

地球環境に配慮した高靱性セメント複合材料 —再生細骨材を使用した高靱性セメント複合材料に 関する基礎的研究—

渡部 憲^{*1}

Environment-Friendly Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composite - Fundamental Study on DFRCC Using Recycled Fine Aggregate -

by

Ken WATANABE^{*1}

Abstract

Recently, research and development of ductile fiber reinforced cementitious composites (DFRCC) superior to existing ones are actively conducted. DFRCC is a cementitious composite material reinforced with fibers, and it represents crack dispersing properties under tensile, flexural or compressive stress. In this study, fiber reinforced mortar specimens using recycled fine aggregate were tested under compressive, split tensile, and 3-point flexural loading. To investigate applicability of DFRCC to precast piles, the experiments and finite element analyses of precast piles were also conducted. The results suggest that the use of DFRCC for the pile-tip protection of precast piles improves the bearing ductility of the tip of precast piles. The present finite element analysis was able to simulate the effect of the use of DFRCC for the pile-tip protection of precast piles.

Keywords: Fiber reinforced concrete, Ductile fiber reinforced cementitious composite, Recycled fine aggregate, Precast pile, Finite element method

1. はじめに

最近、既存の繊維補強コンクリートをはるかに上回るひび割れ分散性や破壊靱性を有する「高靱性セメント複合材料(以下、DFRCC(Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composite)と略記)」が注目を集めている¹⁻³⁾。DFRCCを鉄筋コンクリート(以下、RCと略記)構造物に積極的に適用していくことは、RC構造物の耐震性のみでなく、耐久性の向上にも大きく寄与すると考えられる⁴⁾。

筆者も、これまでに細骨材種類、水セメント比、ビニロン繊維寸法、繊維体積混入率を変動因子としたビニロン繊維補強モルタルの切り欠き梁3点曲げ実験を行い、DFRCCの優れたひび割れ分散性および破壊靱性を確認した⁵⁾。また、DFRCC耐震壁の1/3スケールモデル試験体の水平載荷実験を行い、DFRCC耐震壁の優れた補強効果を確認した⁶⁾。

ところで、現在、生産活動を実施するにあたり地球環境問題に対応する取り組みは重要な課題であり、コンクリートの分野においても、解体コンクリート塊から取り出した再生骨材を使用して再びコンクリートを製造する、再生骨材コンクリートの研究が活発に実施されており、研究成果および施工事例も報告されている⁷⁻⁹⁾。今後、コンクリートのリサイクルを更に積極的に推し進めるためにも、再生骨材の新たな有効利用技術を開発

しておく必要がある。

そこで、筆者らは骨材として吸水率3%および4%程度の再生細骨材を使用したDFRCC実現の可能性について検討を行った¹⁰⁾。また、DFRCCを使用した場合の補強効果を検討するため、既製杭先端根固め部を対象とした実験および有限要素解析(以下、FEM解析と略記)を実施した¹¹⁾。本報は、東海大学工学部2006年度学部等研究教育補助金(代表者:渡部憲)、研究テーマ「地球環境に配慮した高靱性セメント複合材料—再生細骨材を使用した高靱性セメント複合材料に関する基礎的研究—」に関する一連の研究成果を取りまとめたものである。

2. 材料特性に関する検討

まず、骨材として吸水率3%および4%程度の再生細骨材を使用したDFRCC実現の可能性について、各種の検討を行った。

2.1 実験概要

モルタル試験体の一覧をTable 1に示す。モルタルの種類は、吸水率3%程度の再生細骨材Hを使用した再生細骨材Hモルタル(HRM)、吸水率4%程度の再生細骨材Mを使用した再生細骨材Mモルタル(MRM)および砕砂と山砂を質量比7:3で混合使用した天然細骨材モルタル(NM)の3種類で、水セメント比(W/C)は、HRMでは35、40、50および60%、MRMおよびNMでは40、50および60%とした。繊維体積混入率(V_f)

* 1 工学部建築学科准教授

Table 1 Outline of specimens

| Specimen | Mortar type | Sand | Water-cement ratio (wt.%) | Sand-cement ratio (wt.%) | Fiber volume fraction (Vol.%) | Mixing proportion of fiber |
|-----------------|-------------|-----------|---------------------------|--------------------------|-------------------------------|----------------------------|
| HRM35-VF0 | HRM | Recycle H | 35 | 50 | 0 | — |
| HRM35-VF3-V10 | | | | | 3 | V(10) |
| HRM35-VF3-V7-S3 | | | | | 3 | V(7)+S(3) |
| HRM35-VF3-V5-S5 | | | | | 3 | V(5)+S(5) |
| HRM40-VF0 | | | | | 0 | — |
| HRM40-VF2-V10 | | | | | 2 | V(10) |
| HRM40-VF2-V7-S3 | | | 2 | V(7)+S(3) | | |
| HRM50-VF0 | | | 0 | — | | |
| HRM50-VF2-V10 | | | 2 | V(10) | | |
| HRM50-VF2-V7-S3 | | | 2 | V(7)+S(3) | | |
| HRM50-VF3-V10 | | | 3 | V(10) | | |
| HRM50-VF3-V7-S3 | | | 3 | V(7)+S(3) | | |
| HRM50-VF3-V5-S5 | 3 | V(5)+S(5) | | | | |
| HRM60-VF0 | HRM | Recycle H | 60 | 100 | 0 | — |
| HRM60-VF2-V10 | | | | | 2 | V(10) |
| HRM60-VF2-V7-S3 | | | | | 2 | V(7)+S(3) |
| HRM60-VF3-V10 | | | 3 | V(10) | | |
| HRM60-VF3-V7-S3 | | | 3 | V(7)+S(3) | | |
| MRM40-VF0 | | | MRM | Recycle M | 40 | 60 |
| MRM40-VF3-V10 | 3 | V(10) | | | | |
| MRM40-VF3-V7-S3 | 3 | V(7)+S(3) | | | | |
| MRM50-VF0 | 0 | — | | | | |
| MRM50-VF3-V10 | 3 | V(10) | | | | |
| MRM60-VF0 | 0 | — | | | | |
| MRM60-VF3-V10 | 3 | V(10) | | | | |
| NM40-VF0 | NM | Natural | 40 | 60 | 0 | — |
| NM40-VF3-V10 | | | | | 3 | V(10) |
| NM50-VF0 | | | | | 0 | — |
| NM50-VF3-V10 | | | 3 | V(10) | | |
| NM60-VF0 | | | 0 | — | | |
| NM60-VF3-V10 | | | 3 | V(10) | | |

Fine aggregate Recycle H :Recycled fine aggregate (Percentage of absorption :3.25%, Maximum size :2.5mm)

Recycle M :Recycled fine aggregate (Percentage of absorption :4.30%, Maximum size :5.0mm)

Natural :Crushed sand (Percentage of absorption :1.36%, Maximum size :5.0mm)

Natural :Pit sand (Percentage of absorption :2.66%, Maximum size :1.2mm)

The mixing proportion of crushed sand and pit sand are 7:3.

