低品質再生骨材を用いたコンクリート強度の改善方法に関する研究†

澤 本 武 博* 辻 正 哲**

Technique to Produce Recycled Aggregate Concrete with Crushed Concrete Waste

by

Takehiro SAWAMOTO* and Masanori TSUJI**

Concrete waste is hardly recycled to be aggregate for concrete by only normal crushing, because the micro cracks remain in the crushed concrete and the particles of only mortar or cement paste are included. Thus many techniques to produce recycled aggregate are proposed and practiced, but these techniques need significantly much energy and may generate much CO₂.

As the preliminary test results, it was clarified that processes for recycled aggregate to absorb water or Pozzolanic material can improve the strength of recycled aggregate concrete, even though the only crushed concrete wastes are used. This absorbed water or Pozzolanic liquid is expected to fill up the micro cracks in recycled aggregate with cement gel by cement hydration or Pozzolanic reaction.

Process to soak aggregate in mixing water was tried in the preliminary test for recycled aggregate to absorb water, but this process takes more than 10 minutes. On the other hand, attendance of colloidal silica as a Pozzolanic material into mixing water caused smaller slump.

In this paper, the process to soak the recycled aggregate in colloidal silica solution before mixing is evaluated to sustain slump of plain concrete, and also the application of agent for reducing surface tension of mixing water is investigated to cut off the soaking process that is for aggregate to absorb enough water during mix.

Key words: Recycled aggregate, Concrete, Colloidal silica, Drying shrinkage reducing agent, Concrete waste, Recycle

1 は じ め に

コンクリート廃材の主な再利用先は道路用の路盤材であり、より高度な品質・安定性を必要とするコンクリート用再生骨材としてはあまり利用されていないのが現状である。これには、コンクリート廃材を一次破碎しただけでは、骨材中に微細ひび割れが残存すること等により、低強度のコンクリートの製造にしか利用できないことや、もし二次処理を行って高品質の再生骨材を製造するとしても、多量のエネルギーが必要となり、化石燃料に依存している限り、それが環境問題につながる可能性があること等が原因として考えられる。

一次破碎しただけの再生骨材を使用したコンクリートの強度改善方法としては、その微細ひび割れ中へ水分またはセメントペーストを吸収させることを期待した、水中浸漬方法および減圧練混ぜ方法が考えられる。さらに、再生骨材の自癒作用を期待して、再生骨材中に吸収させる水にボゾラン反応を期待できる液体を添加する方法も考えられる。しかし、単に練混ぜ水全体にボゾラン反応を期待できる液体を添加しただけでは、強度改善効果は大きく期待できるものの、スランプの低下が大きくなるといった場合も存在することが明らかとなっている。^{1), 2)}

本研究では、フレッシュコンクリートのワーカビリテ

ィーを損ねることなく、一次破碎しただけの低品質な再生骨材を用いたコンクリートの強度改善を目的とし、あらかじめボゾラン反応を期待できる液体に再生骨材を浸漬することにより、再生骨材の自癒作用によって再生骨材コンクリートの強度改善を期待したシリーズ1、および表面張力の低い液体を用いることにより再生骨材中への水分の吸収を容易にし、再生骨材中へセメント水和物またはセメントペーストが充填することを期待したシリーズ2について検討した。

2 実 験 概 要

再生骨材の製造方法は、Fig. 1に示すように締固め不良かつ養生不良の低品質の原コンクリートをジョークラッシャーで破碎し、ふるい分けを行う方法とした。実験には、水セメント比が60%の原コンクリートから作製した再生粗骨材A、または水セメント比が70%の原コンクリートから作製した再生粗骨材Bを使用した。再生粗骨材の物理的性質は、Table Iに示す通りである。

使用したセメントは、普通ポルトランドセメント(密度3.16g/cm³)であり、比較用の普通骨材および原コンクリートの作製に用いた骨材は、鬼怒川産川砂(密度2.60g/cm³, 吸水率1.32%, 粗粒率2.60)および山梨産碎石(密度2.70g/cm³, 吸水率0.92%, 粗粒率7.36)である。

† 原稿受理 平成12年1月7日 Received Jan. 7, 2000

* 学生会員 東京理科大学理工学研究科土木工学専攻 〒278-8510 野田市山崎, Graduate Student, Science Univ. of Tokyo, Yamazaki, Noda, 278-8510

** 正 会 員 東京理科大学理工学部土木工学科 〒278-8510 野田市山崎, Dep. of Civil Eng., Science Univ. of Tokyo, Yamazaki, Noda, 278-8510

Fig. 1. Flow chart of producing recycled aggregate.

Table I. Properties of recycled aggregate.

