

# 繰返し再生した粗骨材中へのコロイダルシリカ 吸収処理がコンクリートの性質に及ぼす影響

澤本武博<sup>1</sup>・辻正哲<sup>2</sup>

<sup>1</sup>学生会員 修士(工学) 東京理科大学大学院 理工学研究科土木工学専攻(〒278-8510 野田市山崎2641)

<sup>2</sup>正会員 工博 東京理科大学教授 理工学部土木工学科(〒278-8510 野田市山崎2641)

本研究では、繰返し再生した粗骨材を用いたコンクリートの力学的性質の改善を目的として、骨材中へのポゾラン反応を期待できるコロイダルシリカ溶液の吸収処理が、コンクリート強度およびRC部材の曲げせん断・せん断破壊する場合の力学的挙動に及ぼす影響について検討した。その結果、コンクリートを練り混ぜる直前に再生粗骨材をコロイダルシリカ溶液中に浸漬してから用いることによって、コンクリートの圧縮強度は大きく改善された。また、繰返し再生した粗骨材を用いるとRC部材がせん断破壊する場合の靱性はある程度低下するが、コロイダルシリカ溶液の吸収処理によって、その低下する程度をかなり改善できた。

**Key Words :** reinforced concrete, repeatedly recycled coarse aggregate, colloidal silica, compressive strength, toughness

## 1. はじめに

コンクリート廃材をリサイクルする場合には、品質を低下させることなく再びコンクリートへ繰返し使用することが望ましい。しかし、現状では、コンクリート廃材の再利用先のほとんどは道路用の路盤材であり、コンクリート用骨材としてはあまり利用されていない。これには、ジョークラッシャ等でコンクリート廃材を一次破碎しただけでは、骨材中に微細なひび割れが残存すること、セメントペーストやモルタルのみからなる骨材が混入すること等により、凍結融解に対する抵抗性等の耐久性を確保できないこと<sup>1)</sup>や、低強度のコンクリートの製造にしか利用できないことが関係していると思われる。そのため、二次処理として、摩砕処理による不要なセメントペーストやモルタル分の除去や密度選別等によって、高品質の再生骨材を製造する方法が開発され実用化されつつある。しかし、こうした方法では、新しく骨材を製造するよりも多量のエネルギーを使用するケースが多い。この過程を、一般の碎石や砕砂の製造過程と比較すると、一次破碎およびふるい分けの工程では、あまりエネルギー的な差はないと思われる。しかし、再生に当たっては、頑強に付着している不要なペースト分を取り除く過程で、余分なエネルギーが必要になると考えられる。特に良質な

骨材の回収率を上げるためには、乾式・湿式のいずれにおいても摩砕等の処理に要するエネルギーが無視できない他、密度選別等のこれ以外の工程やその工程で発生する廃棄物の処理にもエネルギーが必要となる。このようなエネルギー消費の増大を伴うリサイクルの場合、化石燃料を主なエネルギー源としている現状下では、地上の最終処分場の延命策として、多量の二酸化炭素の排出等によって大気中に最終処分場を求める結果になりかねない。

以上の観点から、コンクリート廃材をコンクリート用骨材としてリサイクルする場合には、一次破碎・粒度調整しただけのコンクリート廃材をコンクリート用骨材として再利用することが望ましい。また、将来的には様々な履歴を受けたコンクリート廃材が繰返し再利用される可能性がある。そして、骨材の繰返し再生回数が増加すると、バージン骨材に付着するモルタル分や骨材中に残存する微細ひび割れが極端に多くなることが考えられ、鉄筋コンクリート用骨材として用いた場合には、岩石質の粗骨材によるクラックアレスト効果やひび割れ面でのせん断伝達機構に変化が生じる可能性がある。

本研究では、現在一般に用いられている碎石と同程度のエネルギーで製造できる一次破碎・粒度調整しただけの繰返し再生した低品質な粗骨材を用いたコンクリートの力学的性質の改善を目的として、

あらかじめ再生粗骨材にコロイダルシリカ溶液すなわちポズラン反応を期待できる液体を吸収させておく方法<sup>2), 3), 4), 5)</sup>が、繰返し再生した粗骨材を用いたコンクリートの強度およびRC部材の曲げせん断・せん断破壊する場合の力学的挙動に及ぼす影響について検討した結果について報告する。

## 2. 本研究に至る背景

著者らは、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、骨材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、減圧下での水中浸漬方法および減圧練混ぜ方法を検討してきた<sup>6), 7)</sup>。また、表面張力の低い液体を練混ぜ水に用いることによって、再生骨材中への水分の吸収を容易にする方法についても検討してきた<sup>8)</sup>。その結果、あらかじめ減圧下で水中浸漬した再生骨材を用い、さらに減圧下で練り混ぜることによって、普通骨材を用いたコンクリートのおおよそ95%の圧縮強度を得ることができた。しかし、減圧下での水中浸漬方法および減圧練混ぜ方法は、従来の設備に何らかの工夫を加えることが必要となる。また、表面張力の低い液体を練混ぜ水に用いる方法は、容易に水分を再生骨材中へ吸収させることができると考えられ<sup>9)</sup>、ある程度の強度改善効果は期待できたものの、繰返し再生過程における強度履歴等の影響を大きく受け、安定した効果を確認できるまでには至らなかった。

一方、凍結融解に対する抵抗性については、再生骨材中へのコロイダルシリカ吸収処理と耐寒剤の吸収処理の組合せによって、かなり改善できることが明らかになっている<sup>10), 11)</sup>。

## 3. 粗骨材の繰返し再生に要するエネルギー消費量に関する検討

将来的にコンクリート廃材を繰返し使用する場合には、現在一般的に用いられている碎石・砕砂と同等以下のエネルギーで再生することが望ましいと考えられる。実験では、繰返し再生した粗骨材の製造に要するエネルギー消費量の目安を得るために、最大寸法が20mmの骨材をジョークラッシャ（歯間5mm）で一次破碎するのに要した消費電力量と再生回数の関係を求めた。なお、消費電力の測定には、6章の実験で用いる粗骨材を使用した。

破碎に要した消費電力量と再生回数の関係は、

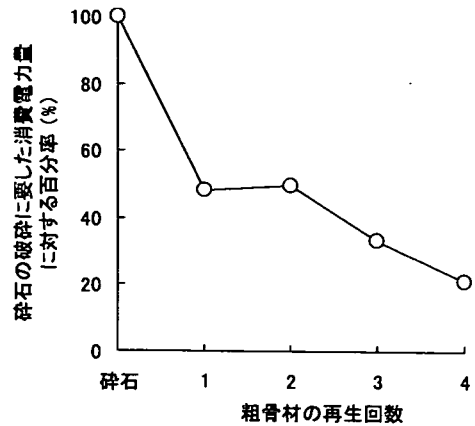


図-1 粗骨材の再生回数と破碎に要する消費電力量の関係

表-1 コロイダルシリカ溶液の物理的性質<sup>12)</sup>

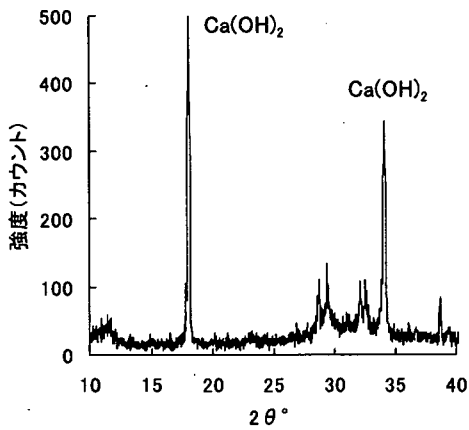
SiO <sub>2</sub> 含有量 (mass%)	Na <sub>2</sub> O含有量 (mass%)	粒子径 (nm)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )
30~31	0.6以下	10~20	1.20~1.22

