

論文 再生骨材を用いたコンクリートを充填した鋼管柱の軸圧縮性状

今野克幸^{*1}・佐藤靖彦^{*2}・角田與史雄^{*3}・大平雅司^{*4}

要旨: 本研究において、再生骨材を用いたコンクリート充填鋼管柱の軸圧縮特性を実験及び解析的に検討した。すなわち、再生骨材を用いたコンクリートは、普通骨材を用いたコンクリートに比べ、内部の損傷（破壊）速度がより大きく、このため、部材剛性及び終局耐力が若干低下するが、実用に耐えうる性能を有していることを明らかにした。

キーワード: 鋼管柱, 再生骨材, 有限要素解析, 破壊パラメータ

1.はじめに

近年、老朽化した構造物等の解体により排出されるコンクリート塊の再利用に関する活動が積極的に進められている。コンクリート塊のリサイクルの適用箇所は路盤材が主たるものであり、コンクリートへの適用例は極めて少ない。この理由の一つとして、普通骨材を用いた場合に比べ凍結融解抵抗性が劣ることが挙げられる。北海道のような寒冷地における使用にあっては、凍結融解に対する何らかの配慮が必要となる。すなわち、再生骨材の製造方法を高度化することによりその品質を改善することや、凍結融解が問題とならない構造や部位へ適用すること等を考える必要がある。

著者らは、再生骨材を使用したコンクリート（以下、「再生骨材コンクリート」）を凍結融解の影響が少ないと考えられる鋼管柱の充填材への適用を考え、ここに、その軸圧縮特性を実験及び解析的に検討を行った結果を報告する。

表1 再生骨材の諸特性

Aggregate	fineness modulus	specific gravity	water content(%)	f_{c1}' (MPa)	f_{c2}' (MPa)
A (Recycled)	6.92	2.41	9.53	29	35
B (Recycled)	6.97	2.41	6.24	35	41
C (Recycled)	7.09	2.36	7.53	44	53
N (Normal)	6.87	2.75	1.33	—	—

2. 実験概要

2.1 使用材料

本実験では、3種類の再生骨材と1種類の普通骨材を用い合計4体のコンクリート充填鋼管柱を作製した。3種類の再生骨材は、再生骨材を用意するために作製したコンクリート（以下「原

f_{c1}' : compressive strength of original concrete when it was crushed
 f_{c2}' : compressive strength of original concrete when recycled concrete was cast

コンクリート」）の圧縮強度が異なるものである。表1は使用骨材の諸特性を示す。なお、再生骨材の作製には、ジョークラッシャを有する移動式コンクリート破砕機を用いた。破砕されたコンクリート塊の大きさは最大40mmで作製されており、その内5~25mmのコンクリート塊を粗骨材として使用した。その粒度分布は、土木学会の標準[1]を満足しており、再生骨材は普通骨材に比べて比重が小さく、含水率が大きかった。鋼管に充填するコンクリートを構成する骨材以外の材料は、すべての供試体で同一である。各供試体の諸元及び耐力は表2に示されている。なお、セメントには早強ポルトランドセメントを用いている。

*1 函館工業高等専門学校助手 環境都市工学科, 博士(工学) (正会員)

*2 北海道大学大学院助手 工学研究科社会基盤工学専攻, 博士(工学) (正会員)

*3 北海道大学大学院教授 工学研究科社会基盤工学専攻, 工博 (正会員)

*4 ドーピー建設工業(株) 本社技術部, (正会員)

2.2 実験供試体及び実験方法

4体の実験供試体の諸元を表2に示す。供試体RAは粗骨材として再生骨材Aを、供試体RBは再生骨材Bを、供試体RCは再生骨材Cを使用したものである。また、供試体Nは普通骨材を使用したものである。なお配合は、全ての供試体で水セメント比48%、細骨材率42%と一定としている。なお、表2の圧縮強度は、試験時の円柱供試体の一軸圧縮強度を表している。

