

# 論文 再生細骨材を用いたコンクリートの力学的特性についての解析的検討

今野 克幸<sup>\*1</sup>・佐藤 靖彦<sup>\*2</sup>

**要旨**：再生細骨材を用いたコンクリートの強度低下の要因について、数値解析による検討結果を示した。また、数値解析に用いる主な構成則として再生細骨材を用いたモルタルの最大せん断応力および粗骨材と再生細骨材を用いたモルタルの界面の付着強度を実験により求めた。

**キーワード**：再生細骨材, 再生コンクリート, 圧縮強度, 最大せん断応力, 界面の付着強度

## 1. はじめに

コンクリート解体材の再利用率が 9 割を超えながら、そのほとんどが路盤材や埋戻し材としての利用であること、また、その発生量が今後増加すると予測される背景から、JIS A5021「コンクリート用再生骨材 H」が制定された。同時に標準仕様書 TS A0006「再生骨材を用いたコンクリート」が制定されたが、これによると呼び強度や使用範囲についての制限がなお厳しい状況にある。したがって、更なる研究成果の蓄積により、再生コンクリートの利用拡大が望まれる。これまでに再生細骨材を用いたコンクリートに関する研究成果<sup>1)</sup>は再生粗骨材を用いたものに比べ少ないため、本研究では再生細骨材を用いたコンクリートの強度について、解析的なアプローチで調査するものである。

なお、本論において、再生細骨材を用いたモルタルを再生モルタルと呼び、再生細骨材と普通粗骨材を用いたコンクリートを単に再生コン

クリートと呼ぶこととする。

## 2. 使用した再生骨材について

3.2と3.3の構成則に関する実験のために再生骨材が必要であり、原コンクリートの作製から開始した。原コンクリートには呼び強度 24 のレディーミクストコンクリートを用いた。その示方配合と骨材の密度・吸水率を表-1, 2に示す。

再生骨材の製造方法の概要は、まず原コンクリートを一次処理としてジョークラッシャーで破碎し、その後、アトリッションミル<sup>2)</sup>によって二次処理を行った。その際、再生細骨材を 0.075mm 以上 0.6mm 未満のもの（以降、再生細骨材[0.075-0.6]と呼ぶ）と 0.6mm 以上のもの（以降、再生細骨材[0.6-5]と呼ぶ）に篩い分けた。そして、これらを用い、JIS の再生骨材 H 相当の骨材（以降、再生細骨材 H と呼ぶ）と密度がそれ以下のもの（以降、再生細骨材 M と呼ぶ）の二種類の再生細骨材を製造した。再生細骨材 H は、

表-1 原コンクリートの示方配合

粗骨材の 最大寸法 (mm)	スラ ンプ (cm)	空気 量 (%)	水セメ ント比 (%)	細骨 材率 (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					
					水 <i>W</i>	セメント <i>C</i>	細骨材① <i>S①</i>	細骨材② <i>S②</i>	粗骨材 <i>G</i>	AE 剤
25	10	4.5	53.8	43.4	152	283	331	491	1058	2.830

※ 細骨材①：②=40.0：60.0      セメントの種類：普通ポルトランドセメント

\*1 北海道工業大学 工学部社会基盤工学科助教授 博士（工学）（正会員）

\*2 北海道大学大学院 工学研究科環境創生工学専攻助教授 博士（工学）（正会員）

表-2 原コンクリートに使用された骨材

骨材の種類	表乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	絶乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	吸水率 (%)
細骨材①	2.67	2.63	1.52
細骨材②	2.65	2.62	1.14
粗骨材	2.62	2.57	2.00

表-4 せん断試験供試体の圧縮強度

供試体シリーズ	W/C (%)	骨材の種類	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )
SN40-1	40	普通細骨材	38.5
SN50-1	50		35.9
SN50-2			35.3
SN50-3			30.8
SN50-4			32.3
SN60-1	60		34.0
SN60-2			32.3
SH50-1	50		再生細骨材 H
SM50-1		再生細骨材 M	36.0

表乾密度と絶乾密度がそれぞれ 2.73g/cm<sup>3</sup>, 2.68 g/cm<sup>3</sup> で吸水率が 1.87% のバージン材の内 0.6mm 未満と再生細骨材[0.6-5]を 44.2 : 55.8 の割合で混合したものである。再生細骨材 M は再生細骨材 [0.075-0.6]と再生細骨材[0.6-5]を 42.1 : 57.9 の割合で混合したものである。再生細骨材 H, 再生細骨材 M とともにその粒度分布はほぼ土木学会の標準の範囲内に収まった。再生骨材の密度・吸水率は 8 回の試験の平均値 (表-3 参照) を用いた<sup>3)</sup>。