Recycled aggregate	Specific gravity	Absorption (%)	Fineness modulus
Recycled coarse aggregate A	2.44	6.09	6.66
Recycled coarse aggregate B	2.36	7.23	6.72

2・1 ポゾラン反応を期待できる液体による再生骨材コンクリートの強度改善に関する実験 (シリーズ1)

シリーズ1では、ポゾラン反応を期待できる液体として、物理的性質および電子顕微鏡写真をそれぞれ Table II および Fig. 2 に示したコロイダルシリカを用いた。³⁾

比較のために行った練混ぜ水にコロイダルシリカを添加する場合は、練混ぜ水のシリカ質濃度を 0%, 6% および 15% として実験を行った。²⁾

あらかじめ再生骨材中へコロイダルシリカを吸収させておく方法は、シリカ質の濃度を 0%, 6% または 15% としたコロイダルシリカ溶液中に、再生粗骨材を 0 分、10 分、30 分または 90 分間浸漬する方法とした。再生粗骨材をあらかじめコロイダルシリカ溶液の湿潤状態とする方法は Fig. 3 に示す通りである。練混ぜ方法は、所定の時間コロイダルシリカ溶液中に浸漬しておいた再生粗骨材をざるの上に引き上げて余分な水分を切った後ミキサ

Table II. Properties of colloidal silica.³⁾

Content of SiO ₂ (wt.%)	Content of Na ₂ O (wt.%)	Diameter of Particle (nm)	Specific gravity
30~31	Under 0.6	10~20	1.20~1.22

Fig. 2. Picture of colloidal silica. (by microscope)³⁾

Recycled coarse aggregate is soaked in colloidal silica solution. Recycled coarse aggregate is taken out from colloidal silica solution with net.

Fig. 3. Flow chart of producing recycled coarse aggregate absorbing colloidal silica solution.

に投入し、川砂、セメント、練混ぜ水を順次投入して大気圧下で4分間練り混ぜる方法とした。なお、このシリーズ1における再生粗骨材の表面水率は、ミキサへの投入時における状態の骨材の質量と骨材の表面を布によって拭い表乾状態としたときの質量の差をすべて表面水と仮定し求めた。そのため、表面水に含まれ本来シリカとして取り扱うべき若干のシリカも水として計算される結果となっている。実験に用いたコンクリートの配合は、水セメント比を40%, 細骨材率を43%, 空気量を2.0%として求めた。なお、再生骨材コンクリートの骨材には、川砂および再生粗骨材Aまたは再生粗骨材Bを組み合わせ使用した。

2・2 表面張力を低下させる混和剤による再生骨材コンクリートの強度改善に関する実験 (シリーズ2)

比較のために行った表面張力を低下させる目的の混和剤を用いない場合における再生骨材中への吸水方法は、Table III に示す通りである。¹⁾ また、-600mmHgの減圧下

Table III. Condition of recycled aggregate before mixing.¹⁾

Condition 1	Air-dry condition
Condition 2	Soaked in mixing water for 30minutes under atmospheric pressure
Condition 3	Soaked in mixing water for 30minutes under pressure of 160mmHg

で練り混ぜる方法についても実験を行った。¹⁾

水の表面張力を低下させることによって再生骨材中への水分の吸収を容易にする方法として、練混ぜ水に乾燥収縮低減剤を添加する方法について検討した。この場合は、再生骨材の保管中における固結を避けるために、再生骨材は気乾状態すなわち Table III に示した Condition1 の状態で使用し、大気圧下で4分間練り混ぜる方法とした。なお、再生骨材コンクリートの骨材には、川砂および再生粗骨材 B を使用した。

コンクリートの配合は、水セメント比を 40%、細骨材率を 43%、空気量を 2.0% とし、乾燥収縮低減剤の添加量をセメント質量に対して 0%、1%、2%、4%、6% および 10% の 6 段階に変化させて求めた。また、乾燥収縮低減剤をセメント質量に対して 0%、2%、4% および 6% 添加した時の練混ぜ水の表面張力も測定した。すなわち、今回の配合では水セメント比が 40% であるため、これら練混ぜ水における乾燥収縮低減剤の濃度は 0%、5%、10% および 15% となる。

3 実験結果および考察

3・1 ポゾラン反応を期待できる液体による再生骨材コンクリートの強度改善効果 (シリーズ1)