使用した鋼管は、その内径が200mm、肉厚3mm、高さ400mmである(図1参照)。鋼管の表面には、軸方向と軸直角方向の歪みを測定するために2軸ゲージを6ヶ所に貼付した。充填されたコンクリートの軸方向歪みを測定するために、モールドゲージを3個埋め込んだ。それらの貼付位置は図1に示されている。また、鋼管の軸方向変形量を変位計により測定している。鋼管試験片の引張試験結果より得られた応力-歪み曲線は図2に示すとおりである。

荷重は、単調に約50kNの間隔で増加させ供試体を破壊に至らしめた。その際、荷重がコンクリートにのみかかるように直径が197mm、厚さが50mmの鋼製円盤を載荷板として供試体の上下に設置した。また、載荷板と供試体間の摩擦を減らすために2枚のテフロンシートをそれぞれに敷いた。

表2 実験供試体の諸元及び耐力

Specimen	Slump (cm)	Compressive strength (MPa)	Ultimate Load (kN)
RA	10	30	1725
RB	2.5	38	2145
RC	18	30	1795
N	5.5	35	2175

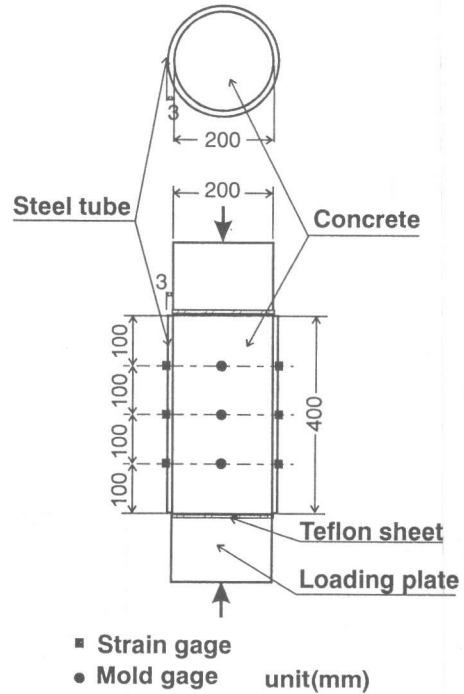


図1 実験供試体図

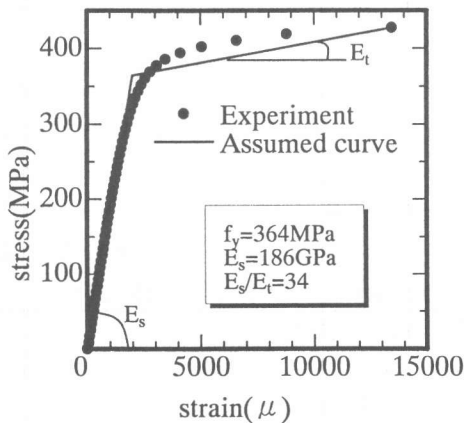


図2 鋼材の応力-歪み関係

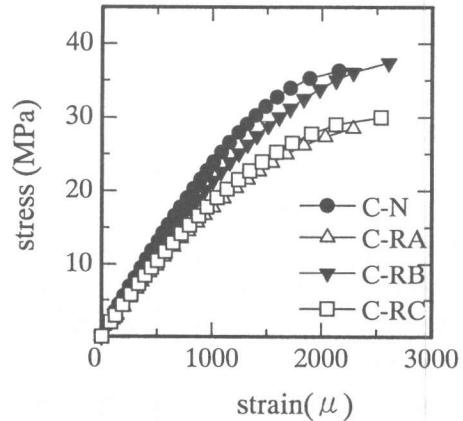


図3 一軸圧縮応力-歪み関係

3. 実験結果及び考察

3.1 再生骨材コンクリートの一軸圧縮応力と歪みとの関係

図 3 は、供試体 RA, RB, RC, および N の鋼管柱に充填したコンクリート（以下、それぞれのコンクリートを C-RA, C-RB, C-RC 及び C-N とする）の一軸圧縮試験結果を示す。