図-1に示す通りである。1回目の再生粗骨材の破碎に要した消費電力量は、碎石の破碎に要した消費電力量のおおよそ半分となり、4回目の再生粗骨材の場合には、20%程度となった。これは、粗骨材中のモルタル分の増加に伴い、ジョークラッシャで破碎し易くなったことによると考えられる。このように、一次破碎・粒度調整のみの工程で繰返し再生する方法は、碎石・砕砂を製造する場合に比べてエネルギー消費量を低減できると考えられる。

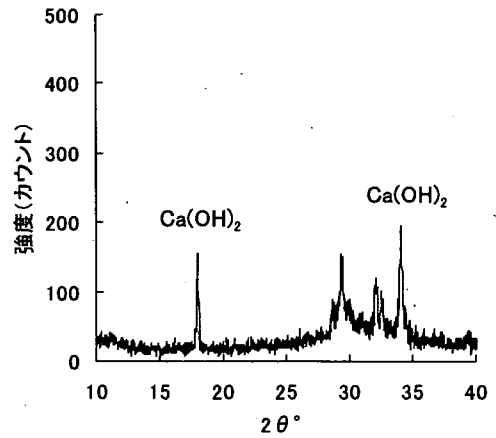
## 4. 再生粗骨材中へのコロイダルシリカ吸収処理方法に関する検討

### (1) 実験概要

実験では、ポズラン反応を期待できる液体として、表-1に示したN社製のコロイダルシリカ<sup>12)</sup>を使用した。これは、粒子径が大きいと、再生骨材中へ吸収されにくいことが想定されること<sup>13)</sup>および樹脂のような液状のものであれば、再生骨材中に吸収され易いこと<sup>14)</sup>を考慮し、シリカ質固形分の粒子径が10~20nmと著しく小さく液体状のものを選定したことによる。また、セメント質量の10%がコロイダルシリカ中のシリカ質固形分で置換されるように配合し作製したセメントペースト硬化体を、材齢28日で粉碎し、その直後に水和を停止する目的でメタノール

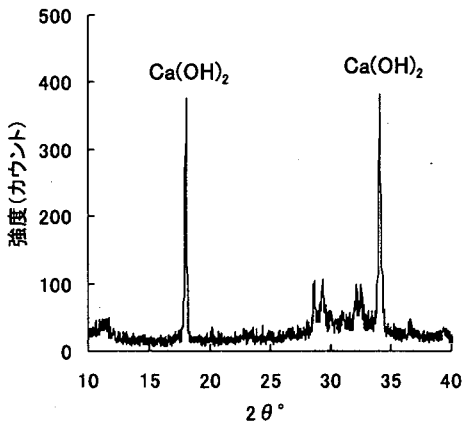


(i) 水:セメントの質量比を 0.5:1 としたセメントペースト硬化体

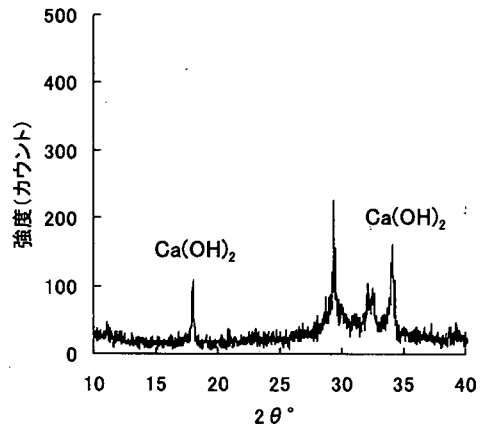


(ii) 水(コロイダルシリカ中の水分を含む):セメント:コロイダルシリカ中のシリカ質固形分の質量比を 0.5:0.9:0.1 としたセメントペースト硬化体

図-2 粉末 X 線回折の試験結果 (セメントペースト硬化体の水結合材比: 50%)



(i) 水:セメントの質量比を 0.45:1 としたセメントペースト硬化体



(ii) 水(コロイダルシリカ中の水分を含む):セメント:コロイダルシリカ中のシリカ質固形分の質量比を 0.45:0.9:0.1 としたセメントペースト硬化体

図-3 粉末 X 線回折の試験結果 (セメントペースト硬化体の水結合材比: 45%)

洗浄し、ろ過後減圧乾燥した試料について粉末X線回折を行った。そして、図-2に示したように、セメントのみを用いたセメント硬化体との比較を行った。コロイダルシリカによるセメント置換によって、水酸化カルシウムのピーク(回折角 $2\theta$ の値:  $18^\circ$  および  $34^\circ$ ) が極めて小さくなっており、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$  の減少が確認された。これは、コロイダルシリカ中の  $\text{SiO}_2$  とセメントから析出した  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  が反応して、X線回折ではピークを示さないC-S-Hゲルを生成したためと考えられる。このことは、今回実験に使用

したコロイダルシリカは、ポズラン反応によって硬化することを示唆していると考えられる。同様の方法で水結合材比45%のセメントペースト硬化体について求めた結果も、図-3に示したように、同じ傾向が得られた。

再生骨材の製造方法は、水セメント比が60%のコンクリートをジョークラッシャで破碎し、粒度調整を行う方法とした。なお、原コンクリートは、練上がり直後塩化ビニル製のシートの上にはさまき、締固めを一切行わず、気中養生する方法とした。これ

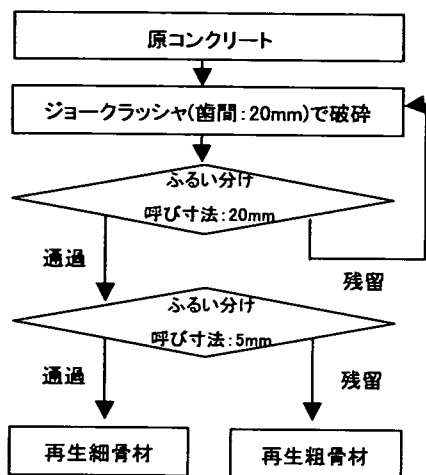


図-4 再生骨材の製造方法

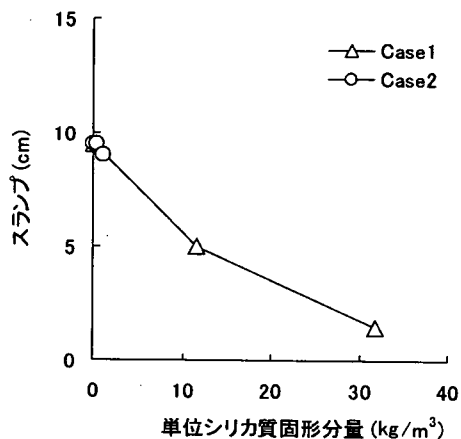


図-6 コンクリート中に含まれる単位シリカ質固形分量とスランプの関係（再生粗骨材に含まれるシリカ質固形分量を除く）

は、再生骨材コンクリートの品質は、原コンクリートに含まれる最低品質のコンクリートに左右され易いこと、土間コンクリートや均しコンクリートといった締固め不良でかつ養生不良のコンクリートが紛れ込んだとしても、区別して除去することが困難と考えたことによる。そして、材齢28日においてジョークラッシャで破碎した後、おおよそ1年間大気中で放置してから実験に使用した。破碎した後放置したのは、再生骨材に中性化をある程度進行させることやセメントの水和反応が活発な時期を避けるためである。再生骨材の製造方法および物理的性質は、それぞれ図-4および表-2に示す通りである。なお、