Cement :Ordinary Portland cement

Fiber V :Vinylon fiber (Diameter :0.20mm, Length :24mm, Young's modulus :29kN/mm², Tensile strength :975N/mm²)

S :Steel fiber (Diameter :0.60mm, Length :30mm, Young's modulus :210kN/mm², Tensile strength :1000N/mm²)

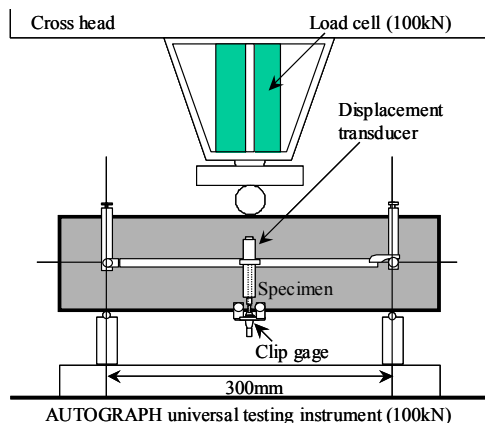


Fig. 1 3-point loading system

は、HRMでは0、2および3%、MRMおよびNMでは0および3%、使用した繊維はビニロン繊維および鋼繊維で、ビニロン繊維は径0.20mm、長さ24mm、鋼繊維は径0.60mm、長さ30mmである。一部の試験体については、ビニロン繊維と鋼繊維を混合使用している。細骨材セメント比(S/C)は、試し練りによって決定した。

荷重は、圧縮、割裂および切欠き梁3点曲げの3種類とした。試験体寸法は、圧縮および割裂実験ではφ100×200mm、切欠き梁3点曲げ実験では100×100×400mmで、各3体製作した。試験体は、モルタル打設後1日で脱型し、試験時(材齢28日)まで標準水中養生を行った。

(1) 切欠き梁3点曲げ試験および計測方法

切欠き梁3点曲げ試験の概要を Fig. 1 に示す。切欠きは、載

荷直前に、ダイヤモンドカッターを使用して試験体中央に深さ50mmとなるように施工した。支点間のスパンは300mmである。荷重は、100kNのAUTOGRAPH型精密万能試験機を用いて行い、クロスヘッド速度を制御した。クロスヘッド速度は、繊維補強モルタルでは0.2mm/minの荷重速度としたが、プレーンモルタルでは最大荷重後の急激な荷重低下を防ぐため、0.01mm/minの荷重速度とした。荷重は100kNロードセルで計測し、スパン中央部のたわみはFig. 1に示す変位計測治具を試験体に取り付け、10mm高感度変位計で計測した。切欠き口の開口変位は5mmクリップゲージで計測した。各計測データは、データロガーを使用して取込んだ。

(2) 曲げ靱性の評価方法

曲げ靱性の評価方法は、文献12を参考に、以下の手法で評価した。

まず、曲げ強度は以下の式より求めた。

$$f1_b = \frac{P \cdot \ell}{b \cdot h^2} \times \frac{3}{2} \quad (1)$$

ここに、 $f1_b$: 曲げ強度(N/mm²)、P : 最大荷重(N)、L : スパン(mm)、b : 破壊断面の幅(mm)、h : 破壊断面の高さ(mm)である。

次に、曲げタフネスは曲げ靱性係数で表され、以下の式によって求めた。

$$f2_b = \frac{T_b}{\delta_{tb}} \times \frac{\ell}{b \cdot h^2} \times \frac{3}{2} \quad (2)$$

ここに、 $f2_b$: 曲げ靱性係数(N/mm²)、 T_b : 原点から δ_{tb} までの曲線下の面積(N・mm)、 δ_{tb} : スパン中央部のたわみ(mm)、L : スパン(mm)、b : 破壊断面の幅(mm)、h : 破壊断面の高さ(mm)

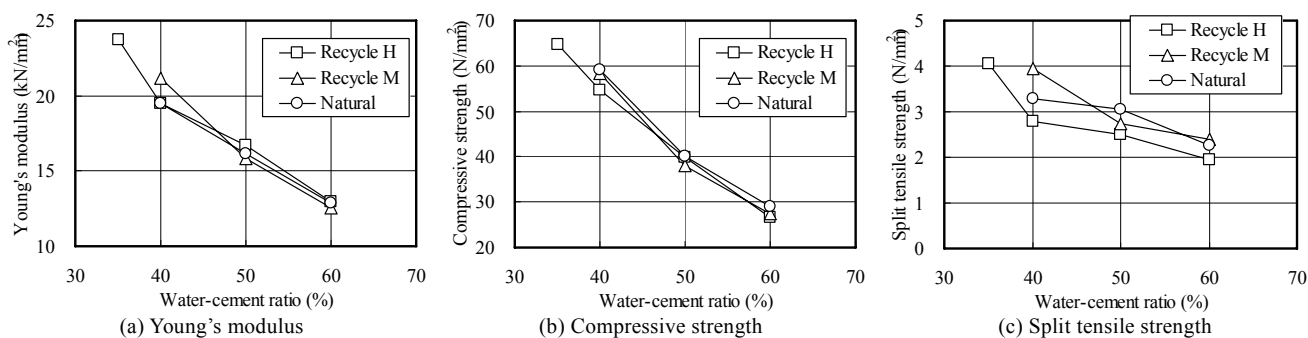


Fig. 2 Young's modulus, compressive strength and split tensile strength of plain mortar

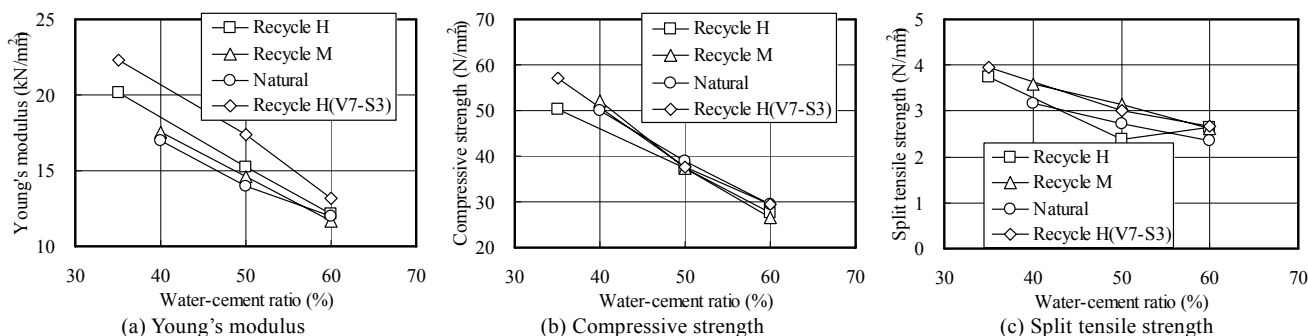


Fig. 3 Young's modulus, compressive strength and split tensile strength of fiber reinforced mortar