供試体 C-RA と C-RC は原コンクリートの圧縮強度が鋼管内にコンクリートを打設したときにはそれぞれ 35MPa, 53MPa（表 1 参照）と大きく異なるが、水セメント比を等しくして再生骨材コンクリートを作製した場合、それらの圧縮強度は約 30MPa で等しく（表 2 参照）、本実験の範囲では、再生骨材コンクリートの圧縮強度は原コンクリートの圧縮強度に依存しない結果となった。本実験において目標としたスランプ値は 8cm であったが、再生骨材の吸水率が大きく、その表面水率のばらつきが大きかったために、各供試体でスランプ値に大きな差異があらわれた。供試体 C-N と C-RB の圧縮強度は概ね等しいが、その剛性は再生骨材を用いた供試体 C-RB の方が小さい。この理由として、内部構造及び破壊機構の相違、すなわち、再生骨材のモルタル部分が多く気泡を有していることとともに、付着破壊を起こす可能性がある界面（モルタルと再生骨材間、及び再生骨材内部自体のモルタルと原骨材間）が普通骨材を用いた場合よりも多いといったことが考えられる。

3.2 コンクリート充填鋼管柱の軸圧縮特性

(1) 荷重-歪み関係

図 4 は全供試体の荷重と歪みとの関係を示す。普通骨材を用いた供試体 RB は、充填したコンクリートの圧縮強度が普通骨材を用いた供試体 N よりも若干大きい、充填鋼管柱としての終局付近の剛性及び耐力は供試体 N よりも小さい。また、供試体 RA 及び RC は、供試体 N よりも小さな荷重で剛性が大きく低下していることが明らかである。

(2) 軸圧縮耐力

図 5 は、拘束コンクリートの圧縮強度（終局耐力を載荷面積で除した値）と充填したコンクリート自体の一軸圧縮強度との関係を示す。拘束コンクリートの圧縮強度は、一軸圧縮強度が大きいほど大きくなる傾向にある。また、普通骨材を用いた供試体 N の終局強度は、再生骨材を用いたものよりも若干大きい。図中の実線は、CEB 式 [2] により求めた値を示すが、本実験結果をすべて安全側に評価していることが明らかである。なお、本実験供試体は、全て鋼管降伏後に破壊していた。