表-2 再生骨材の物理的性質

骨材の種類	表乾密度 (g/cm³)	吸水率 (%)	粗粒率
再生細骨材	2.25	13.87	3.07
再生粗骨材	2.44	6.09	6.66

再生粗骨材をコロイダルシリカ溶液に浸漬する。

所定の時間浸漬した後で引き上げ表面の水分を切る。

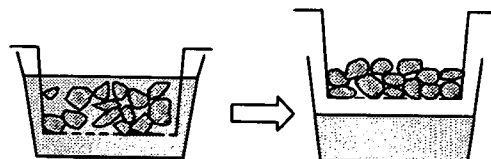


図-5 再生粗骨材のコロイダルシリカ吸収処理方法 [Case2]

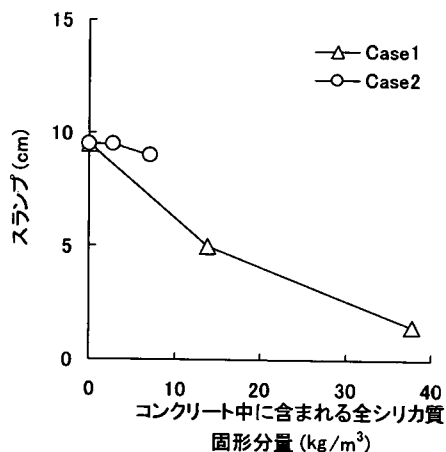
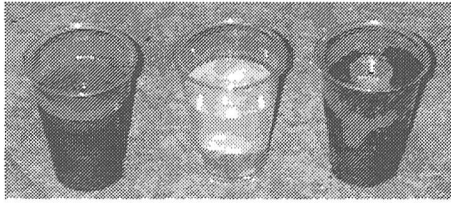


図-7 コンクリート中に含まれる全シリカ質固形分量とスランプの関係（再生粗骨材中に含まれるシリカ質固形分量を含む）

実験では、再生骨材として再生粗骨材のみを使用した。使用材料として、セメントには普通ポルトランドセメント（密度3.16g/cm³）を用い、比較のための普通骨材および再生骨材の製造に用いた原コンクリートの骨材には、鬼怒川産川砂（表乾密度2.59g/cm³、吸水率2.50%、粗粒率2.56）および山梨産砕石（最大寸法20mm、表乾密度2.69g/cm³、吸水率0.82%、粗粒率6.34）を用いた。

本研究では、コロイダルシリカを含む練混ぜ水を用いる方法（Case1）および再生粗骨材をあらかじめコロイダルシリカ溶液中に浸漬してから用いる方法（Case2）の2通りについて検討した<sup>2), 3), 4), 5)</sup>。



写真左:セメントペースト(ナットは溶液の底まで沈降した。)  
 写真中:コロイダルシリカ溶液(ナットは溶液の底まで沈降した。)  
 写真右:セメントペーストとコロイダルシリカ溶液の混合直後  
 (混合物は直ちにゲル化し、ナットは沈降しなかった。)

図-8 セメントペースト、コロイダルシリカ溶液およびセメントペーストとコロイダルシリカ溶液の混合物の上に鋼製のナットを静かに置いたところの写真

Case1は、シリカ質固形分濃度が6%または15%となるようにコロイダルシリカを添加した練混ぜ水と再生粗骨材をミキサに投入し攪拌してから30分後に、セメントを投入して練り混ぜる方法とした。一方、再生粗骨材をあらかじめコロイダルシリカ溶液中に浸漬してから用いる方法 (Case2) は、図-5に示したように、シリカ質固形分濃度が6%または15%のコロイダルシリカ溶液中に再生粗骨材を所定の時間浸漬した後ざるの上に引き上げ約30秒間余分な水分を切って、練混ぜに用いる方法とした。水切り後の再生粗骨材表面に付着している溶液の量は、計算によると表乾状態の骨材質量の約0.85%となった。この計算に当たっては、再生粗骨材中に吸収される溶液の容積は、再生粗骨材の有効吸水量と同じ容積になると仮定した。この仮定に当たり、気乾状態の再生粗骨材を水またはコロイダルシリカ溶液に30分間浸漬した後ざるの上に引き上げ、吸水性の布で骨材表面の水分または溶液を拭い去り、質量を測定した。そして、その質量をあらかじめ測定しておいた気乾状態における質量との差および溶液の密度から有効吸水量に換算して求めた結果、両者とも3.0~3.1%の範囲となった。すなわち、再生粗骨材中に吸収された溶液の質量をもって有効吸水量として表すと、シリカ質濃度が15%の場合、溶液の密度が $1.1\text{g}/\text{cm}^3$ であるため、水の有効吸水量の1.1倍となる。なお、骨材中に吸収された以外のコロイダルシリカ溶液中の水分は練混ぜ水の一部と考え、シリカ質固形分は結合材の一部と考えセメントと置換した。また、コンクリートの配合は、水結合材比または水セメント比を40%、細骨材率を43%と一定にした。

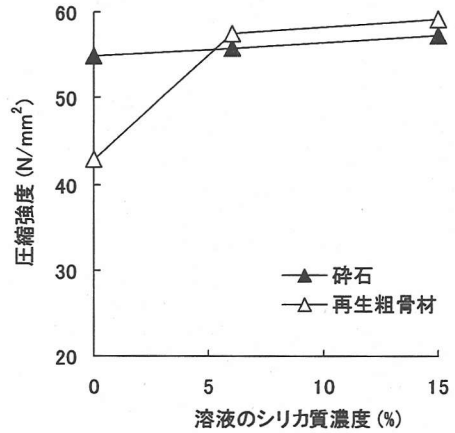


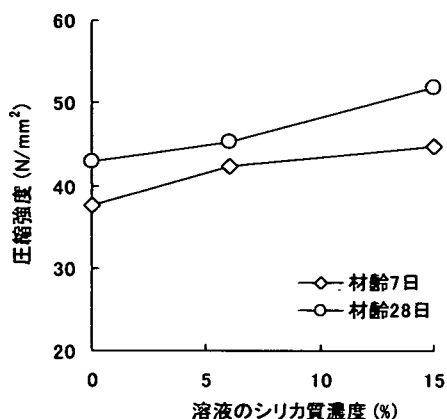
図-9 コロイダルシリカを直接練混ぜ水に添加した場合における材齢 28 日の圧縮強度 [Case1]

## (2) 実験結果および考察

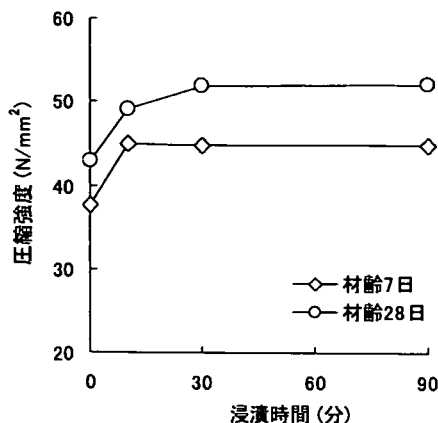
Case1すなわちコロイダルシリカを含む練混ぜ水を用いる場合は、練混ぜ水のシリカ質濃度が増加するに伴い、スランプはかなり低下する傾向にあった。しかし、Case2すなわち再生粗骨材をあらかじめコロイダルシリカ溶液中に浸漬してから用いる場合には、再生粗骨材を浸漬させる溶液のシリカ質濃度が増加しても、練混ぜ直後のスランプおよびスランプの経時変化には、ほとんど影響が見受けられなかった<sup>9)</sup>。