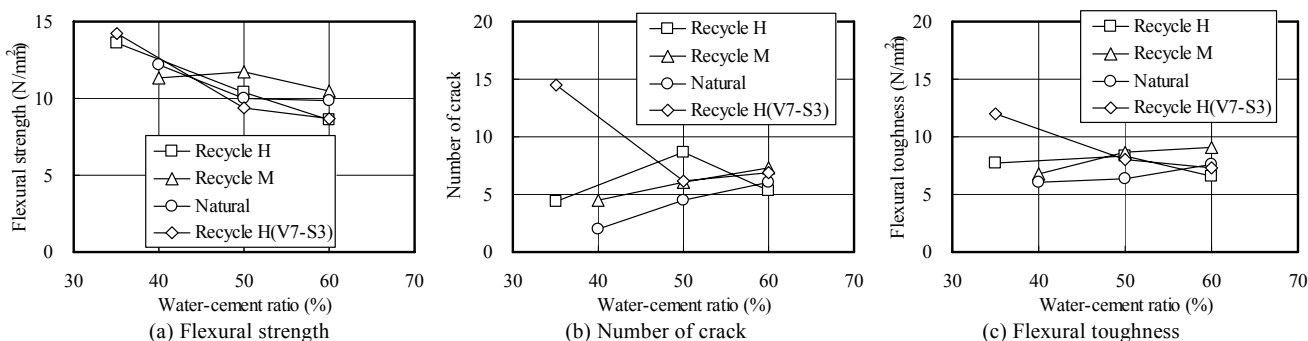


Fig. 4 Flexural strength, number of crack and flexural toughness of fiber reinforced mortar

である。

2.2 結果と考察

(1) ヤング係数, 圧縮および割裂強度

Fig. 2 および 3 に, 骨材種類の異なるプレーンおよび繊維補強モルタル ($V_f=3\%$, ピニロン繊維のみ) のヤング係数, 圧縮および割裂強度と W/C の関係を示す. なお, Fig. 3 中には, 繊維を混合使用した場合の結果 (ピニロン繊維を 7 割, 鋼繊維を 3 割 (V7-S3)) も併記してある. これらの図によれば, 骨材種類の相違による各強度値への影響は小さい. このことから, 本研究の範囲では, 再生細骨材の吸水率がプレーンモルタルおよび繊維補強モルタルの各強度値に与える影響は小さいと言える.

なお, プレーンモルタルと比較して繊維補強モルタルでは, ヤング係数および圧縮強度が低 W/C において低下する傾向にある. ただし, Fig. 3 (a) に示す通り, 鋼繊維を混合使用することにより, この傾向は改善する.

(2) 曲げ強度, ひび割れ本数および曲げ靱性係数

Fig. 4 に, 骨材種類の異なる繊維補強モルタル ($V_f=3\%$, ピニ

ロン繊維のみ) の曲げ強度, ひび割れ本数およびたわみ 7.5mm 時の曲げ靱性係数と W/C の関係を示す. なお, Fig. 4 中には, 繊維を混合使用した場合の結果 (ピニロン繊維を 7 割, 鋼繊維を 3 割 (V7-S3)) も併記してある. Fig. 4 (a) によれば, 骨材として再生細骨材 M を使用した場合の W/C=40%の結果を除き, 曲げ強度は W/C の増加とともに減少する傾向にある. 一方, ひび割れ本数 (: 切欠き先端に生じたひび割れ本数を, 実験後に観察, Fig. 4 (b)) およびたわみ 7.5mm 時の曲げ靱性係数 (Fig. 4 (c)) は, 骨材として再生細骨材 H を使用した場合の W/C=60%の結果を除き W/C の増加とともに増加する傾向にある. そして, いずれの骨材を使用した場合でも, W/C=50%以上においてひび割れ本数が 5 本程度以上となっており (実験終了後, 目視によりひび割れ本数を計測), 再生細骨材を使用した場合でも, 十分なひび割れ分散性および曲げ靱性を有すること (DFRCC が実現可能) が分かった. なお, 同一 W/C における, 骨材種類の相違による各値への影響は小さい. また, 鋼繊維を混合使用することにより W/C=35%では各値は改善傾向にあるが, W/C=50 および 60%ではその効果は確認できない. これは, W/C=35%のよう

な比較的高強度の領域では、ピニロン繊維のみでは十分な補強効果が得られず、剛性の高い鋼繊維を混合使用することにより、十分な補強効果が得られ、W/C=50 および 60%のような強度領域では、ピニロン繊維のみで十分な補強効果が得られるため、鋼繊維を混合使用した効果が現れ難かったものと考えられる。

(3) 荷重-たわみ関係

Fig. 5 および 6 に、W/C の異なるプレーンおよび繊維補強モルタル ($V_f=3\%$, ピニロン繊維のみ) の切欠き梁 3 点曲げ試験により得られた荷重-たわみ関係を骨材種類別に示す。

まず、プレーンモルタルの結果 (Fig. 5) に注目すると、骨材

種類に係わらず、W/C の低下とともに破壊性状が脆性的になる傾向が確認できる。この傾向は、繊維補強モルタルの結果 (Fig. 6) でも同様である。なお、繊維補強モルタルの場合、W/C=50%以上となると破壊靱性が著しく改善されている。これは、本研究で使用したピニロン繊維の場合、W/C=50%以上のモルタルにおいて、補強効果が大きくなるものと考えられる。

Fig. 7 および 8 に、再生細骨材 H を使用した繊維混合比の異なる繊維補強モルタル ($V_f=2$ および 3% , ピニロン繊維のみ (V10), ピニロン繊維を 7 割、鋼繊維を 3 割 (V7-S3) およびピニロン繊維を 5 割、鋼繊維を 5 割 (V5-S5)) の切欠き梁 3 点