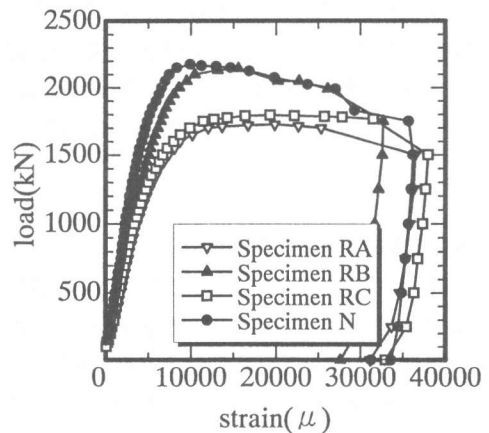


図 4 荷重-歪み関係

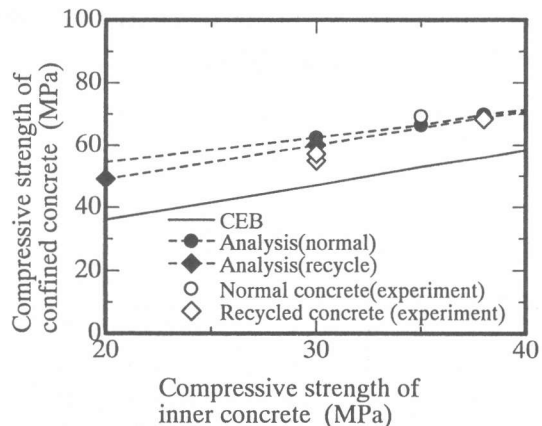


図 5 拘束コンクリートの圧縮強度と充填コンクリートの圧縮強度との関係

4. 有限要素解析による評価

4.1 解析概要

ここで、非線形有限要素解析による本実験結果の評価を試みる。本研究では、鉄筋コンクリート構造の平面応力問題用の二次元非線形有限要素解析プログラム WCOMR [3] を軸対称問題用に修正したものにコンクリートの三次元構成則である三次元弾塑性破壊モデル [4~6] を導入し、これを用いた。三次元弾塑性破壊モデルにおいてはコンクリートの材料非線形性は塑性と破壊で表されている。本研究では再生骨材コンクリートが普通コンクリートより強度が低下する主要因が、破壊の進展する速度の違いにあると考え、破壊パラメータ [4] の修正を行い、再生骨材コンクリート充填鋼管柱に対して有限要素解析を行うこととした。

解析に用いた応力-歪み曲線は鋼管試験片の引張試験結果に基づき、バイリニア型に仮定した(図 2 参照)。なお、鋼材の降伏点、弾性係数及び硬化係数をそれぞれ $f_y=364\text{MPa}$, $E_s=186\text{GPa}$, $E_s/E_c=34$ として解析に用いた。

4.2 破壊パラメータの修正

先に述べたように、剛性の低下は破壊の進行速度が普通骨材を用いた場合とは異なるものと考え、式 1 に示した 3 次元弾塑性破壊モデルにおける破壊パラメータ K の材料定数を修正することとした。式(1)の F は等価歪み、 a と b は材料定数を表している。この場合どの程度低減させるかの判断を、実験供試体 RB との比較により決定するものとした。すなわち、解析と実験の耐力が概ね等しくなる時の材料定数を決定した(図 6)。オリジナルの材料定数(a, b)の値が(3.25, 0.8)であり、その修正値は(0.29, 0.1)である。修正した等価歪みと破壊パラメータとの関係をオリジナルの値とともに図 7 に示す。

$$K = \exp\left[-\frac{F}{a}\left\{1 - \exp\left(-\frac{F}{b}\right)\right\}\right] \quad (1)$$

表 3 有限要素解析結果

Specimen	f_c^{*1} (MPa)	P_{u-FEM}^{*2} (kN)	P_{u-exp}^{*3} (kN)	$\frac{P_{u-exp}}{P_{u-FEM}}$
N	35	2303	2175	0.94
NA	30	2139	—	—
NB	38	2401	—	—
RA	30	1987	1725	0.87
RB	38	2245	2145	0.96
RC	30	1987	1795	0.90
RD	20	1661	—	—

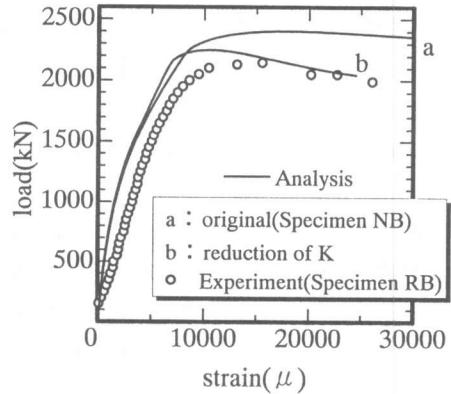


図 6 荷重-歪み関係 (供試体 RB)

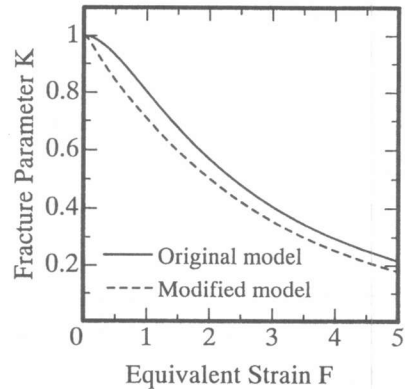


図 7 破壊パラメータと等価歪みとの関係

*1 compressive strength of inner concrete

*2 ultimate load (analysis)

