硬化コンクリート 圧縮強度の試験結果をFig. 7に示す。普通骨材と再生粗骨材Mを組み合せたNS-R2GとNS-R1Gの標準養生の圧縮強度は、NS-NGと概ね同程度であった。また、再生粗骨材Mの規格内であれば、摩碎回数に関わらず、圧縮強度は概ね同程度になることが分かった。一方、再生細骨材を用いたR1S-R1GとNS+ROS-R1Gについては、材齢7日の圧縮強度は比較的高いが、材齢28日以降の伸びが他よりも小さくなつた。これについては再生細骨材に含有されるモルタル分の影響と思われる。封かん養生および簡易断熱養生についても同様の傾向が見られたが、材齢91日における圧縮強度は、いずれの調合もほぼ同等となった。標準養生の場合の圧縮強度とヤング係数の関係をFig. 8に示す。なお、図には、JASS 5の解3.3式による計算値も示した。なお、k1=1.0, k2=0.95とし、γは材齢28日におけるNS-NGの見かけの単位容積質量を用いた。再生骨材の使用の有無および再生骨材の組合せに関わらず、計算値と同等以上のヤング係

Table 4 コンクリートの使用材料
Concrete Materials

材料	記号	種類と備考
水	W	上水道水
セメント	C	普通ポルトランドセメント（密度3.16g/cm ³ ）
混和材	BS	高炉スラグ微粉末4000（密度2.89g/cm ³ ）
	NS	陸砂（表乾密度2.60g/cm ³ , 吸水率2.08%）
	ROS	再生細骨材 摩碎0回（表乾密度2.11g/cm ³ , 吸水率16.51%, 微粒分量8.0%）
細骨材	R1S	再生細骨材 摩碎1回（表乾密度2.44g/cm ³ , 吸水率5.76%, 微粒分量1.9%）
	NG	碎石2005（表乾密度2.72g/cm ³ , 吸水率0.57%）
	R1G	再生粗骨材 摩碎1回（表乾密度2.48g/cm ³ , 吸水率4.45%, 微粒分量0.9%）
粗骨材	R2G	再生粗骨材 摩碎2回（表乾密度2.57g/cm ³ , 吸水率3.41%, 微粒分量0.4%）
	SP	高性能AE減水剤

Table 5 コンクリートの調合
Concrete Mixing

記号	W/B (%)	単位量(kg/m ³)								SP (B ×%)	
		W	B		S			G			
			C	BS	NS	ROS	R1S	NG	R1G	R2G	
NS-NG	50	175	88	263	843	—	—	918	—	—	0.8
NS-R2G	50	175	88	263	843	—	—	—	—	867	0.8
NS-R1G	50	175	88	263	843	—	—	—	837	—	0.8
R1S-R1G	50	175	88	263	—	—	791	—	837	—	1.2
NS+ROS-R1G	50	175	88	263	590	205	—	—	837	—	1.35

目標スランプ : 21±1.5cm, 目標空気量 : 4.5±1.5%

Table 6 コンクリートの試験項目
Concrete Testing Items

試験・測定項目	試験方法	備考
スランプ	JIS A 1101	—
空気量	JIS A 1128	—
コンクリート温度	JIS A 1156	—
単位容積質量	JIS A 1116	—
塩化物量	JASS 5T-502	—
圧縮強度	JIS A 1108	標準養生, 封かん養生, 簡易断熱養生
ヤング係数	JIS A 1149	材齢7, 28日, 56日, 91日

Table 7 フレッシュコンクリートの試験結果
Fresh Concrete Test Results

記号	スランプ (cm)	空気量 (%)	単位容積 質量(kg/m ³)	コンクリート温度 (°C)
NS-NG	20.5	5.6	2,271	20
NS-R2G	21.5	5.6	2,216	20
NS-R1G	20.5	3.6	2,234	20
R1S-R1G	21.0	3.4	2,209	20
NS+ROS-R1G	20.5	3.7	2,204	20