練混ぜ水にコロイダルシリカを添加した場合における、練混ぜ水中のシリカ質濃度と材齢 28 日におけるコンクリートの圧縮強度の関係は、Fig. 4 に示す通りである。コロイダルシリカ溶液中のシリカ質を全て結合材としてセメントと置換したにもかかわらず、練混ぜ水中のシリカ質濃度が増加するに伴い、圧縮強度は大きくなっている。²⁾しかし、練混ぜ水全体にコロイダルシリカを添加した場合には、Fig. 5 に示すようにスランプの経時変化が大きくなる傾向にあった。また、同じ濃度のコロイダルシリカ溶液を用いても、練混ぜ水にコロイダルシリカを直接添加すると、あらかじめコロイダルシリカ溶液中に浸漬しておいた再生粗骨材を用いた場合に比べて、練上り直後のスランプが小さくなった。

あらかじめコロイダルシリカ溶液中に浸漬しておいた

Fig. 4. Relation between concentration of silica in mixing water and compressive strength of concrete. (Age : 28days)²⁾

再生粗骨材を用いた場合における、浸漬しておくコロイダルシリカ溶液のシリカ質濃度と再生骨材コンクリートのスランプの関係は、Fig. 6 に示す通りである。再生粗骨材を浸漬しておくコロイダルシリカ溶液のシリカ質濃度が増加しても、再生骨材コンクリートのスランプは低下しない傾向にある。再生粗骨材を浸漬しておくコロイダルシリカ溶液のシリカ質濃度と材齢 28 日における再生骨材コンクリートの圧縮強度の関係は、Fig. 7 に示す通りである。再生粗骨材 A および再生粗骨材 B のいずれを用いた場合にも、再生粗骨材を浸漬しておくコロイダルシリカ溶液のシリカ質濃度が高くなるに従い、再生骨材コンクリートの圧縮強度は大きくなる傾向にあった。これは、コロイダルシリカを再生骨材にあらかじめ吸収させておくことにより、コンクリートの硬化過程でポゾラン反応が進行し、再生骨材の自癒作用によりその微細ひび割れの影響を減じたためと考えている。また、練混ぜ

Fig. 5. Relation between elapsed time and slump of concrete. [Concentrations of silica in colloidal silica solution for soaking aggregate or mixing water are 6%.]

Fig. 6. Relation between concentration of silica in colloidal silica solution and slump of concrete. [Recycled coarse aggregate soaked in colloidal silica solution for 30minute is used.]

水全体に直接コロイダルシリカを添加した場合に比べると、強度の増加量は若干小さいものの、スランブにほとんど影響しないにもかかわらず再生粗骨材コンクリートの強度改善効果が期待できる。

再生粗骨材のコロイダルシリカ溶液中への浸漬時間と材齢 28 日における再生骨材コンクリートの圧縮強度の関係は、Fig. 8 に示す通りである。再生粗骨材 A、再生粗骨材 B を用いた場合ともに、浸漬時間が増加するに伴い圧縮強度も増加する傾向にあった。また、再生粗骨材 A を用いた場合は、再生粗骨材のコロイダルシリカ溶液中への浸漬時間が 30 分間程度でほぼ圧縮強度の増加は頭打ちになり始めているが、再生粗骨材 B を用いた場合には、90 分間浸漬しても圧縮強度は増加し続けているようである。これは、再生粗骨材 B の方が再生粗骨材 A に比べて、水セメント比が大きく微細空隙が多いため、コロイダルシリカ溶液を吸収するために要する時間が長く

なったためと思われる。また、再生粗骨材のコロイダルシリカ溶液中への浸漬時間が長くなると Fig. 9 に示すように空気量が減少する傾向にある。これは、浸漬時間の増加と共に骨材の周りの気泡が抜け易くなったことによると考えられる。一般に、空気量 1% の減少に伴う圧縮強度の増加率はおおよそ 5% であるため、コロイダルシリカ溶液中への浸漬による強度改善効果は、空気量の減少によるだけでなく、骨材自身の強度改善や骨材とセメントペーストとの付着性状の改善による所も大きいと考えられる。なお、Fig. 10 は再生粗骨材をシリカ質濃度が 15% のコロイダルシリカ溶液に 24 時間浸漬し、ゲル化した溶液の一部を取り除いた時の写真である。コロイダルシリカ溶液中への再生粗骨材の浸漬時間を極端に長くすると、コロイダルシリカが再生骨材のセメント成分と反応しゲル状になるため、その取り扱いに支障をきたす可能性がある。

Fig. 7. Relation between concentration of silica in colloidal silica solution and compressive strength of recycled aggregate concrete. (Age: 28 days) [Recycled coarse aggregate soaked in colloidal silica solution for 30 minute is used.]

Fig. 8. Relation between time taken for recycled coarse aggregate to be soaked in colloidal silica solution and compressive strength of recycled aggregate concrete. (Age: 28 days).