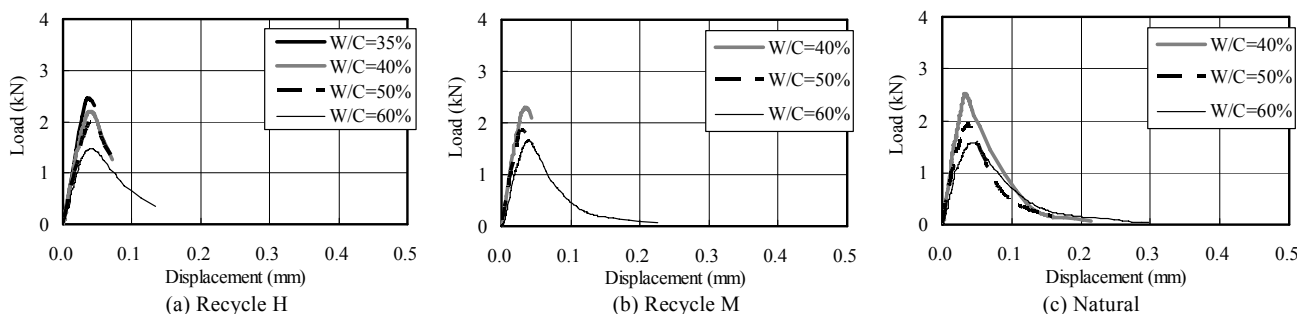


Fig. 5 Load-displacement relationship of plain mortar

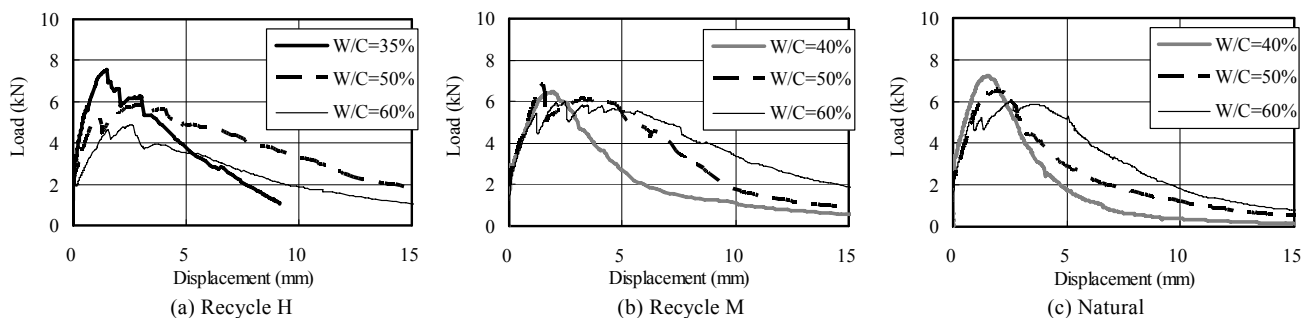


Fig. 6 Load-displacement relationship of fiber reinforced mortar

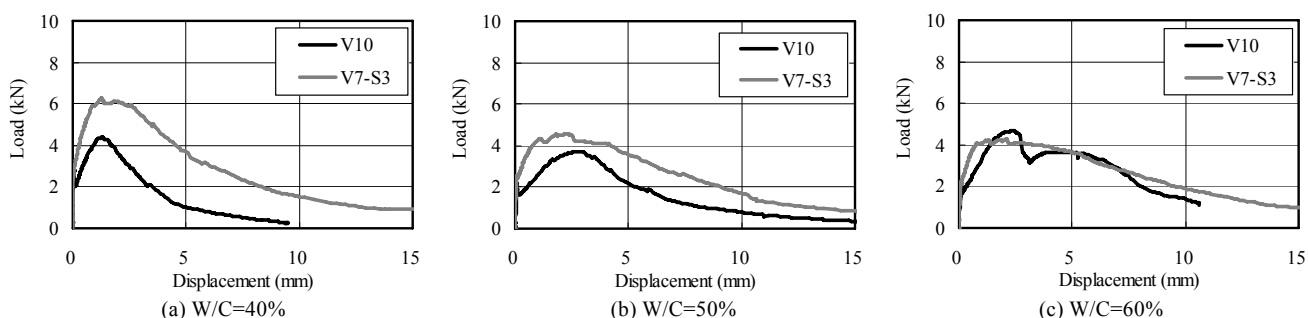


Fig. 7 Load-displacement relationship ($V_f=2.0\%$, Recycle H)

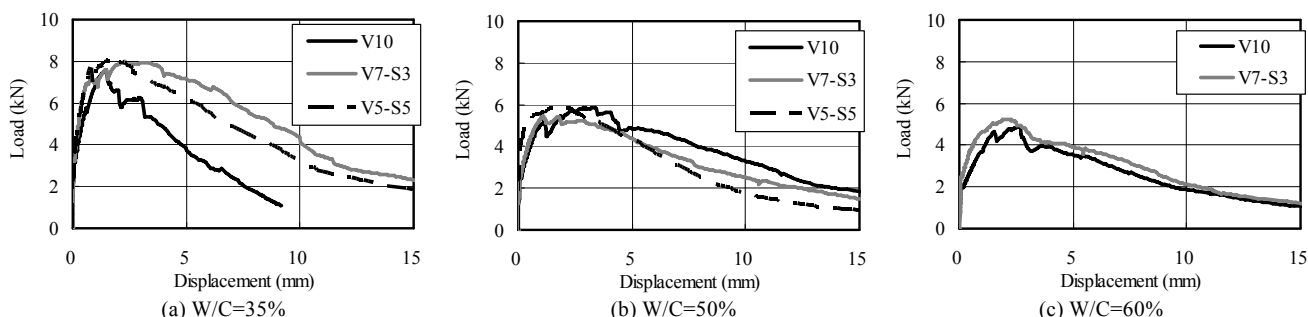


Fig. 8 Load-displacement relationship ($V_f=3.0\%$, Recycle H)

曲げ実験により得られた荷重-たわみ関係を W/C 別に示す。これらの図によれば、 V_f に係わらず W/C=40%以下においては鋼繊維を混合使用することによる靱性改善効果が確認できるが、W/C が大きくなるに従い、その効果が小さくなる。

即ち、W/C=50, 60%の領域では、ビニロン繊維の単独使用で十分な靱性改善が可能であるが、W/C=35, 40%の領域ではビニロン繊維と鋼繊維の混合使用が有効であると言える。

なお、ビニロン繊維と鋼繊維の混合使用割合については、本研究の範囲では 7 : 3 を推奨する。

3. 既製杭先端根固め部への適用性

次に、前章において開発された、再生細骨材 DFRCC を RC 構造物等に適用した場合の補強効果を検討するため、一例として、既製杭先端根固め部を取り上げ、既製杭先端根固め部を対象とした実験および FEM 解析を実施した。