(1)NS-NG (2)R1S-R1G
Photo 4 スランプ試験結果の一例
Example of Slump Test Results

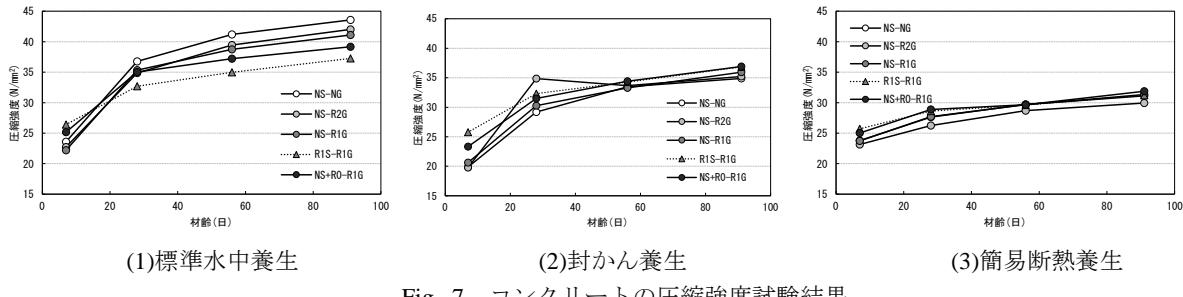


Fig. 7 コンクリートの圧縮強度試験結果
Compressive Strength Test Results of Concrete

数が得られることが分かった。なお、封かん養生および簡易断熱養生についても同様の傾向であった。

7.まとめ

資源循環性と低炭素性を有した低炭素型のコンクリートの開発を目的とし、中品質の再生骨材Mを用いた際のフレッシュ性状および力学特性を確認した。本実験で得られた結果を以下に示す。

- 1) 解体建物からコア供試体を採取し、設計基準強度を満足していることを確認した。
- 2) コンクリート塊を破碎したものを摩碎装置に1回通することで、再生細骨材M、再生粗骨材Mをそれぞれ製造できた。
- 3) 高性能AE減水剤の添加率を調整することで、所要のフレッシュ性状を満足した。
- 4) 再生粗骨材Mを用いた低炭素型のコンクリートの力学特性は、普通骨材を用いた場合と概ね同様であった。
- 5) 再生細骨材を用いた場合は、高性能AE減水剤の添加率が多くなった。また、材齢7日の圧縮強度は比較的高くなるが、材齢28日以降の伸びは小さくなつた。

以上の結果、再生骨材Mを用いた低炭素型のコンクリートの性状を確認することができた。今後は、再生骨材コンクリートMが適用できる杭などへの適用を検討していく。

参考文献

- 1) 小林利充、近松竜一、溝渕麻子、一瀬賢一：低炭素型のコンクリート「クリーンクリート™」の開発、大林組技術研究所報、No.75, pp.1-8, 2011

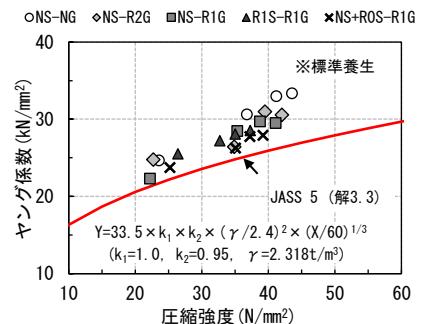


Fig. 8 コンクリートの圧縮強度とヤング係数の関係
Relationship between Compressive Strength and Young's Modulus of Concrete

- 2) 神代泰道、三谷一房、渕田安浩、並木憲司、一瀬賢一：高品質再生コンクリートによるコンクリート塊全量再利用モデルの適用、大林組技術研究所報、No.74, pp.1-6, 2010
- 3) 東京都環境局：東京都産業廃棄物経年変化実態調査報告書（令和4年度実績），2024
- 4) 国土交通省：令和6年度建設副産物実態調査、<https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/content/07shiryo/u4.pdf> (2025/5/27 確認)
- 5) 公益社団法人全国産業資源循環連合会 資料
- 6) 土木学会：コンクリートライブラー134 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—補修における環境配慮および解体コンクリートのCO₂固定化—，2012
- 7) 神代泰道、入江真吾、一瀬賢一：再生粗骨材Mを用いた再生コンクリートの品質、大林組技術研究所報 No.73, pp.1-6, 2009