コンクリート中に含まれる全シリカ質固形分量から再生粗骨材に吸収された溶液中に含まれるシリカ質固形分量を差し引いた値とスランプの関係を表すと、図-6のようになる。例えば、Case1で練混ぜ水のシリカ質濃度が15%の場合、単位シリカ質固形分量は $31.8\text{kg}/\text{m}^3$ となるのに対して、Case2で再生粗骨材を浸漬させておくコロイダルシリカ溶液のシリカ質濃度が15%の場合、 $1\text{kg}/\text{m}^3$ 程度すなわち骨材の表面水に含まれているシリカ質固形分量のみとなる。一方、コンクリート中に含まれる全シリカ質固形分量 (再生粗骨材中に含まれるシリカ質固形分量を含む) とスランプの関係は、図-7に示す通りである。コンクリート中に含まれる全シリカ質固形分量が同一であっても、Case2の場合には、シリカ質固形分量がスランプに及ぼす影響はほとんど見られなかった。また、図-8に示すように、シリカ質濃度15%のコロイダルシリカ溶液に水セメント比50%のセメントペーストを混合したところ、直ちにゲル化した<sup>15)</sup>ことから、ペースト中にはほとんど分散または拡散しないと考えられる。

コロイダルシリカを含む練混ぜ水を用いる方法



(i) 溶液中のシリカ質濃度と圧縮強度の関係 [浸漬時間 30分]



(ii) 溶液中への浸漬時間と圧縮強度の関係 [シリカ質濃度 15%]

図-10 再生粗骨材をあらかじめコロイダルシリカ溶液中に浸漬してから用いた場合の再生骨材コンクリートの圧縮強度 [Case2]

(Case1) がコンクリートの圧縮強度に及ぼす影響は、図-9に示す通りである。練混ぜ水のシリカ質濃度が増加するに伴い、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り、砕石を用いたコンクリートとほぼ同等の圧縮強度を得ることができた。一方、再生粗骨材をあらかじめコロイダルシリカ溶液中に浸漬してから用いる方法 (Case2) がコンクリートの圧縮強度に及ぼす影響は、図-10に示す通りである。シリカ質濃度が15%で、砕石を用いた場合の強度すなわち $54\text{N/mm}^2$ とほぼ同等となった。よって、今回の実験の配合では、再生粗骨材をシリカ質濃度15%のコロイダルシリカ溶液中に30分間程度浸漬することで $50\text{N/mm}^2$ を超えるような再生骨材コンクリートの製造が可能になると思われる。なお、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り、その取り扱いに支障をきたす可能性がある。

これらの結果より、単に練混ぜ水全体にポズ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、スランプはかなり低下すると考えられる。しかし、再生粗骨材をあらかじめシリカ質濃度が15%のコロイダルシリカ溶液中に30分間浸漬してから用いることによって、スランプに影響を与えることなく強度を大きく改善できることが明らかとなった。この改善効果が得られた原因の一つには、図-5に示した方法でコロイダルシリカ溶液を吸収させた後、水セメント比が300%のセメントペーストの上澄み液で養生した再生粗骨

材の破碎値を求めたところ、吸収処理を行わなかった場合の60%程度と小さくなった<sup>9)</sup>ことから、骨材自身の強度が改善されたことが考えられる。

## 5. 繰返し再生した粗骨材中へのコロイダルシリカ吸収処理がコンクリート強度に及ぼす影響

### (1) 実験概要

本章の実験では、繰返し再生した粗骨材の履歴の影響について検討するため、粗骨材の繰返し再生過程と履歴をそれぞれ図-11および表-3に示したコンクリートについて実験を行った<sup>16)</sup>。

1回目の再生粗骨材の製造方法は、セメントに普通ポルトランドセメント (密度 $3.16\text{g/cm}^3$ )、骨材に山梨産砕石 (最大寸法 $20\text{mm}$ 、表乾密度 $2.69\text{g/cm}^3$ 、吸水率 $0.82\%$ 、粗粒率 $6.34$ ) および鬼怒川産川砂 (表乾密度 $2.59\text{g/cm}^3$ 、吸水率 $2.50\%$ 、粗粒率 $2.56$ ) を使用した水セメント比が70%のコンクリート (VC) を材齢28日においてジョークラッシャで一次破碎したものから、ふるい分けによって $5\text{mm}$ 以上 $20\text{mm}$ 未満のものを取り出す方法とした。そして、図-11に示したように1回目の再生粗骨材をコロイダルシリカ吸収処理してから使用する場合と気乾状態で使用する場合について、水セメント比が40%の再生骨材コンクリート (RC1) を2種類製造した。なお、細骨材には川砂を使用した。次に、RC1を材齢28日においてジョークラッシャで一次破碎し、ふるい分けを行い2回目の再生粗骨材を製造し1週間以上

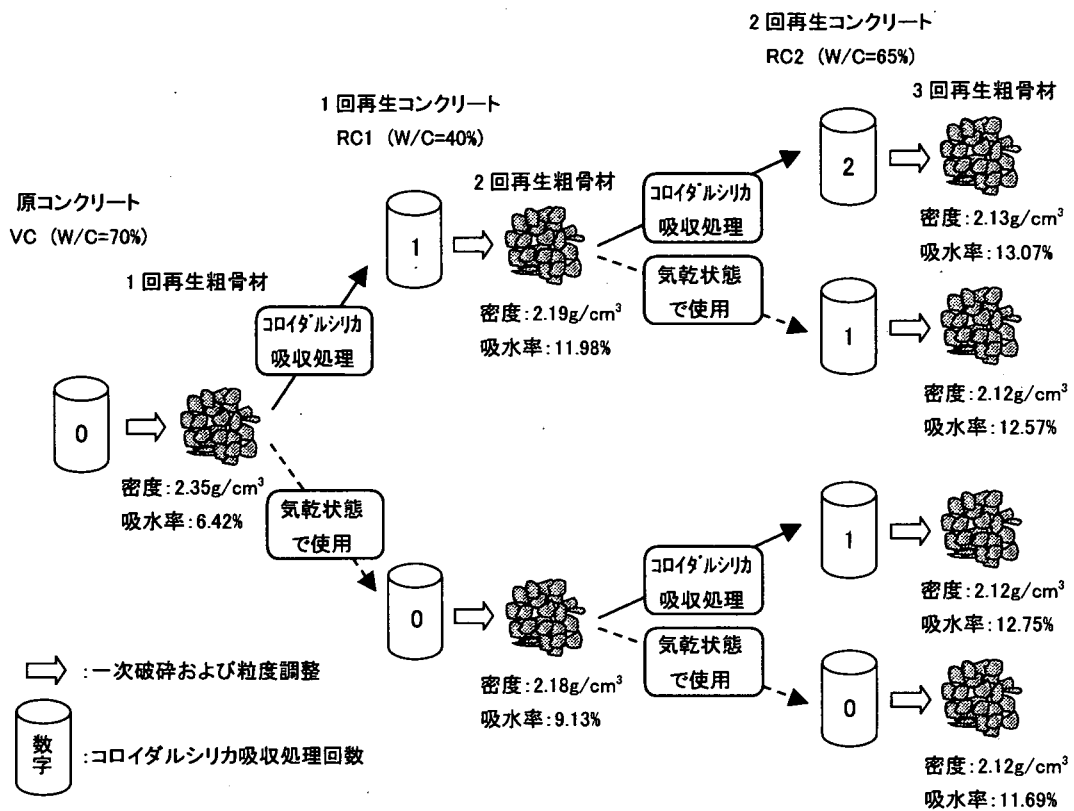


図-11 繰返し再生過程と再生粗骨材の密度および吸水率

表-3 繰返し再生骨材コンクリートの水セメント比とコロイダルシリカ吸収処理の履歴

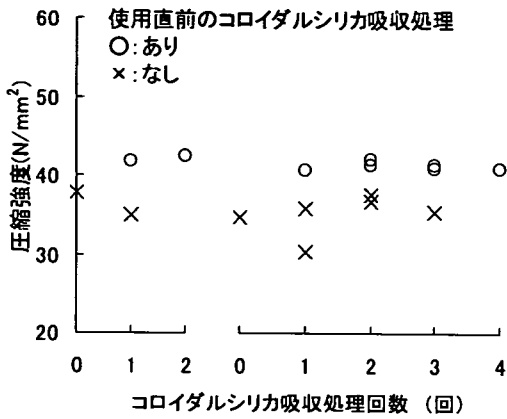
再生コンクリートの種類	水セメント比 (%)	再生骨材のコロイダルシリカ吸収処理の有無													
		○:コロイダルシリカ吸収処理あり、×:コロイダルシリカ吸収処理なし													
RC1	40	○						×							
RC2	65	○				×		○				×			
RC3	40	○	×	×	×	○	×	○	×	○	×	○	×		
RC4	65	○	×	×	×	×	×	○	×	○	×	○	×		
RC5	40	○	×	○	×	×	×	○	×	×	×	○	×		