既製コンクリート杭の施工法は、プレポーリング拡大根固め工法が主流である。この工法は、あらかじめ地盤を掘削し、セメントミルク（根固め液、杭周固定液）を注入、攪拌し根固め部および杭周固定部を築造する。その後、杭を設置する（Fig. 9 参照）。近年、鉛直支持力性能向上のため、杭先端の根固め部を杭先端部径(D1)の1.5倍程度に拡大して築造することにより、大きな杭先端支持力を発揮させる工法が開発されている。Fig. 9の例は、杭先端から2.0D1区間を、軸径D3より拡径した杭を示しており、根固め部は、長さ3.5D1(杭先端部から下方に1.5D1, 上方に2.0D1)、根固め径(D2)は杭径の1.5D1である。また、杭は、杭先端部径(D1)程度の距離を支持層に貫入するように設定している。杭先端支持力(Rp)、杭と根固め部の付着力(R1)、杭先端の抵抗力(R2)および地盤支持力(R3)など多くの複合的要因で決定される。

一般的に根固め部を構成する材料（モルタル）は脆性破壊材料である。根固め部の破壊が想定されるような非常に堅い支持

層に根固め部を設置する場合には、DFRCCを根固め部に適用し、破壊靱性を改善することにより、支持力性能の向上が期待できるものと思われる。

そこで本章では、杭先端から下方の根固め部（Fig. 9の斜線部分）に着目し、根固め部に天然細骨材および再生細骨材を用いたDFRCCを使用した場合の影響について検討した。また、実験結果を対象としたFEM解析についても併せて実施した。

3.1 支圧実験概要

実験の概要および根固め部の調合を Table 2 および Table 3 に示す。また、根固め試験体（杭および根固め部により構成）の概要を Fig. 10 に示す。杭は中空の鋼管コンクリート複合杭とした。杭はφ100 (D1) × 50mm（ただし、D1の実測値は101.6mm）である。根固め部は、高さ(H)を150mm (1.5D1)、径(D2)を125 (1.25D1)、150 (1.5D1) および 200mm (2.0D1) とした。根固め部では、実施工においてセメントミルクを注入後、先端

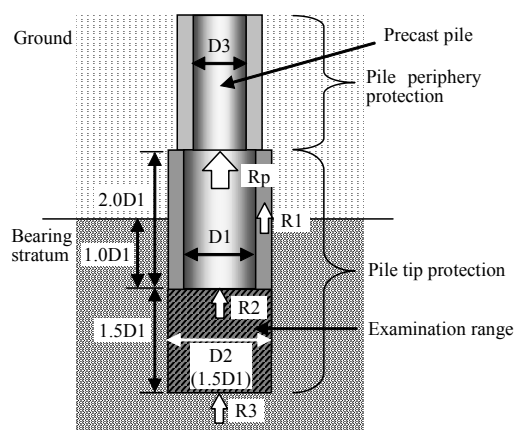


Fig. 9 Precast pile and pile tip protection

Table 2 Outline of specimens

| Pile tip protection specimen No. | Pile tip protection specimen | | | | | | Strength test | | | | |
|----------------------------------|------------------------------|---------------------|--|---------------------------------------|-------------|--------------|---|---|---------------------------------------|-----------------|---|
| | Diameter of pile: D1 (mm) | Height of pile (mm) | Shape | | Name of mix | Teflon sheet | Compressive strength (N/mm ²) | Vertical strain at compressive strength (μ) | Young's modulus (kN/mm ²) | Poisson's ratio | Split tensile strength (N/mm ²) |
| | | | Diameter of pile tip protection: D2 (mm) | Height of pile tip protection: H (mm) | | | | | | | |
| 1 | 100 | 50 | 150 | 150 | NM | ○ | 34.9 | 4225 | 16.0 | 0.213 | 2.61 |
| 2 | | | 200 | | | | | | | | |
| 3 | | | 150 | | | | | | | | |
| 4 | | | 200 | | NMDFRCC | | | | | | |
| 5 | | | 150 | | | | | | | | |
| 6 | | | 200 | | | | | | | | |
| | | | | | | 26.1 | 4609 | 11.3 | 0.206 | 2.51 | |

Table 3 Mix proportions

| Name of mix | No. of pile tip protection specimen | Water-cement ratio W/C (wt.%) | Sand-cement ratio S/C (wt.%) | Fiber volume fraction (Vol.%) | Mass per unit volume (kg/m ³) | | | | Admixture (Cwt.%) |
|-------------|-------------------------------------|-------------------------------|------------------------------|-------------------------------|---|-----|-----|-----|-------------------|
| | | | | | W | C | S1 | S2 | |
| NM | 1,2 | 55.0 | 97.8 | 0.0 | 441 | 802 | 549 | 235 | 0.0 |
| NMDFRCC | 3,4 | | 60.0 | 3.0 | 470 | 855 | 359 | 154 | 1.5 |
| MRMDFRCC | 5,6 | | | | 465 | 846 | 254 | 254 | 1.5 |

C: Ordinary Portland cement (Density: 3.16g/cm³)

S1: Crushed sand (Density: 2.64g/cm³, Percentage of absorption: 1.46%, Fineness modulus: 3.03, Maximum size: 5.0mm) for NM and NMDFRCC,

Coarse recycled fine aggregate (Density: 2.51g/cm³, Percentage of absorption: 4.71%, Fineness modulus: 3.18, Maximum size: 5.0mm) for MRMDFRCC

S2: Pit sand (Density: 2.56g/cm³, Percentage of absorption: 1.78%, Fineness modulus: 1.79, Maximum size: 5.0mm) for NM and NMDFRCC,

Medium recycled fine aggregate (Density: 2.47g/cm³, Percentage of absorption: 5.03%, Fineness modulus: 2.34, Maximum size: 5.0mm) for MRMDFRCC

The mixing proportion of S1 and S2 are 7:3 for NM and NMDFRCC, 5:5 for MRMDFRCC.

