

# 論文 横方向拘束を受ける再生骨材コンクリートの力学的特性について

今野克幸<sup>\*1</sup>・佐藤靖彦<sup>\*2</sup>・上田多門<sup>\*3</sup>・翁長昌章<sup>\*4</sup>

要旨：本研究では、再生骨材コンクリートの力学的特性として拘束下における強度および変形性能を把握することを目的としている。充填するコンクリートの一軸圧縮強度の変化にもなうコンクリート充填鋼管柱の変形性状は再生骨材コンクリートを用いた場合も普通骨材コンクリートを用いた場合と同様であることを明らかにした。また、再生骨材コンクリートのヤング係数は普通骨材コンクリートに比較して小さいことを考慮すれば、再生骨材コンクリート充填鋼管柱の剛性を概ね推定できることを示したが、強度の推定にはポアソン比と相關がある弾塑性域での体積膨張を考慮することが重要であることを示した。

キーワード：再生骨材コンクリート、ヤング係数、圧縮剛性、拘束コンクリートの強度

## 1. はじめに

著者らは、再生骨材コンクリートを鋼管柱の充填材として用いるために、再生骨材コンクリートを充填した鋼管柱(以後、再生骨材コンクリート充填鋼管柱)の軸圧縮試験を行ってきた<sup>1),2),3)</sup>。文献3では、再生骨材コンクリート充填鋼管柱の軸圧縮耐力は充填するコンクリートの一軸圧縮強度が等しければ普通コンクリートを充填した鋼管柱と概ね等しい終局耐力が得られることが示された。しかしながら、充填するコンクリートの圧縮強度による拘束コンクリートの変形能力の違いについての検討が不十分であった。本論では著者らがこれまでにを行った実験結果<sup>2),3)</sup>にさらなる検討を加え、拘束コンクリートの強度増加と変形能力について再生骨材コンクリートと普通骨材コンクリートの比較検討を行った。

## 2. 実験概要

Table1 と Table2 はそれぞれ普通コンクリートを充填した鋼管柱(以後、普通コンクリート充填鋼管柱)と再生骨材コンクリート充填鋼管柱の材

料特性値を示している。表中の記号 $f_y$ は鋼材の降伏点である。鋼管は降伏点の異なる二種類が用いられた。再生骨材の特性値は Table3 に示すとおりで表中の $f_{co}$ は再生骨材コンクリート製作時の原コンクリートの圧縮強度を表している。再生骨材コンクリートは、普通骨材 N を用いて圧縮強度の異なる三種類の原コンクリート(Table3 参照)を製作しジョークラッシャーを有する移動式コンクリート破砕機によって破砕し作製された。また、普通コンクリート充填鋼管柱製作時に用いた粗骨材は再生骨材コンクリートの原骨材と同じ骨材を用いている。コンクリート充填鋼管柱の供試体の形状および寸法は Fig.1 に示すとおりで鋼管表面に二軸の歪みゲージを貼付し

Table 1 Material property of normal concrete column encased by steel tube

Specimen	Concrete		Steel	
	$f_c'$ (MPa)	$f_y$ (MPa)	$E_s$ (Gpa)	$\nu$
N0	35.0	364	186	0.30
NA	21.4	408	211	0.26
NB	35.2	408	211	0.26
NC	47.9	408	211	0.26

\*1 函館工業高等専門学校助手 環境都市工学科 工博(正会員)

\*2 北海道大学大学院助手 工学研究科 工博(正会員)

\*3 北海道大学大学院助教授 工学研究科 工博(正会員)

\*4 北海道大学工学部 土木工学科

Table 2 Material property of recycled concrete column encased by steel tube

Specimen	Concrete		Steel			Kind of recycled aggregate
	$f'_c$ (MPa)	$E_c$ (GPa)	$f_y$ (MPa)	$E_s$ (GPa)	$\nu$	
RA	30.0	19.9	364	186	0.30	A
RB	38.0	23.6	364	186	0.30	B
RC	30.0	21.0	364	186	0.30	C
RD	26.0	—	364	186	0.30	A
RE	47.9	24.4	408	211	0.26	A
RF	17.2	21.6	408	211	0.26	A