気中養生した後、川砂と組み合わせて水セメント比が65%の2回目の再生骨材コンクリート (RC2) を4種類製造した。同様の手順で、表-3に示したように、水セメント比が40%の3回目の再生骨材コンクリート (RC3) を8種類、水セメント比が65%の4回目の再生骨材コンクリート (RC4) を12種類、水セメント比が40%の5回目の再生骨材コンクリート (RC5) を12種類製造した。例えば、5回目の再生骨材コンクリート (RC5) の場合は、コロイダルシリカの吸収処理回数が0~5回あり、また同じ処理回数であってもその履歴に相違がある。なお、再生粗

骨材中へのコロイダルシリカ吸収処理方法は、図-5に示した手順で、繰返し再生した粗骨材をあらかじめシリカ質固形分濃度が15%のコロイダルシリカ溶液中に30分間浸漬してから用いる方法とした。

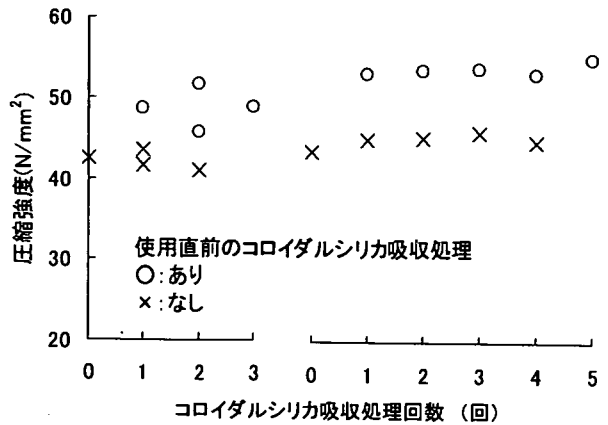
## (2) 実験結果および考察

繰返し再生した粗骨材の密度および吸水率は、図-11に示した通りコロイダルシリカ吸収処理履歴の影響をほとんど受けてないようである。これは、コンクリートを破碎しふるい分けした直後に測定したため、吸水率の変化には直前の破碎時に発生する微



(i) RC2 (ii) RC4

図-12 繰返し再生過程におけるのコロイダルシリカ吸収処理回数と圧縮強度の関係 (W/C=65%)



(i) RC3 (ii) RC5

図-13 繰返し再生過程におけるコロイダルシリカ吸収処理回数と圧縮強度の関係 (W/C=40%)

細ひび割れと骨材中に残存するモルタル量が支配的な要因となったことが考えられる。また、シリカ質固形分濃度 15%のコロイダルシリカ溶液の密度が  $1.1\text{g/cm}^3$  と水に近いので、コロイダルシリカ吸収処理回数が再生骨材の密度に及ぼす影響がほとんど見られなかったと考えられる。一方、今回実験を行った範囲では、粗骨材が3回以上繰返し再生されると、密度および吸水率に及ぼす繰返し再生過程での履歴の影響はほとんど見受けられなかった。

繰返し再生した粗骨材のコロイダルシリカ吸収処理回数と材齢28日における圧縮強度の関係は、図-12および図-13に示す通りである。繰返し再生した粗骨材を用いたコンクリートの水セメント比が65% (RC2, RC4)、40% (RC3, RC5) のいずれの場合であっても、再生骨材のコロイダルシリカ吸収処理回数に関わらず、骨材を使用する直前にコロイダルシリカ吸収処理を行うことによって圧縮強度は大きくなる傾向にあった。そして、繰返し再生した粗骨材を用いたコンクリートの水セメント比が40%の場合においては、材齢28日で  $50\text{N/mm}^2$  程度の圧縮強度を得ることができた。これは、繰返し再生した粗骨材中に残存する微細欠陥が吸収されたコロイダルシリカのポゾラン反応によって修復されたことや、骨材表面を覆っている若干のコロイダルシリカによって再生粗骨材とモルタルマトリックスとの付着性が改善されたことによると考えられる。

なお、6章で使用した粗骨材を用いて水セメント比が45%のコンクリートの静弾性係数を求めた結果、図-14に示したように、土木学会コンクリート標準示方書的设计値および日本建築学会RC構造計算基準

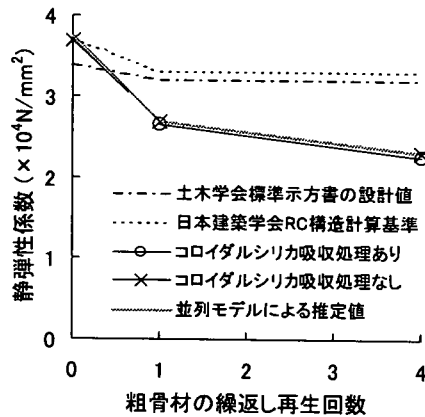


図-14 粗骨材の繰返し再生回数と静弾性係数の関係

準の推定式が適用できない程小さくなり、たとえコロイダルシリカ吸収処理を行ったとしても、あまり静弾性係数に変化は見受けられなかった<sup>17)</sup>。そして、その静弾性係数の推定には、モルタルマトリックスおよび再生粗骨材中に含まれるモルタル分の合計と、再生粗骨材中に含まれる岩石質との二層系並列モデルが適用できる可能性が示された<sup>17)</sup>。