### 3. 数値解析の概要と構成則

#### 3.1 数値解析の概要

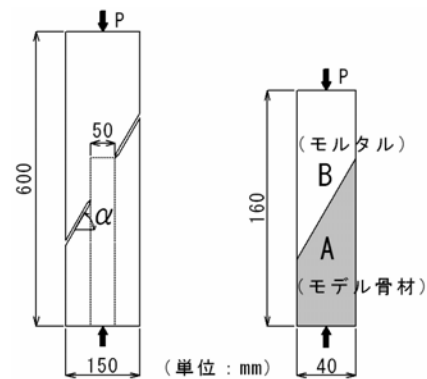
本研究では、剛体バネモデル<sup>4)</sup>によって再生モルタル及び再生コンクリート製平板の圧縮試験の数値解析を行った。解析プログラムに導入した構成則は文献 4 に記されているもので、解析供試体を構成するそれぞれの要素は互いに垂直バネとせん断バネを介して応力が伝達される。垂直バネは圧縮域において常に弾性挙動をし、

表-3 再生細骨材の密度・吸水率

骨材の種類	表乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	絶乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	吸水率 (%)
再生細骨材 H	2.60	2.52	3.12
再生細骨材 M	2.50	2.38	5.03

表-5 供試体 SN50 シリーズの示方配合

水セメント比 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )			
	水	セメント	細骨材	混和剤
50	281	563	1244	0.55



(a) 最大せん断応力 (b) 界面の付着強度

図-1 実験供試体

引張域においては応力が引張強度に達した後、軟化挙動をする。せん断バネはひび割れ発生前において、式(1)により計算される値を最大せん断応力とし、ひび割れ発生後においてはひび割れ幅に応じてせん断応力を減少させ、最大ひび割れ幅に達すると応力はゼロとする。なお、モルタルの最大せん断応力を式(1)、粗骨材とモルタルの界面の付着強度を式(2)に示す。 $\sigma$  は直応力を表す。

$$\tau_{\max} = \pm \left( 0.11 f_{telem}^{3.0} (-\sigma + f_{telem})^{0.6} + f_{telem} \right) \quad (\sigma \leq f_{telem}) \quad (1)$$

$f_{telem}$  は要素の引張強度

$$\tau_{\max} = \pm (-\sigma \tan \phi + c) \quad (\sigma \leq f_{telem}) \quad (2)$$

$\phi$  は摩擦角,  $c$  は粘着力

#### 3.2 最大せん断応力

再生モルタルの最大せん断応力を求めるために、図-1 (a) に示す形状寸法 (厚さ 50mm) の供試体を用い破壊面の角度  $\alpha$  を 65°, 50°, 45°,