Table 3 Property of aggregate

Aggregate	Fineness modulus	Gravity	Percentage of water absorption (%)	$f_{co}$ (MPa)	Content of mortar (%)
A(recycled)	6.92	2.41	9.53	29	53
B(recycled)	6.97	2.41	6.24	35	54
C(recycled)	7.09	2.36	7.53	44	56
N(normal)	6.87	2.75	1.33	—	—

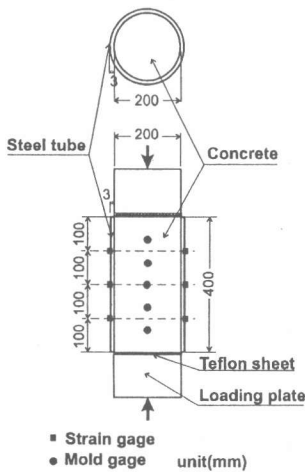


Fig.1 Specimen of concrete column encased by steel tube

鋼管表面の柱軸方向と周方向の歪みを測定し、コンクリート内部にはモールドゲージを埋め込みコンクリートの柱軸方向の歪みを測定した。また、供試体の軸方向変位量を変位計により測定している。なお、鋼管内面には二硫化モリブデン入りグリースを塗布し鋼管とコンクリートの付着を低減させた。

荷重は、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 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厚さ 0.1mm のテフロンシート 2 枚をそれぞれに敷いた。なお、著者らの行った実験により、本研究で用いた再生骨材の種類によらず、再生骨材コンクリートの力学的特性に明確な差が現れなかった。よって、本論では、粗骨材の種類を再生骨材と普通骨材に分類し考察を行う。

### 3. 実験結果と考察

#### 3.1 コンクリートの圧縮強度とヤング係数について

Fig.2 は供試体 N0 と供試体 RB の圧縮強度試験に用いたシリンダーの応力歪み曲線である。再生骨材コンクリートである供試体 RB のシリンダーの方が圧縮強度は高いがヤング係数は普通骨材コンクリートより小さく、最大圧縮応力時の歪みは普通骨材コンクリートより大きいことが示されており、再生骨材コンクリートの方が普通骨材コンクリートより変形が大きい。

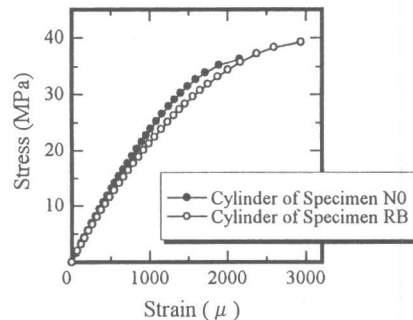


Fig.2 Stress strain of cylinder test

Fig.3 は Table2 に示した再生骨材コンクリートの一軸圧縮強度とヤング係数の関係を示している。図中の実線で示されているのは土木学会標準示方書に示されている普通コンクリートの圧縮強度とヤング係数の関係<sup>4)</sup>である。再生骨材コンクリートは普通骨材コンクリートに比較してヤング係数が低下することが報告されている<sup>5)</sup>とあり、本実験結果においてもその傾向は見られ

さらに本研究の実験結果においてはコンクリートの圧縮強度が高くなるほど普通骨材コンクリートと再生骨材コンクリートのヤング係数の差が大きくなる結果が得られた。

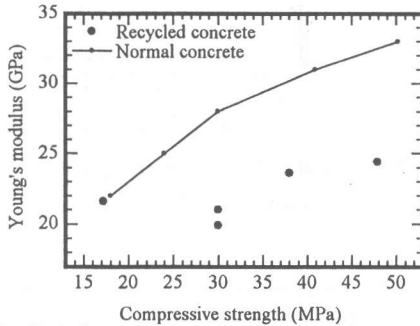


Fig.3 Relation of uniaxial compressive strength and Young's modulus

### 3.2 コンクリート充填鋼管柱の強度と剛性

Fig.4 は同じ鋼材が用いられコンクリートの一軸圧縮強度が異なる供試体 NA, NB, NC の荷重-変位関係を示している。この図より、コンクリート強度が低い場合は剛性の低下が緩やかでコンクリート強度が高い場合は荷重の低下が比較的急に生じることが確認された。Table4 は各供試体のコンクリートの一軸圧縮強度、拘束コンクリートの鋼管降伏時と終局時の荷重および鋼管降伏時と終局時の拘束コンクリートの圧縮応力度を示している。なお、この表における拘束コンクリートの圧縮強度は荷重を拘束コンク