## 6. 繰返し再生した粗骨材中へのコロイダルシリカ吸収処理がRC部材の力学的挙動に及ぼす影響

### (1) 実験概要

本章の実験では、5章の再生粗骨材の製造方法は異なり、図-15に示した手順で粗骨材を繰返し再



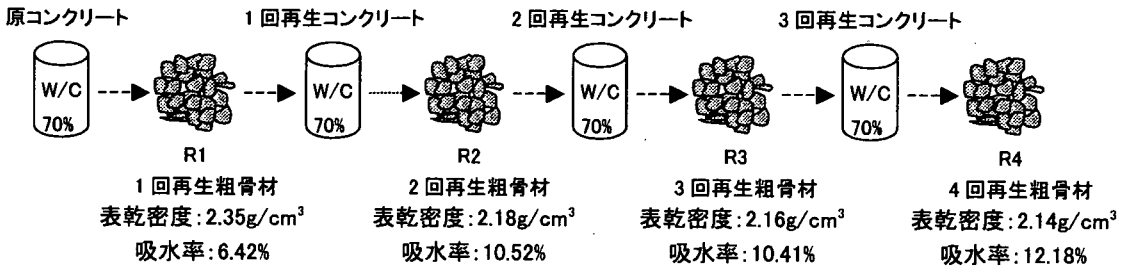


図-15 繰り返し再生粗骨材の製造方法

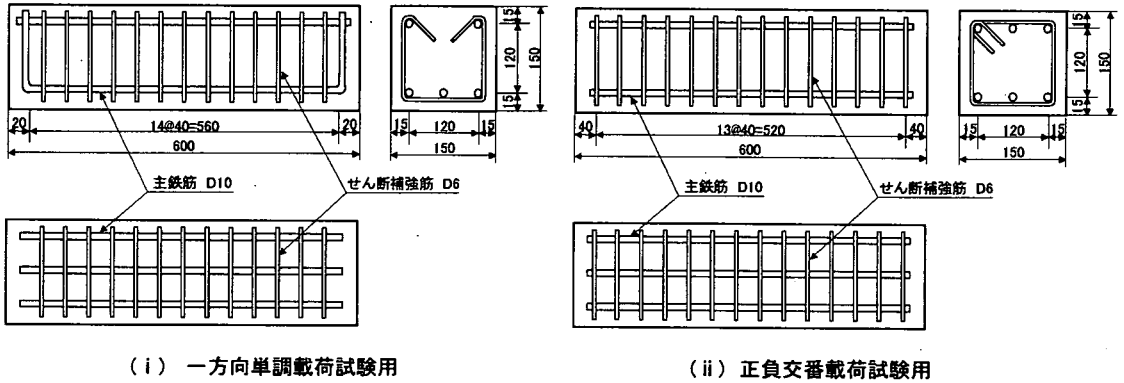


図-16, 曲げせん断試験用の供試体

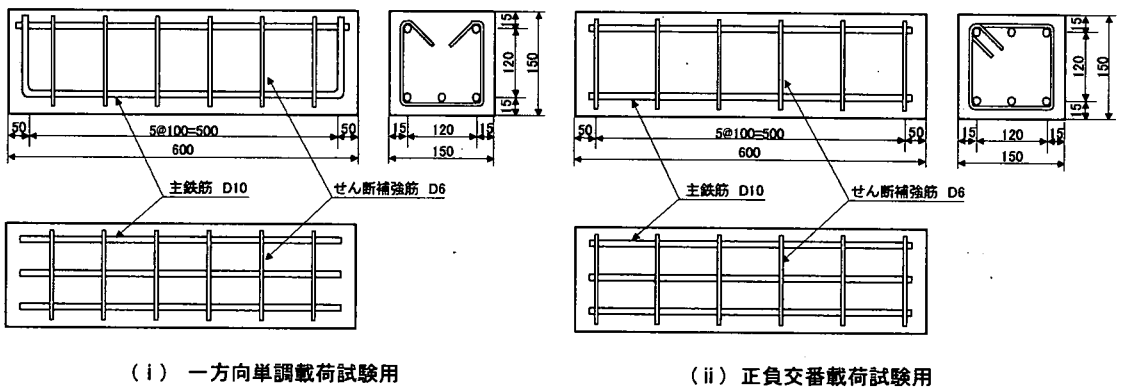
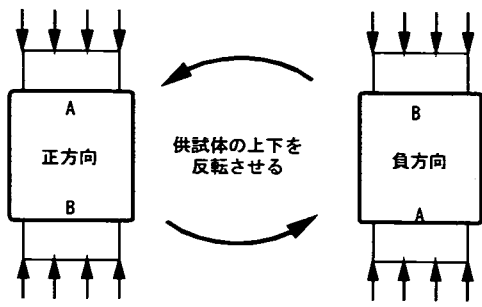


図-17 せん断試験用の供試体

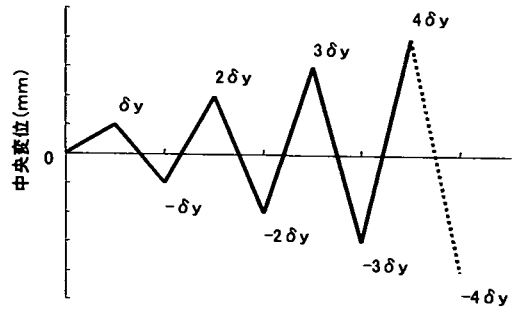
生した。これは、均しコンクリートや土間コンクリート用等で極端に低強度のコンクリートとして繰り返し再生された後に、構造用として再生される場合を想定したことによる。

1回目の再生粗骨材 (R1) の製造方法は、骨材に山梨産碎石 (最大寸法20mm, 表乾密度2.69g/cm<sup>3</sup>, 吸水率0.82%, 粗粒率6.34) および鬼怒川産川砂 (密度2.59 g/cm<sup>3</sup>, 吸水率2.50%, 粗粒率2.56) を使

用した水セメント比が70%のコンクリートを材齢28日においてジョークラッシャ (歯間20mm) で破碎しただけのものから、ふるい分けによって5mm以上20mm未満のものを取り出す方法とした。2回目の再生粗骨材 (R2) は、R1と川砂を組み合わせた水セメント比が70%のコンクリートをジョークラッシャで破碎し、同じくふるい分けによって製造した。同様の手順で、3回目の再生粗骨材 (R3) および4回

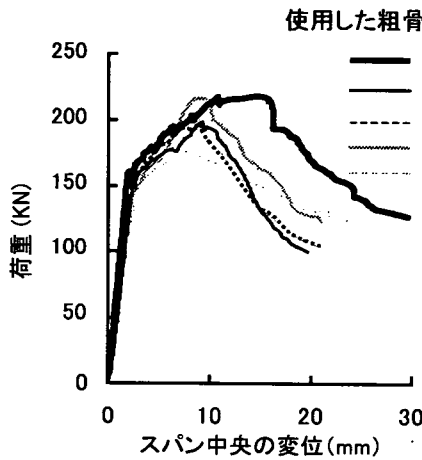


(i) 荷重方法

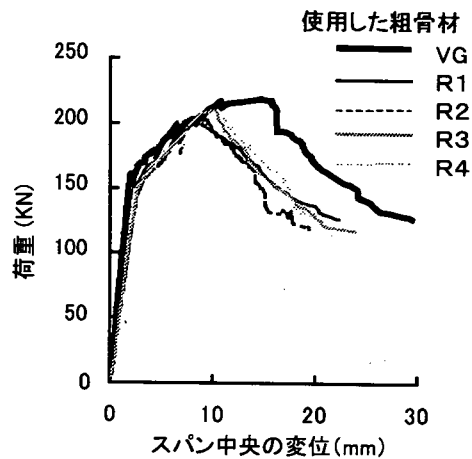


(ii) 荷重サイクル

図-18 正負交番試験方法



(i) コロイダルシリカ吸収処理なし



(ii) コロイダルシリカ吸収処理あり

図-19 スパン中央での変位と荷重の関係 (一方単調荷重試験: 曲げせん断破壊先行型)

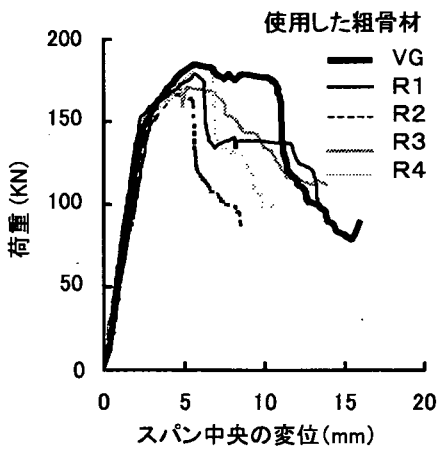
目の再生粗骨材 (R4) を製造した。

繰返し再生した粗骨材を用いたコンクリートおよび比較用の普通骨材を用いたコンクリートの水セメント比および細骨材率は、それぞれ45%および42%とした。セメントには普通ポルトランドセメント (密度 $3.16\text{g/cm}^3$ ) を、また細骨材には鬼怒川産川砂 (表乾密度 $2.59\text{g/cm}^3$ , 吸水率2.50%, 粗粒率2.56) を使用した。