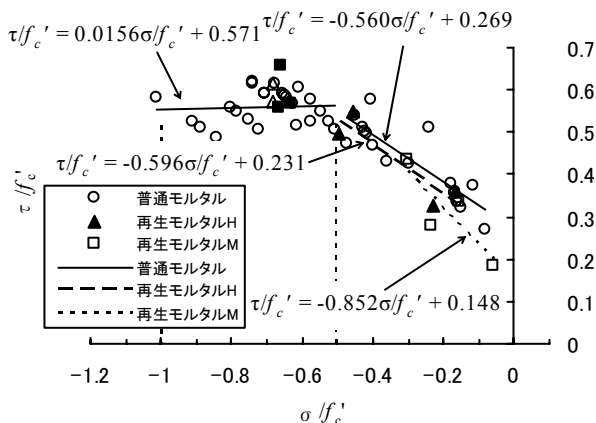


図-2 最大せん断応力

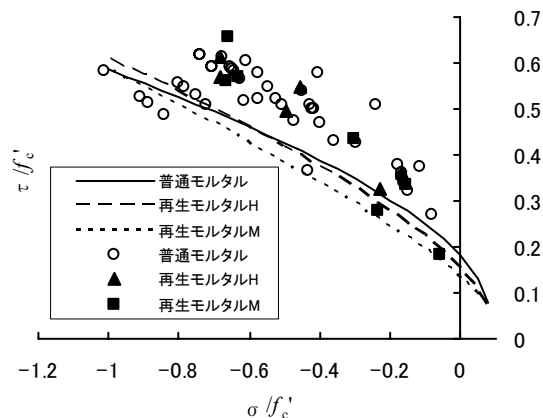


図-3 最大せん断応力と構成式

42° , 40° , 35° , 30° の 7 つに変化させ、せん断試験を行った。その際、供試体の上下端面にテフロンシートを 2 枚重ねて設置し水平方向への変位を妨げないようにした<sup>5)</sup>。試験結果は、破壊荷重を破壊面の載荷面への投影面積で除した値を  $\sigma_1$ 、横方向の応力を  $\sigma_2=0$  としてモールの応力円によって整理した。それらを圧縮強度  $f'_c$  で正規化してプロットしたものが図-2, 3 である。再生モルタルの他、普通細骨材を用いたモルタル（以降、普通モルタルと呼ぶ）についても試験を行った（表-4 参照）。なお、供試体の作製には普通ポルトランドセメントを用い、配合例を普通モルタルについて表-5 に示した。供試体は打設後 1 日間湿布養生した後、材令 14 日目まで 20°C の水中養生を行い試験に用いた。

図-2 は表-4 にある供試体の試験結果を回帰直線とともに示したものである。普通モルタルについては、水セメント比の違い、すなわち圧縮強度に差異があっても試験結果を圧縮強度で正規化することによって同等に扱うことができると確認したので同じ記号で表した。文献 6 において、最大せん断応力はバイリニアにモデル化されており、 $\sigma/f'_c$  が 0.5 より小さい場合はせん断すべりが発生した状態で、大きい場合はせん断すべりが発生した後に圧縮降伏に至った状態とある。これにしたがい、本論における試験結果を線形回帰する際、 $\sigma/f'_c$  が 0.5 以下のせん断すべり破壊の領域と 0.5 以上のせん断すべりと圧縮降伏の中間的な破壊と見なしうる領域に

分けて行った。ただし、 $\sigma/f'_c$  が 0.5 以上では再生モルタルのデータが少ないので、この領域においては普通モルタルのみ回帰直線を示した。

図-2 からせん断すべり破壊の領域では最大せん断応力が普通モルタル、再生細骨材 H を用いたモルタル（以降、再生モルタル H と呼ぶ）、再生細骨材 M を用いたモルタル（以降、再生モルタル M と呼ぶ）の順に小さくなったことを読みとることができ、 $\sigma/f'_c$  がおおよそ 0.5 以上の領域では、再生モルタル H と再生モルタル M の最大せん断応力は普通モルタルと同等の値となった。一方で表-4 に示したとおり、同一水セメント比では普通モルタルと再生モルタルの圧縮強度は同程度であった。これは、通常の圧縮強度試験における破壊は、図-2 の  $\sigma/f'_c$  が 0.5 以上の領域に近いためだと考えられる。これにより、再生モルタルは普通モルタルに比べ、圧縮強度試験の結果に差が現れなくとも、せん断強度が低下すると推測される。

図-3 はせん断試験の結果を解析プログラムに導入した構成式とともに示したものである。図-2 に示した実験データは普通モルタルとの比較により再生モルタルの最大せん断応力について考察を行ったものであるが、回帰式を数値解析における構成式とするには検討の余地があると思われる。よって、本論においては式(1)をもとに図-2 に示される回帰式の大小関係を概ね表現できるように構成式を与え、再生モルタルの力学的特性について定性的な評価を行うこ

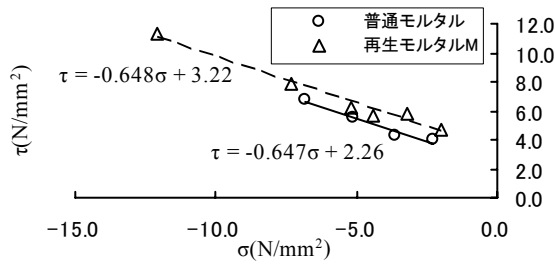


図-4 界面の付着強度

ととする。したがって、再生モルタル H と再生モルタル M の最大せん断応力は、式(1)の係数等を修正しそれぞれ式(3),(4)に示したものをを用いた。式(3),(4)は、普通モルタルに対する構成式を基準として  $\sigma/f_c$  が 0.5 以下では最大せん断応力が小さく、 $\sigma/f_c$  が 0.5 以上では極力その差を小さくしたものである。なお、図-3 に表した式(1)と式(3),(4)の計算値は引張強度として圧縮強度の 1/13 を代入したものである。

$$\tau_{\max} = \pm \left( 0.081 f_{telem}^{3.0} (-\sigma + f_{telem})^{0.7} + f_{telem} \right) \quad (3)$$