Admixture: Reducing segregation admixture

地盤と攪拌混合するため、1～3割程度の砂が混入される。従って、NMは、 $W/C=55\%$ 、細骨材の混入率を体積比で30%とし、砕砂と山砂を質量比で7：3の割合で混合使用した。また、天然細骨材を使用したDFRCC(NMDFRCC)では、 $W/C=55\%$ 、ピニロン繊維 $V_f=3.0\%$ 、砕砂と山砂を質量比で7：3の割合で混合使用した。さらに、再生細骨材を使用したDFRCC(MRMDFRCC)では、 $W/C=55\%$ 、ピニロン繊維 $V_f=3.0\%$ 、再生細骨材粗目と再生細骨材中目を質量比で5：5の割合で混合使用した。なお、杭の中空部は、根固め部と同一材料とした。

支圧実験は、根固め部の強度が $30N/mm^2$ となる材齢2週で実施した。計測項目は、荷重、杭頭変位、根固め部変位、根固め内部ひずみおよび根固め部表面ひずみである。なお、荷重時において、試験体下端面と荷重盤の間にテフロンシート設置した(実際には根固め部底面—地盤間の摩擦力が考慮されるべきであるが、基礎的な検討項目の一つとして、摩擦力がない場合を想定)。各試験体は、モルタル打設後1日で脱型し、所定材齢まで実験室内で湿布養生した。

3.2 破壊靱性実験概要

本研究では、支圧実験と同時にNMおよびDFRCCの圧縮軟化挙動および引張軟化挙動を計測するために、圧縮破壊および曲げ破壊実験を実施した。

まず、圧縮破壊実験では、 $\phi 100 \times 200mm$ 円柱試験体を使用し、一軸圧縮荷重を行った。荷重計測方法をFig. 11に示す。計測項目は、荷重、縦・横ひずみおよび荷重盤間変位である。圧縮軟化挙動の評価は、渡部らの示す手法¹³⁾に準じて行った。なお、得られる圧縮軟化挙動は2直線近似圧縮応力—塑性変形関係である。

次に、曲げ破壊実験では、NMについては文献¹⁴⁾に準じ、 $100 \times 100 \times 400mm$ 角柱試験体を使用し、切欠き梁3点曲げ試験を行い、引張軟化挙動を評価した。ただし、切欠き深さは50mmとした。荷重計測方法は、前掲、Fig. 1に示す通りである。計測項目は、荷重、中央部たわみおよび切欠き開口変位である。なお、得られる引張軟化挙動を大岡等の手法¹⁵⁾により単純化し、3直線近似結合応力(引張応力)—開口変位関係となる。NMDFRCCおよびMRMDFRCCについては文献¹⁶⁾に準じ、 $100 \times 100 \times 400mm$ 角柱試験体を使用し、切欠き無し梁3等分点曲げ試験を行い、引張軟化挙動を評価した。計測項目は、荷重、中央部たわみおよび等曲げ区間上・下部の横方向変位である。なお、得られる引張軟化挙動は引張強度以降、引張応力を終局ひずみまで一定値(引張強度)とするものである。

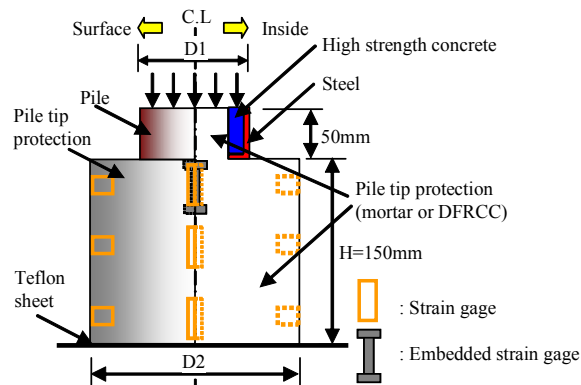


Fig. 10 Pile tip protection specimen

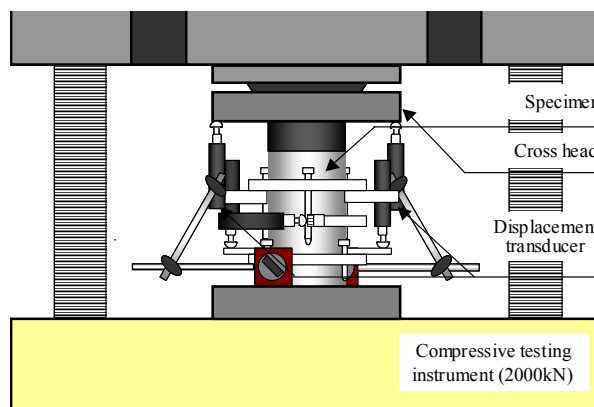


Fig. 11 Compressive loading system

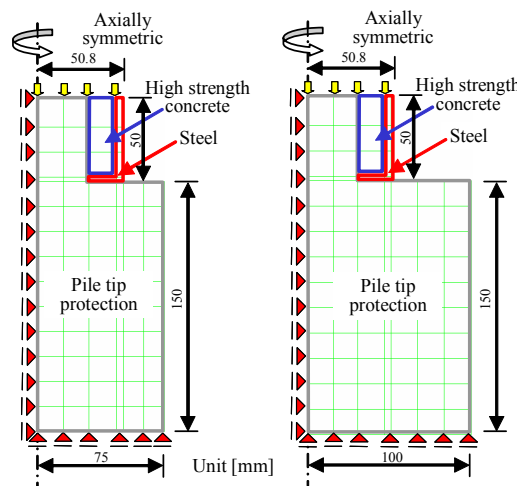


Fig. 12 Finite element division

Table 4 Outline of Analysis

| Analytical model | Specimen to be analyzed | Pile tip protection | | | | Compressive yield criterion | | |
|------------------|-------------------------|---------------------|-------------|-------|-------------------|-----------------------------|----------|----------------|
| | | Diameter (mm) | Height (mm) | Fiber | Type of aggregate | | | |
| NM150VM | No. 1 (teflon) | 150 | 150 | × | Natural | Von-Mises | | |
| NM150DR | | | | | | Drucker-Prager | | |
| NM200VM | No. 2 (teflon) | 200 | | | | ○ | Natural | Von-Mises |
| NM200DR | | | | | | | | Drucker-Prager |
| NMDFRCC150VM | No. 3 (teflon) | 150 | | ○ | Natural | | | Von-Mises |
| NMDFRCC150DR | | | | | | | | Drucker-Prager |
| NMDFRCC200VM | No. 4 (teflon) | 200 | | | | ○ | Recycled | Von-Mises |
| NMDFRCC200DR | | | | | | | | Drucker-Prager |
| MRMDFRCC150VM | No. 5 (teflon) | 150 | | ○ | Recycled | | | Von-Mises |
| MRMDFRCC150DR | | | | | | | | Drucker-Prager |
| MRMDFRCC200VM | No. 6 (teflon) | 200 | | | | ○ | Recycled | Von-Mises |
| MRMDFRCC200DR | | | | | | | | Drucker-Prager |