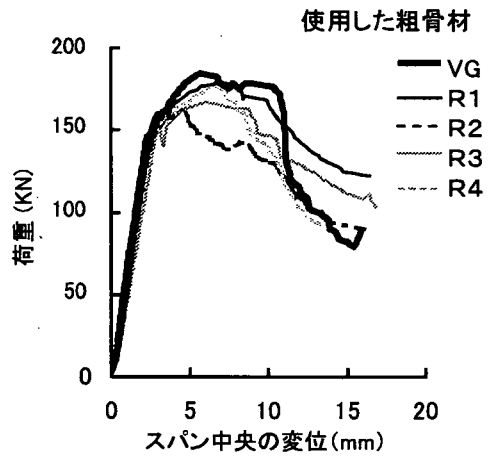
繰返し再生した粗骨材にコロイダルシリカ吸収処理を行う場合には、RC梁供試体の作製用のコンクリートを練り混ぜる直前にのみシリカ質固形分濃度が15%のコロイダルシリカ溶液中に30分間浸漬した。なお、粗骨材の繰返し再生過程においては、コロイダルシリカ吸収処理は一切行わなかった。

実験に用いた曲げせん断およびせん断試験用の供

試体は、それぞれ図-16 および図-17 に示したように、軸方向鉄筋に D10 (降伏点強度  $365\text{N/mm}^2$ ) を使用した高さ 150mm, 幅 150mm, 長さ 600mm の梁であり、D6 (降伏点強度  $363\text{N/mm}^2$ ) のスターラップを 40mm または 100mm のピッチで配置したものである。なお、スターラップは、一方単調荷重試験用の場合は圧縮縁にフックで定着するタイプとし、正負交番荷重試験用の場合は閉合タイプとした。そして、材齢 14 日において支持スパンを 450mm とした一方単調荷重試験および正負交番荷重試験を行い、荷重と中央変位の関係を測定した。なお、正負交番荷重では、図-18 に示したようにスパン中央部のたわみが軸方向鉄筋の降伏変位 ( $\delta y$ ) の整数倍になるようにした漸増交番荷重とした<sup>18)</sup>。

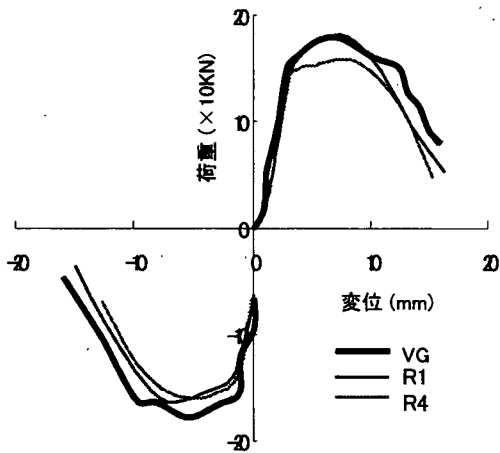


(i) コロイダルシリカ吸収処理なし

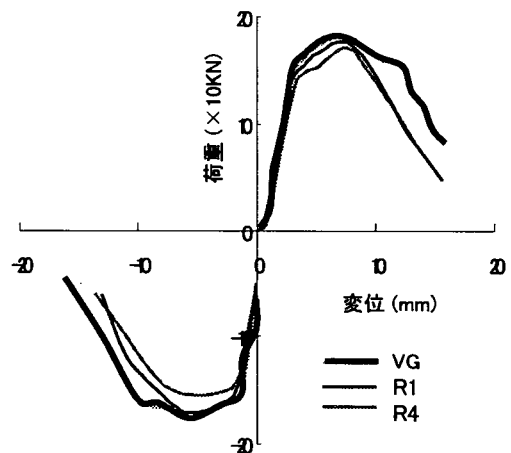


(ii) コロイダルシリカ吸収処理あり

図-20 スパン中央での変位と荷重の関係 (一方単調載荷試験: せん断破壊先行型)



(i) コロイダルシリカ吸収処理なし



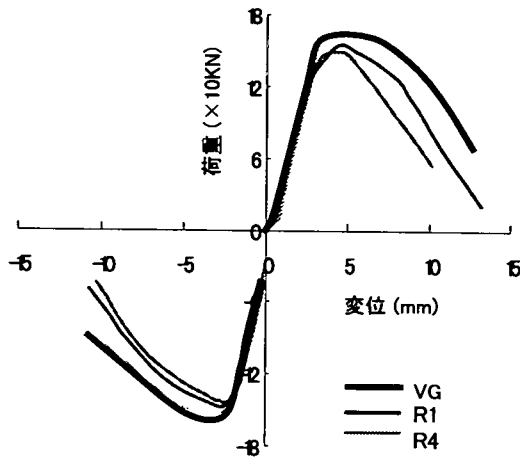
(ii) コロイダルシリカ吸収処理あり

図-21 スパン中央での変位と荷重の関係 (正負交番載荷試験: 曲げせん断破壊先行型)

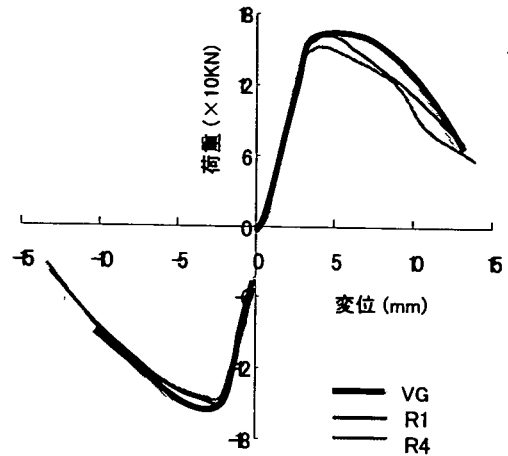
## (2) 実験結果および考察

せん断補強筋間隔を 40mm とした場合の一方単調載荷試験結果は、図-19 に示す通りである。再生粗骨材を用いると砕石を用いた場合より最大耐力およびその後の靱性は低下するものの、繰返し回数の相違やコロイダルシリカ吸収処理の有無による影響は小さかった。これは、曲げせん断破壊が先行したが、最終的には主鉄筋が降伏し破断したため、斜めひび割れ角度の変化による影響が小さかったことによると考えられる。

せん断補強筋間隔を 100mm とした場合の一方単調載荷試験結果は、図-20 に示す通りである。粗骨材に再生骨材を用いた場合には、コロイダルシリカ吸収処理を行ったものの方が未処理のものに比べて最大耐力後の荷重低下が小さくなった。これは、4 章 (2) に示したように、コロイダルシリカ吸収処理によって再生粗骨材の破砕値が小さくなったことから、ひび割れ面のせん断伝達力がある程度確保でき、せん断破壊が先行する場合には、斜めひび割れ角度が変化し靱性が改善されたためと考えられる。



(i) コロイダルシリカ吸収処理なし



(ii) コロイダルシリカ吸収処理あり

図-22 スパン中央での変位と荷重の関係

(正負交番荷重試験：せん断破壊先行型)

図-21および図-22は、それぞれせん断補強筋間隔を40mmおよび100mmとした場合の正負交番荷重試験の包絡線を示したものである。粗骨材の再生回数が1回、4回と増すに従い、再生骨材コンクリートの靱性は低下している。しかし、せん断破壊が先行する場合、再生骨材にコロイダルシリカ吸収処理を行ったものは、未処理のものに比べて靱性が向上している。これは、コロイダルシリカ吸収処理により骨材強度が改善され、クラックアレスト効果が現れたことや、再生粗骨材とモルタルマトリックスとの付着性状が改善されたことから、ひび割れ面におけるせん断伝達能力が向上したことによると考えられる。