$(\sigma \leq f_{telem})$

$$\tau_{\max} = \pm \left( 0.054 f_{telem}^{3.0} (-\sigma + f_{telem})^{0.8} + f_{telem} \right) \quad (4)$$

$(\sigma \leq f_{telem})$

### 3.3 界面の付着強度

再生モルタルを用いた場合の界面の付着強度を求めるために図-1 (b) に示す供試体を用い破壊面の角度  $\alpha$  を変化させ、付着強度試験を行った。試験結果の整理の仕方は 3.2 と同様である。図-1 (b) の A の部分は粗骨材の代用としたモデル骨材で、B の部分は普通モルタルまたは再生モルタル M である。A と B の境界面が破壊面となる。モデル骨材は早強ポルトランドセメントを用い  $W/C=0.30$ ,  $S/C=0.20$  の配合でモルタルを打設し、封緘して 20°C で 1 日間養生した後、20°C で水中養生を行って作製した。その際、モデル骨材のモルタルと接する面において表層のセメントペーストを剥離させた。モデル骨材の材令が 14 日目で、破壊面が鉛直となる向きでモルタルを打ち継いだ後さらに 14 日間養生し試験に用いた。

試験結果を図-4 に示した。実線は普通モルタル、破線は再生モルタル M について線形回帰し

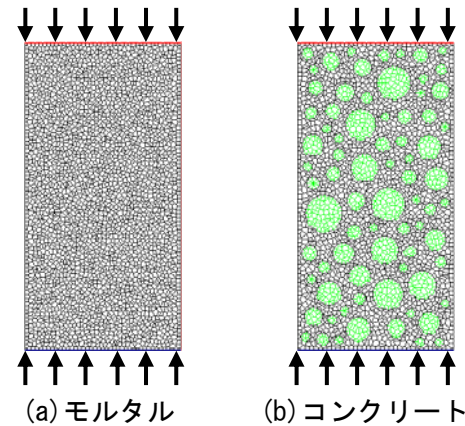


図-5 解析供試体

たものである。それらの傾きと  $\tau$  軸の切片の値からそれぞれ  $\phi$  と  $c$  を求めると、普通モルタルでは  $\phi=32.8^\circ$ ,  $c=2.26\text{N/mm}^2$  となり、再生モルタル M では  $\phi=32.9^\circ$ ,  $c=3.22\text{N/mm}^2$  となった。 $c$  の値に差が現れたが、いずれも天然骨材とモルタルの界面の付着強度に関する実験結果<sup>7)</sup>のばらつきの範囲内であったため、本研究において行った試験の範囲では界面の付着強度について再生モルタルと普通モルタルは同等であると判断した。

## 4. 数値解析

### 4.1 再生モルタルの解析

図-5 (a) はモルタルの解析供試体である。供試体の寸法は  $100 \times 200\text{mm}$  で上下端面は横方向に拘束しており、要素数は 3204 個である。入力データにおけるモルタルの圧縮強度は  $35\text{N/mm}^2$ 、ヤング係数とポアソン比はそれぞれ  $21900\text{N/mm}^2$  と 0.18 である。この供試体に圧縮荷重として 1 ステップにつき  $0.002\text{mm}$  の強制変位を与えた。普通モルタルの解析として最大せん断応力に式(1)を、再生モルタル H、再生モルタル M にそれぞれ式(3),(4)を適用した。

図-6 はモルタルの解析結果である。普通モルタル、再生モルタル H、再生モルタル M の順に圧縮強度は  $35.80, 35.18, 32.13\text{N/mm}^2$  となった。図-3 に示したモデル化において  $\sigma/f_c$  が 0.5 以上で最大せん断応力が普通モルタルに近い値である再生モルタル H は圧縮強度が普通モルタルと