3.3 支圧実験を対象とした FEM 解析概要

FEM 解析の概要を Table 4 に示す。また、根固め試験体の要素分割を Fig. 12 に示す。

杭および根固め部の各要素は、4 節点アイソパラメトリック軸対象ソリッドリング要素を用いてモデル化した。杭は弾性体とし、鋼材部分は、ヤング係数を 200kN/mm²、ポアソン比を 0.30、また、高強度コンクリート部分は、ヤング係数を 40kN/mm²、ポアソン比を 0.20 と設定した。根固め部には、Table 2 に示す材料定数を与えた。圧縮側は、圧縮強度までを圧縮強度の 1/3 を折れ点とする 2 直線モデル、圧縮強度以降を Fig. 13(a) に示す、3.2 節の手法により得られた圧縮軟化挙動とした。圧縮軟化挙動の塑性変形は、要素面積を 2 倍した値の平方根で除してひずみに変換して用いた。引張側は、引張強度までを弾性、引張強度以降を Fig. 13(b) および (c) に示す、3.2 節の手法により得られた引張軟化挙動とした。NM の引張軟化挙動の開口変位は、要素面積を 2 倍した値の平方根で除してひずみに変換して用いた。DFRCC では終局ひずみ値以降、前述の手法では負勾配が得られない。そのため解析では、終局ひずみ以降を終局ひずみと同値で応力 0 となるように負勾配を設定して用いた。

圧縮側の塑性基準は、Von Mises (以下、VM) または Drucker-Prager (以下、DR) (内部摩擦角および膨張角を 30°)

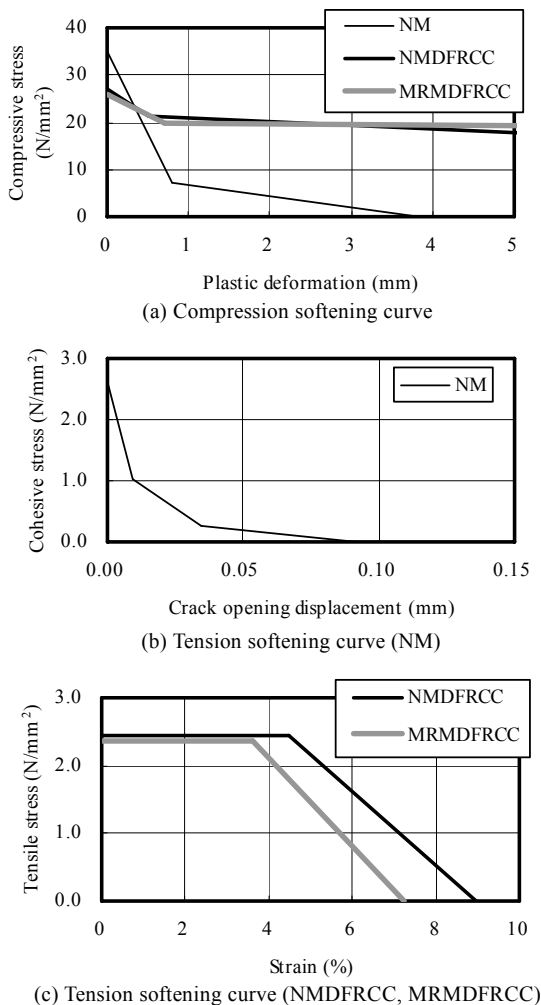


Fig. 13 Softening curve

とし、引張側をテンションカットオフとした。なお、ひび割れは分布ひび割れモデルとした。

解析では、鉛直方向の等変位増分を杭頭部の各載荷節点に負荷する変位制御型の単調漸増載荷を行った。非線形解析¹⁷⁾の求解法は、Newton-Raphson 法を用いた。

3.4 結果と考察

Fig. 14 に、実験および FEM 解析で得られた荷重-杭頭変位関係を示す。DFRCC を根固め部に使用した場合の実験結果は、NM を根固め部に使用した場合の実験結果と比較して、最大荷重後、急激な荷重低下もなく、延性的な変形状を示している。また、NMDFRCC を根固め部に使用した場合の実験結果と MRMDFRCC を根固め部に使用した場合の実験結果には、変形状に大きな差は認められない。なお、Table 2 に示すように NM の圧縮強度 > NMDFRCC = MRMDFRCC となっているにも係わらず、最大荷重は、NM を根固め部に使用した場合 = NMDFRCC および MRMDFRCC を根固め部に使用した場合となっている。このことから、NM の圧縮強度と DFRCC の圧縮強度が同程度であれば、DFRCC を根固め部に使用した場合の最大荷重は、NM を根固め部に使用した場合の最大荷重を上回る可能性がある。

次に、実験結果と解析結果を比較すると、いずれの解析結果も実験結果と比較して最大荷重を高め評価しているものの、根固め部に DFRCC を使用した場合の補強効果を、本 FEM 解析