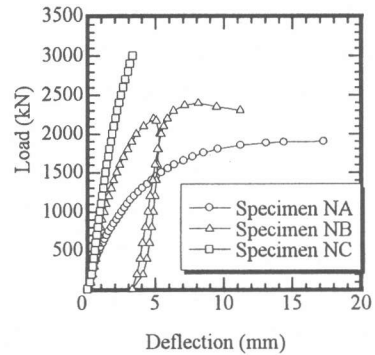


Fig.4 Load deflection curve of normal concrete column encased by steel tube

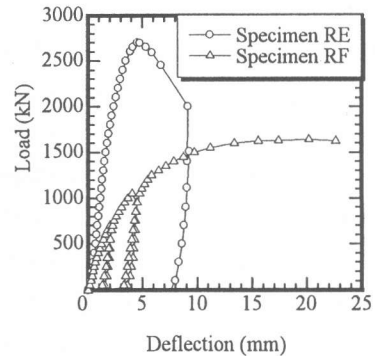


Fig.5 Load deflection curve of recycled concrete column encased by steel tube

リート断面積で除した値である。また、供試体 NC の終局強度は試験機的能力を超え測定不能であったため、測定された最大値を示した。

Table4 より、供試体 NA(円柱供試体圧縮強度

Table 4 Compressive strength of concrete

Specimen	Uniaxial compressive strength (MPa)	Strength of column when steel tube yield (kN)	Ultimate strength (kN)	Compressive strength of confined concrete when steel tube yield (MPa)	Compressive strength of confined concrete at ultimate state (MPa)
N0	35.0	2000	2175	63.7	69.2
NA	21.4	1200	1900	38.2	60.5
NB	35.2	1970	2395	62.7	76.2
NC	47.9	2830	3000	90.1	95.5
RA	30.0	1550	1725	49.3	54.9
RB	38.0	2000	2145	63.7	68.3
RC	30.0	1600	1795	50.9	57.1
RD	26.0	1580	2090	50.3	66.5
RE	47.9	2500	2800	79.6	89.1
RF	17.2	1050	1690	33.4	53.8

21.4MPa), NB(35.2MPa), NC(47.9MPa)のそれぞれの鋼管降伏時の応力度は 38.2MPa, 62.7MPa, 90.1MPa であり, 終局時の応力度は供試体 NA, NB, NC についてそれぞれ 60.5MPa, 76.2MPa, 95.5MPa 超(試験機の能力を超え測定不能であった)と一軸圧縮強度が大きいほど強度増加が大きく, 鋼管降伏後の強度上昇が小さいことが確認された. Fig.5 は Fig.4 と同様に同じ鋼材が用いられ充填コンクリートの強度が大きく異なる場合の再生骨材コンクリート充填鋼管柱の供試体 RE と RF の荷重-変位曲線を示している. この図と Table4 より, 再生骨材コンクリート充填鋼管柱においても充填したコンクリートの強度が低い場合には剛性の低下が緩やかで鋼管降伏後に強度が上昇した後, 終局に至る結果が得られた. また, 高強度のコンクリートを充填した鋼管柱は鋼管降伏後の荷重の低下が比較的急で終局状態までの強度の上昇が小さい結果が得られた. これらの結果より, 充填するコンクリートの強度の違いによる変形性状の違いは再生骨材コンクリート充填鋼管柱も普通骨材コンクリートを充填した場合と同様の傾向が見られる結果が得られた.

Fig.6 は同じ鋼材が用いられ, 充填したコンクリートの一軸圧縮強度に近い値をもつ普通骨材コンクリート充填鋼管柱の供試体 N0 と再生骨材コンクリート充填鋼管柱の供試体 RB の荷重変位曲線である. この図より, 充填されるコンクリートの一軸圧縮強度が等しければ終局強度に大きな差は見られないが, 再生骨材コンクリートを用いた方が剛性は低いことが明らかになった.