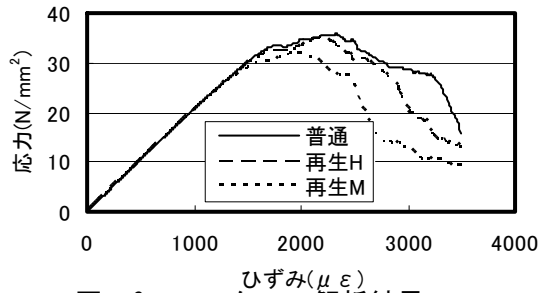


図-6 モルタルの解析結果

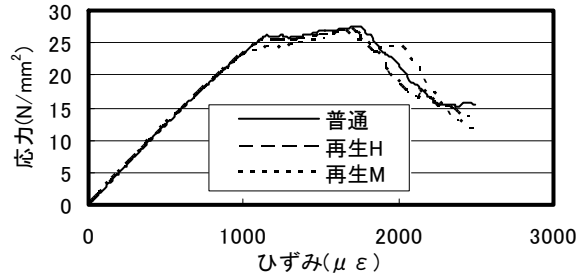


図-7 コンクリートの解析結果その1

同等であるが、 $\sigma/f_c$ が 0.5 以上において最大せん断応力が普通モルタルより小さい再生モルタル M は圧縮強度が普通モルタルより 10%程度低下した。また、最大荷重時には普通モルタルのひび割れが最も大きく、再生モルタル M が最も小さかったが、最終ステップにおいては普通モルタルのひび割れ最も小さく、再生モルタル M が最も大きかった。再生モルタル M について  $\sigma/f_c$  が 0.5 以上の領域で普通モルタルにより近い値となるようモデル化ができれば実験と同様に圧縮強度の差が小さくなると思われる。

#### 4.2 再生コンクリートの解析

図-5(b)は再生コンクリートの解析供試体である。供試体の寸法は  $100 \times 200\text{mm}$  で上下端面は横方向に拘束しており、要素数は 3351 個である。入力データにおけるモルタルの圧縮強度は  $35\text{N/mm}^2$ 、ヤング係数とポアソン比はそれぞれ  $21900\text{ N/mm}^2$  と 0.20 である。原骨材に対しては、入力値として引張強度を  $8.0\text{ N/mm}^2$ 、ヤング係数を  $40000\text{ N/mm}^2$  と仮定した。普通コンクリートの解析として最大せん断応力に式(1)を、再生コンクリート H、再生コンクリート M にそれぞれ式(3),(4)を適用した。界面の付着強度(式(2)参照)に対しては、普通モルタルと再生モルタルに共通の値として  $\phi=33^\circ$ 、 $c=2.69\text{ N/mm}^2$  を代入して用いた。なお、 $c=2.69\text{ N/mm}^2$  は圧縮強度から文献 4 に示された式により求めた値であり、3.3 における普通モルタルと再生モルタルの実験値や既往の研究<sup>7)</sup>から妥当な値であると言える。

図-7 はコンクリートの解析結果である。普通コンクリート、再生コンクリート H、再生コンクリート M の順に圧縮強度は 27.61, 27.29,

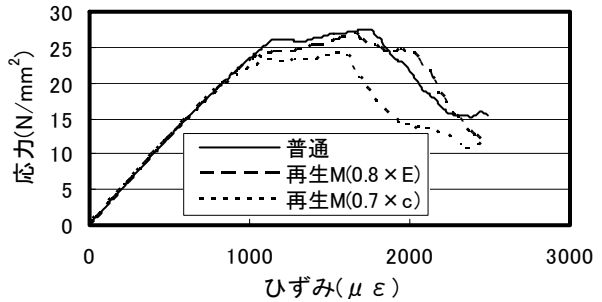


図-8 コンクリートの解析結果その2

$26.88\text{N/mm}^2$  となった。モルタルの解析結果と異なり、再生コンクリート M であっても圧縮強度の低下が小さく、普通コンクリートの 97.4%の値であり、破壊性状についても明確な差異は現れなかった。その要因として、通常の強度のコンクリートにおいては界面に生じたひび割れが次第に連続し破壊に至るため、コンクリートの強度に現れるモルタルそのものの強度低下の影響が小さいと考えられる。