## 7. まとめ

今回の結果を取りまとめると、以下のようになる。  
 (1) コンクリート廃材をジョークラッシャーで一次破碎し粒度調整するという方法で繰返し再生した骨材を用いた場合であっても、あらかじめコロイダルシリカを再生骨材中に吸収させるという簡単な工夫によって、材齢 28 日における圧縮強度が  $50\text{N/mm}^2$  程度の再生骨材コンクリートを製造することができた。これは、再生骨材中に残存する微細欠陥が吸収されたコロイダルシリカのポゾラン反応によって修復されたことや、骨材表面を覆っている若干のコロイダルシリカによって再生粗骨材とセメントペーストとの界面の付着が改善されたためと考えられる。なお、

再生粗骨材中へのコロイダルシリカ溶液を吸収させる方法には、骨材を溶液中に 30 分間程度浸漬した後ざる等で引き上げ、余分な溶液を切ってから使用する方法がある。これは、コロイダルシリカ溶液を直接練混ぜ水に添加すると、スランプロスが大きくなるためである。

(2) 繰返し過程におけるコンクリートの強度に関係なく、使用する直前の再生骨材にコロイダルシリカを吸収させることによって、過去の強度履歴の影響を受けないようにできる可能性がある。

(3) 曲げ破壊が先行する場合には、一次破碎しただけの再生骨材を用いると、最大耐力および最大耐力後の靱性は低下するが、繰返し回数の相違や骨材へのコロイダルシリカ吸収処理の有無の影響は小さい。これは、斜めひび割れ角度がいずれの場合においてもほとんど変化しないことによると考えられる。せん断破壊が先行する場合、再生繰返し回数が多いと靱性は低下する。しかし、コロイダルシリカ吸収処理を行うことにより、その靱性が低下する程度をかなり改善できる。これは、骨材強度が大きくなることや、再生骨材とセメントペーストとの界面の付着力が改善され、ひび割れ面でのせん断力の伝達能力が向上したためと考えられる。

謝辞：本研究を行うにあたり、多くの実験を実施した元東京理科大学修論生の大高範寛氏および笹倉伸晃氏に感謝の意を表します。なお、本研究は日本学

術振興会未来開拓プロジェクト 96R07601 (代表：長瀧重義教授) の一環として行われたものであります。このプロジェクトにおいて、液体状でポゾラン反応を起こす物質としてコロイダルシリカを御紹介頂いた東京工業大学大学院助教授 坂井悦郎先生および X 線回折を行って頂いた日産化学工業株式会社富山研究開発センター主任研究員 内田潤氏に感謝の意を表す次第であります。

#### 参考文献

- 1) 長瀧 重義, 佐伯 竜彦, 飯田 一彦: 破碎材齢の異なる再生粗骨材を用いたコンクリートの諸特性, セメント・コンクリート論文集, No53, pp.528-534, 1999.
- 2) 辻 正哲, 澤本 武博: 低品質再生骨材の有効利用方法について, コンクリート工学, Vol.37, No11, pp.27-32, 1999.
- 3) Tsuji, M. and Sawamoto, T.: New Technique Producing Recycled Aggregate Concrete for Conservation Resources and Energy, Transaction of JCI, Vol.22, pp.77-84, 2000.
- 4) 辻 正哲, 笹倉 伸晃, 澤本 武博, 奥山 厚志: コロイダルシリカを用いた再生骨材コンクリート強度の改善方法に関する研究, 土木学会第55回年次学術講演会講演概要集, 第5部, pp.240-241, 2000.
- 5) Tsuji, M., Sawamoto, T. and Kimachi, Y.: Application of Crushed Concrete Waste to Recycled Aggregate for Concrete, 2001 Second International Conference on Engineering Materials, pp.157-168, 2001.
- 6) 黒輪 亮介, 辻 正哲, 澤本 武博, 田中 裕二: 骨材中への吸水処理および減圧練混ぜ方法が再生骨材コンクリートの強度に及ぼす影響, セメント・コンクリート論文集, No53, pp.535-542, 1999.
- 7) 辻 正哲, 笹倉 伸晃, 澤本 武博, 田中丸 善史: 低品質再生骨材の減圧処理がコンクリートの強度改善に及ぼす効果, 土木学会第54回年次学術講演会講演概要集, 第5部, pp.48-49, 1999.
- 8) 辻 正哲, 花澤 耕平, 澤本 武博, 奥山 厚志: 練混ぜ水の表面張力の低減が再生骨材コンクリートの強度に及ぼす影響, 土木学会第55回年次学術講演会講演概要集, 第5部, pp.292-293, 2000.
- 9) 澤本 武博, 辻 正哲: 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, 材料, Vol.49, No.10, pp.1079-1084, 2000.
- 10) 久野 和磨, 辻 正哲, 澤本 武博, 梅田 慎也, 河渡 宜宏, 高木 一誠: 再生骨材コンクリートの耐凍害性改善方法に関する研究, 土木学会第 29 回関東支部技術研究発表会講演概要集, pp.852-853, 2001.
- 11) 久野 和磨, 辻 正哲, 澤本 武博, 梅田 慎也: 低品質再生粗骨材を用いたコンクリートの耐凍害性改善方法に関する研究, 第 56 回セメント技術大会講演要旨, pp.374-375, 2002.
- 12) 技術資料スノーテックス, 日産化学工業株式会社, 1999.
- 13) 宮本 高秀, 湯浅 幸久, 犬飼 利嗣, 畑中 重光: シリカフェームによる再生骨材の品質改善の可能性に関する研究, セメント・コンクリート論文集, No55, pp.688-693, 2001.
- 14) 若松 岳, 住野 正博, 十河 茂幸: 表面処理による再生骨材の改質効果に関する基礎的研究, 土木学会第 52 回年次学術講演会講演概要集, 第 5 部, pp.148-149, 1997.
- 15) 野村 剛, 澤本 武博, 辻 正哲, 梅田 慎也: コロイダルシリカによる低品質再生骨材の品質改善機構, 土木学会第 56 回年次学術講演会講演概要集, 第 5 部, pp.396-397, 2001.
- 16) 梅田 慎也, 辻 正哲, 笹倉 伸晃, 澤本 武博: 繰返し再生骨材コンクリートの強度に及ぼす骨材中へのコロイダルシリカ吸収処理の効果, 土木学会第 56 回年次学術講演会講演概要集, 第 5 部, pp.398-399, 2001.
- 17) 花澤 耕平, 辻 正哲, 笹倉 伸晃, 澤本 武博, 小倉 浩則: 繰返し再生骨材を用いたコンクリートの静弾性係数に関する研究, 土木学会第 56 回年次学術講演会講演概要集, 第 5 部, 400-401, 2001.
- 18) 小倉 浩則, 辻 正哲, 大高 範寛, 澤本 武博, 田中 秀明: 繰返し再生粗骨材を用いた RC 部材の力学的挙動に関する研究, 土木学会第 56 回年次学術講演会講演概要集, 第 5 部, pp.414-415, 2001.

(2001. 12. 14 受付)

# EFFECT OF ABSORPTION OF COLLOIDAL SILICA SOLUTION INTO REPEATEDLY RECYCLED COARSE AGGREGATE ON PROPERTIES OF CONCRETE

Takehiro SAWAMOTO and Masanori TSUJI

In this study, the effects of processes, in which the repeatedly recycled coarse aggregate absorbed the colloidal silica solution as pozzolanic liquid, on properties of concrete were investigated. The absorbed colloidal silica solution is considered to fill the micro cracks of aggregate and to change to C-S-H by pozzolanic reaction. With this technique, the strength of repeatedly recycled aggregate concrete was enough to construct ordinary concrete structures, and the capacity of shear transfer at interface along diagonal tension cracks was improved.