Fig. 9. Effect of time taken for recycled coarse aggregate to be soaked in colloidal silica solution on air content of recycled aggregate concrete.

Fig. 10. Picture of colloidal silica solution after soaking recycled coarse aggregate for 24 hours.

3・2 表面張力を低下させる混和剤による再生骨材コンクリートの強度改善効果 (シリーズ2)

再生骨材の吸水方法および減圧練混ぜ方法が再生骨材コンクリートのスランプおよび単位容積質量におよぼす影響は、Fig. 11 に示す通りである。また、再生骨材中への吸水および減圧練混ぜによる強度改善効果は、Fig. 12 に示す通りである。このように、再生骨材中になるべく多くの水分を吸収させることにより、再生骨材コンクリートの強度は大きく改善されている。¹⁾しかし、再生骨材中へ水分を吸収させるためにはそれなりの時間が必要となること、また減圧下で練り混ぜるためには、従来の製造設備に何らかの工夫を加えることが必要となる。そのため、表面張力を低下させる混和剤として、乾燥収縮低減剤を用いることによって、練混ぜ中の短時間だけで再生骨材中へ容易に水分を吸収させる方法について検討した。

Fig. 13 は、乾燥収縮低減剤の濃度と表面張力の関係を表したものである。乾燥収縮低減剤を添加することにより、練混ぜ水の表面張力は大きく低下した。また、乾燥収縮低減剤の濃度を 5% (セメント質量のおおむね 2% に相当) 以上としてもあまり表面張力は変化しないようである。

乾燥収縮低減剤の添加量と再生骨材コンクリートのスランプおよび単位容積質量の関係は、Fig. 14 に示す通りである。乾燥収縮低減剤を練混ぜ水に添加することにより、再生骨材コンクリートの単位容積質量は大きくなる傾向にあった。これは、練混ぜ水の表面張力が低下することにより、練混ぜ中に気泡が抜け易くなり再生骨材の微細ひび割れ中に多くの水分が吸収されたためと考えられる。

乾燥収縮低減剤の添加量と再生骨材コンクリートの圧縮強度の関係は、Fig. 15 に示す通りである。表面張力の低下を期待できる範囲すなわちセメント質量の 2% 程度までは、再生骨材コンクリートの圧縮強度は大きくなる傾向にあった。これは、再生骨材の微細ひび割れ中になるべく多くの水分を吸収させることにより、コンクリ

ートの硬化過程でセメント水和物がそのひび割れ部を充填したためと考えられる。このように、乾燥収縮低減剤を練混ぜ水に添加して表面張力を低下させることにより、

Fig. 12. Relation between condition of recycled aggregate and compressive strength of concrete.¹⁾

Fig. 11. Effect of condition of recycled aggregate on unit weight and slump of concrete.¹⁾

Fig. 13. Relation between concentration of drying shrinkage reducing agent and surface tension of solution.

Fig. 14. Effect of dosage of drying shrinkage reducing agent on unit weight and slump of concrete. [Recycled coarse aggregate B (Condition1) is used.]

Fig. 15. Relation between dosage of drying shrinkage reducing agent and compressive strength of recycled aggregate concrete. [Recycled coarse aggregate B is used.]

気乾状態の再生骨材を使用しても、あらかじめ30分間水中浸漬した再生骨材を使用した場合と同等以上の圧縮強度となった。しかし、練混ぜ水の表面張力が同程度であっても、乾燥収縮低減剤の添加量が多くなりすぎると圧縮強度は低下するようである。これは、乾燥収縮低減剤の添加量が標準添加量を大きく超えると、セメントの水和に何らかの悪影響を生じることによると考えられる。

4 ま と め

コロイダルシリカをあらかじめ再生骨材の微細ひび割れ中に吸収させるように工夫すると、スランプにほとんど影響しないにもかかわらず、再生骨材コンクリートの圧縮強度は大きく改善された。また、乾燥収縮低減剤を用い練混ぜ水の表面張力を低下させることにより、気乾

状態の再生骨材を用いた場合でも、水中浸漬しておいた再生骨材を用いた場合と同等以上の圧縮強度を得ることができた。

本研究は、日本学術振興会未来開拓学術研究（代表：新潟大学 教授 長瀧重義）の一環として行われたものである。

参 考 文 献

- 1) 辻 正哲, 澤本武博, 田中祐二, 田中丸善史, 日本材料学会第48期学術講演会講演論文集, p.115 (1999).
- 2) 辻 正哲, 澤本武博, コンクリート工学, Vol.37, No.11, p.27 (1999).
- 3) 技術資料スノーテックス, 日産化学工業(株) (1999).