一方で、粗骨材に普通骨材、細骨材に吸水率 6%前後の再生細骨材を用いたコンクリートの圧縮強度が普通コンクリートより小さかったという実験結果がある<sup>1)</sup>。その再生コンクリートのヤング係数は普通コンクリートより小さく、僅かであるが乾燥収縮率大きい結果が示されている。再生コンクリートの強度の低下について考察するため、再生コンクリート M の解析条件として再生モルタルのヤング係数を 20%低下させた場合と界面の付着強度(式(2)参照)を 30%低下させた場合の 2 通りの解析を行った。その結果を図-8 の破線と点線で示した。ヤング係数を低下させた場合、圧縮強度は  $26.88\text{ N/mm}^2$  で普通コンクリートより 2.64%強度が低下した。界面の付着強度を低下させた場合、圧縮強度は 24.11

N/mm<sup>2</sup> で普通コンクリートより 12.7%強度が低下した。破壊性状については付着強度を低下させた場合、界面のひび割れがより大きく現れた。よって、再生細骨材を用いたコンクリートの強度が普通コンクリートに比べ低下するならば、その主な要因として以下のことが考えられる。

3.3 で示した実験は、界面のブリーディングと乾燥収縮の影響が現れないよう留意して供試体の作製を行ったのであるが、実際には再生コンクリートの方が普通コンクリートより乾燥収縮の影響を強く受け、界面の付着強度が低下していることが考えられる。また、粗骨材とモルタルの界面は、それら 2 つの材料のヤング係数とポアソン比の違いから応力集中が発生する場所であり、再生細骨材を用いた場合モルタルのヤング係数の低下によって 2 材料間のヤング係数の差異が大きくなり、普通コンクリートより界面の応力集中が大きくなると思われた。しかし、ヤング係数については解析結果から圧縮強度に与える影響は顕著ではないと考えられる。

以上、再生コンクリートの強度が低い場合、すなわち再生細骨材の吸水率が比較的高い場合について検討した結果であるが、JIS の再生骨材 H 相当の再生細骨材を用いた場合、モルタルのヤング係数、乾燥収縮率は普通モルタルと同等という実験結果が示されており<sup>8)</sup>。このような場合、再生コンクリートの圧縮強度は普通コンクリートと同等であることが期待され、今後検討を行う。

## 5. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) 再生モルタルの最大せん断応力を示した。
- 2) 要素試験の結果より、再生モルタルは普通モルタルに比べ、圧縮強度に差が無くてもせん断強度が低下すると推測される。
- 3) 解析的検討より、再生細骨材を用いたコンクリートが普通コンクリートより強度が低い場合、その要因として界面の付着強度が低下していると考えられる。

## 参考文献

- 1) 新井暢, 中村成春, 舛田佳寛, 阿部道彦: 再生細骨材コンクリートの強度及び変形性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.1, pp.1081-1086, 1997.6
- 2) 松村宇, 伊藤正澄, 平島剛, 桂修: 湿式選別法による再生骨材及び再生微粉末の製造, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.26, No.1, pp.1533-1538, 2004.7
- 3) 佐藤靖彦, 佐々木慎一, 奥山英俊, 今野克幸: 再生粗骨材を用いたコンクリートの凍結融解抵抗性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.26, No.1, pp.1503-1508, 2004.7
- 4) Kohei Nagai, Yasuhiko Sato and Tamon Ueda: Mesoscopic Simulation of Failure of Mortar and Concrete by 2D RBSM, Journal of ACT, Vol.2, No.3, pp.359-374, 2004
- 5) 金子修平, 今野克幸, 伊藤正澄: 再生細骨材を用いたモルタルの降伏条件について, 土木学会北海道支部論文報告集, Vol.62, V-17, 2006.2
- 6) 上田眞稔, 竹内則雄, 樋口晴紀, 鬼頭宏明, 川井忠彦: 引張・圧縮破壊を考慮した RC 構造物の離散化極限解析, 構造工学論文集, Vol.36A, pp.315-323, 1990年3月
- 7) Michael A. Taylor and Bengt B. Broms: Shear Bond Strength Between Coarse Aggregate and Cement Paste or Mortar, ACI Journal, No.61, pp.939-956, 1964.8
- 8) 松村宇, 佐川孝広, 平島剛, 桂修: 湿式選別法によるコンクリート廃材の全量リサイクル, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.27, No.1, pp.1315-1320, 2005.6

## 謝辞

原コンクリートを破砕する際、北方建築総合研究所の桂修氏、松村宇氏に多大なる助力を得た。また、再生骨材の製造はアグロ技術株式会社で行ったものである。ここに厚くお礼申し上げます。