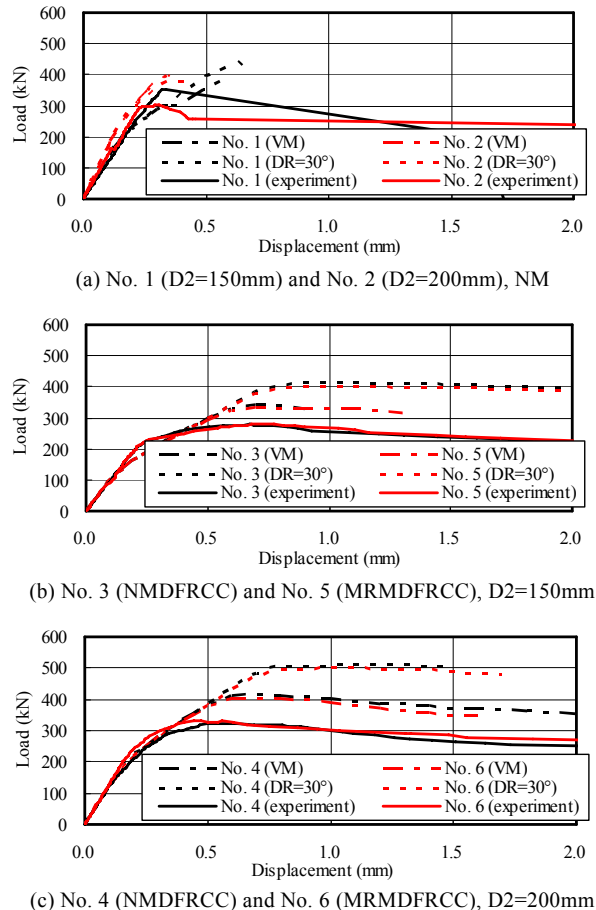


Fig. 14 Load-displacement relationship

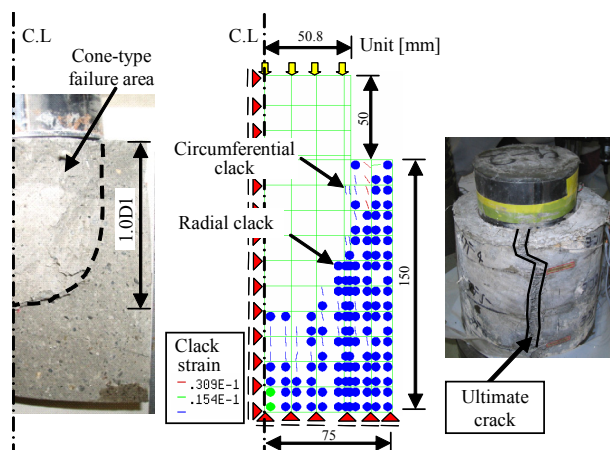


Fig. 15 Fracture state of No. 1 specimen (experiment) Fig. 16 Crack state of No. 1 specimen (analysis) Fig. 17 Fracture state of No. 3 specimen (experiment)

においても、ある程度再現できている。

Fig. 15 に、実験により得られた、NM を根固め部に使用した試験体の、最終破壊状況の一例 (No.1 試験体) を示す。いずれの D2 においても杭先端直下に D1 と同程度の深さを持つコーン領域が形成されていた。

No.1 試験体を対象とした FEM 解析 (NM150VM) により得られたひび割れひずみ図を、Fig. 16 に示す。図中の丸印は半径方向、直線は円周方向のひび割れであり、直線の方は、ひび割れの方向を示している。解析結果からも、杭先端直下に実験結果と同様なコーン領域が確認できる。

Fig. 17 に、DFRCC を根固め部に使用した試験体の、最終破壊状況の一例 (No.3 試験体) を示す。最終的には、1, 2 箇所の円周方向のひび割れ幅が拡大し、破壊に至るが、繊維が根固め部に作用する引張力に抵抗していることがわかる。

以上のことから、根固め部の破壊が想定されるような非常に堅い支持層に根固め部を設置する場合には、DFRCC を根固め部に適用し、破壊靱性を改善することにより、支持力性能の向上が期待できるものと思われる。

5. まとめ

本研究で得られた結果を要約すると、およそ次のようにまとめられる。

- (1)再生細骨材を使用した繊維補強モルタルにおいて、十分なひび割れ分散性および曲げ靱性を確認した。即ち、再生細骨材を使用した場合でも DFRCC は実現可能である。
- (2)DFRCC を根固め部に使用した場合の実験結果は、プレーンモルタルを根固め部に使用した場合の実験結果と比較して、最大荷重後、急激な荷重低下もなく、延性的な変形状を示した。
- (3)根固め部に DFRCC を使用した場合の補強効果を、本 FEM 解析においても、ある程度再現できた。

謝辞:本研究は東海大学工学部 2006 年度学部等研究教育補助金 (代表者:渡部憲) の助成を受けて行われたものであり、ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) (財)日本建築センター:日米共同構造実験研究「高知能建築構造システムの開発」平成 11 年度報告書, 2000.3
- 2) 高靱性セメント複合材料の性能評価と構造利用研究委員会:高靱性セメント複合材料を知る・作る・使う, 高靱性セメント複合材料の性能評価と構造利用研究委員会報告書, 日本コンクリート工学協会, 128pp., 2002. 1
- 3) 丸田誠, 関田徹志, 永井寛, 山本幸正:プレキャスト ECC 連結梁を用いた高層 RC 新架構, コンクリート工学, Vol.43, No.11, pp.18-26, 2005.11
- 4) 大岡督尚, 橋高義典, 渡部憲:短繊維補強コンクリートの収縮ひび割れ特性—収縮ひび割れ性状の引張軟化曲線による評価およびひび割れ進展解析—, 日本建築学会構造系論文集, No.544, pp.7-13, 2001.6
- 5) 渡部憲, 白井伸明, 大岡督尚, 白都滋:各種繊維補強モルタル試験体の曲げ変形挙動, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.23, No.2, pp.355-360, 2001.7
- 6) 渡部憲, 白井伸明, 大岡督尚, 白都滋, 藤田敬:高靱性ビニロン繊維補強モルタル耐震壁の弾塑性挙動に関する基礎的研究, 日本建築学科構造系論文集, No.559, pp.211-218, 2002.9
- 7) コンクリート再生材高度利用研究会:コンクリートリサイクルシステムの普及に向けての提言(コンクリート再生材高度利用研究会活動報告書), 204pp., 2005.9
- 8) 再生骨材標準化委員会:コンクリート用再生骨材の普及促進に関するシンポジウム, 日本コンクリート工学協会, 170pp., 2005.9
- 9) 大岡督尚, 渡部憲, 川原聡, 八城泰衛:再生粗骨材コンクリートの場所打ち鉄筋コンクリート杭への活用, 基礎工, Vol.32, No.7, pp.27-30, 2004.7
- 10) 渡部憲:再生細骨材を使用した高靱性セメント複合材料, 東海大学紀要工学部, Vol.45, No.2, pp.131-137, 2006.4
- 11) 渡部憲, 浅井陽一, 富田健太郎, 加藤雄介:高靱性セメント複合材料を用いた杭根固め部の力学特性について, 東海大学紀要工学部, Vol.47, No.1, pp.61-66, 2007.9
- 12) 土木学会:コンクリート標準示方書 [規準編] 平成 11 年度版, JSCE-G552 繊維補強コンクリートの曲げ強度及び曲げタフネス試験方法, pp.217-219
- 13) 渡部憲, 大岡督尚, 白井伸明, 森泉和人:各種コンクリートの圧縮軟化挙動, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.22, No.2, 2000.6
- 14) JCI 規準:切欠きはりをを用いたコンクリートの破壊エネルギー試験方法(JCI-S-001-2003), コンクリート工学協会, 14pp., 2003
- 15) 大岡督尚, 橋高義典, 渡部憲:コンクリートの破壊パラメータに及ぼす短繊維混入および材齢の影響, 日本建築学会構造系論文集, No.529, pp.1-6, 2000.3
- 16) JCI 規準:繊維補強セメント複合材料の曲げモーメント—曲率曲線試験方法(JCI-S-003-2005), コンクリート工学協会, 7pp., 2005
- 17) DIANA Foundation Expertise Center for Computational Mechanics (DIANA version-8): DIANA Finite Element Analysis Users Manual, TNO Building and Construction Research.