*3 ultimate load (experiment)

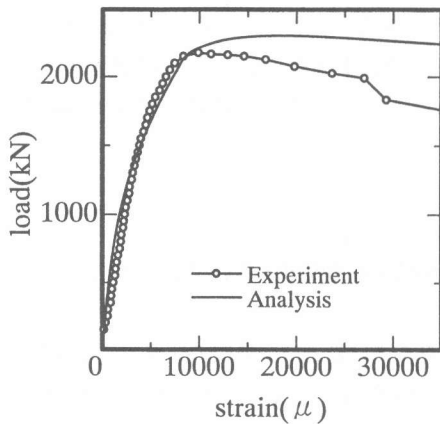


図8 荷重-軸歪み関係 (供試体 N)

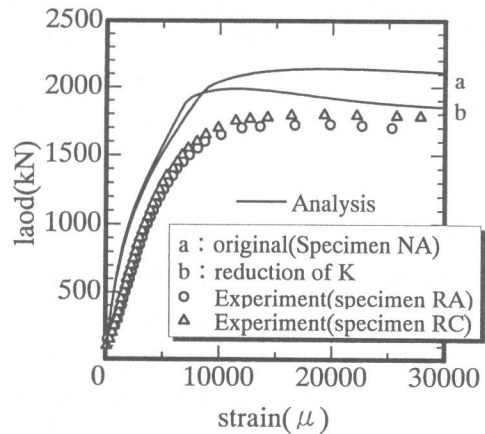


図9 荷重-軸歪み関係 (供試体 RA・RC)

4.3 解析結果

本研究では、実験供試体 N, RA, RB, RC とともに、比較のため新たに 3 体の解析供試体 (NA, NB, RD) を用意した (表3 参照)。

図8 は供試体 N, 図9 は供試体 RA と RC の荷重と軸方向歪みとの関係を示す。なお、歪みは軸圧縮変位を供試体の長さで除した平均歪みとして表している。なお、供試体 RA と RC は充填コンクリートの圧縮強度が等しいため、それらの解析供試体は同一のものとなる。

これらの結果より、本解析は実験により得られた耐力を概ね評価できているといえる。

図10 は荷重と鋼管表面の歪みの関係を供試体 RA の実験値と解析値および供試体 NA の解析値について鋼管降伏時まで示している。

なお、図の第一象限は周方向の歪みを、第二象限は軸方向の歪みを示す。実験値は歪みゲージにより測定された全ての値の平均値で、解析値は歪みゲージ貼付位置に相当する箇所 Gauss point における歪みの平均値である。供試体 RA においては、荷重がおよそ 1100kN まで解析と実験の歪み性状が概ね一致しているが、それ以降、実験値において大きな剛性の低下が見られる。これより、実験値は解析値に比べて軸圧縮力を受けたときの横方向への膨張が大きく、鋼管により大きな歪みを生じさせているといえる。すなわち、実験値は解析値に比べて破壊の進行割合が大きいため膨張がより大きく、その結果として鋼管の降伏が早まり終局耐力が低下するものと考えられる。本解析においては、その影響を考慮すべく破壊パラメータの修正を行ったが、修正しない場合(供試体 NA)と修正した場合(供試体 RA)とでは大きな差異は現れなかった。

先に示した図5 には、本解析により得られた結果が示されている。有限要素解析における拘束コン

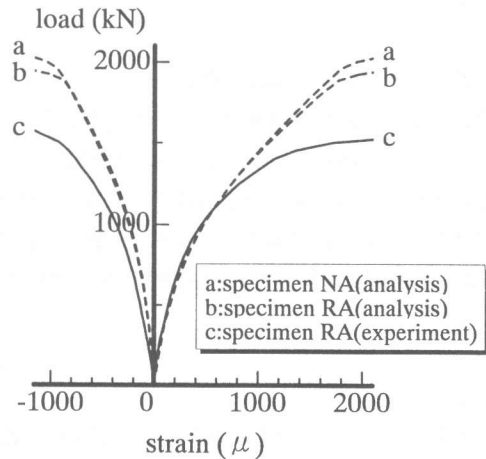


図10 荷重-鋼管歪み関係

クリートの強度は表 3 に示される各解析供試体の終局耐力をコンクリートの断面積で除して求めた。

再生骨材コンクリート充填鋼管柱の実験結果及び解析結果から、充填したコンクリートの強度が 40MPa 程度より小さい範囲では、拘束コンクリートの強度は、普通コンクリートを用いた場合の強度より小さく、実験結果と同様な傾向にある。しかし、検証データは少なく、本解析の妥当性を確認できるまでには至っていない。今後は、実験データを増やすとともに、より詳細な解析的な検討が必要である。

5. まとめ

- 1) 再生骨材コンクリートの剛性は普通骨材コンクリートの剛性よりも幾分小さい。またこのことは、鋼管柱に充填した場合にも言える。
- 2) 再生骨材コンクリートの耐力が普通骨材コンクリートより小さいことは、破壊の進展する速度が大きいと考えることにより理解できる。剛性が小さいことは横方向への膨張が大きいことを意味しており、これは、鋼管により大きな歪みを生じることとなる。すなわち、軸圧縮耐力の低下は、鋼管の降伏が早い段階に起こることに起因する。
- 3) 今回検討を行った充填するコンクリートの圧縮強度がおおよそ 40MPa 以下であれば充填鋼管柱の耐力は、普通骨材コンクリートを充填した場合と同様に CEB 式によって安全側に評価することができる。

謝辞：原コンクリートの製作にあたり、日本高圧コンクリート株式会社 秦滋康氏に、再生骨材の作成にあたっては、角山開発株式会社 寺島忠夫氏、北海道大学大学院 故藤掛寿士氏に、実験を行うにあたっては元北海道大学工学部学生 小野正弘氏に多大な助力を賜りました。また、本論文を作成するにあたっては北海道大学助教授 上田多門博士に貴重な助言を賜りました。ここに厚く御礼申し上げます。さらに、本研究は、平成 8 年度文部省科学研究費補助金(基盤研究 A(1)・課題番号：07305053・研究代表者：東京大学教授 岡村甫)の助成を受けて行ったものであり、ここに深く謝意を表します。

参考文献

- [1] 土木学会：コンクリート標準示方書「施工編，舗装・ダム編」，平成 8 年
- [2] CEB-FIP：CEB-FIP MODEL CODE 1990，MAY 1993.
- [3] Ueda, T., Nares Pantaratorn and Sato. Y. : Finite Element Analysis on Shear Resisting Mechanism of Concrete Beams with Shear Reinforcement, 土木学会論文集, No.520/V-28, pp.273~286, 1995 年 8 月
- [4] Maekawa, K. , Takemura, J. , Irawan, P. , and Irie, M. : Continuum fracture in concrete nonlinearity under triaxial confinement, Journal of Materials, Concrete Structures and Pavements, No.460/V-18, pp.113~122, February 1993.
- [5] Maekawa, K. , Takemura, J. , Irawan, P. , and Irie, M. : Plasticity in concrete nonlinearity under triaxial confinement, Journal of Materials, Concrete Structures and Pavements, Vol.18, No.460, pp.123~130, February 1993.
- [6] Maekawa, K. , Takemura, J. , Irawan, P. , and Irie, M. : Triaxial elasto-plastic and fracture model for concrete, Journal of Materials, Concrete Structures and Pavements, Vol.18, No.460, pp.131~138,