Fig.7 は Table4 に示した充填したコンクリートの一軸圧縮強度と終局時の拘束コンクリートの圧縮強度をプロットしたものである. 本研究では Table1 と Table2 に示すとおり降伏点の異なる二種類の鋼管を用いているため, Fig.7a には降伏点が 364MPa の供試体 N0, RA, RB, RC と RD の結果を示し, Fig.7b には降伏点が 408MPa の供試体 NA, NB, NC, RE と RF の結果を示している. Fig.7a は普通骨材コンクリート充填鋼

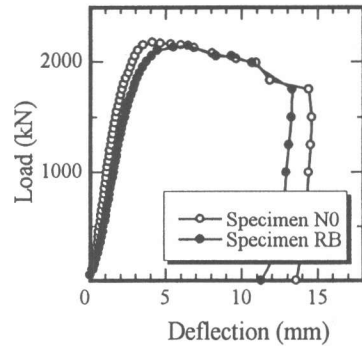


Fig.6 Load deflection curve of Specimen N 0 and RB

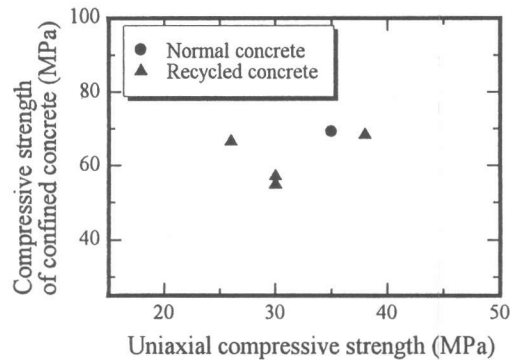


Fig.7a Strength gain of confined concrete

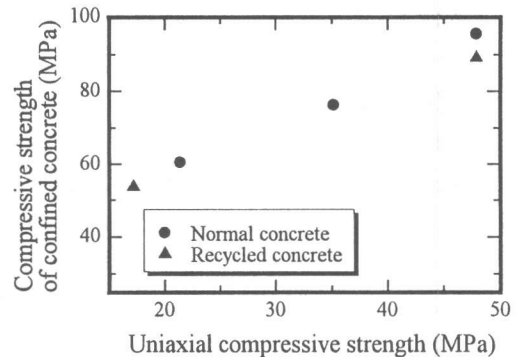


Fig.7b Strength gain of confined concrete

管柱は N0 の実験結果一つであるが, 再生骨材コンクリート充填鋼管柱の耐力が特に劣るような結果とはいえない. さらに, Fig.7b に関しては一軸圧縮強度と拘束コンクリートの圧縮強度の関係に普通骨材コンクリートと再生骨材コンクリートの差はほとんど見られない. したがって,

これらの実験結果からはコンクリート充填鋼管柱の充填材として再生骨材コンクリートを用いた場合においても普通骨材コンクリートを用いた場合とほぼ同程度の終局耐力が得られると考えられる。

#### 4. 有限要素解析による検討

以上のように、著者らがこれまでに行ってきた実験結果をまとめると再生骨材コンクリート充填鋼管柱は普通骨材コンクリート充填鋼管柱と同程度の終局耐力が得られることが示されたが、剛性の差が明確に現れた。本節では軸対称問題に拡張された有限要素解析プログラム WCOMR<sup>9)</sup> に三次元弾塑性破壊構成則<sup>7),8)</sup>を導入したものを用いて、充填するコンクリートのヤング係数とポアソン比の変化に伴うコンクリート充填鋼管柱の強度と変形について考察を行う。

Fig.8 は普通骨材コンクリート充填鋼管柱の供試体 NB の荷重-変位曲線を示している。図中の実線は供試体 NB の解析値を、破線は供試体 NB の解析入力データにおけるコンクリートの材料特性値を変化させたものである。解析供試体 NB のコンクリートの材料特性値は Table5 に示すとおりである。コンクリートの圧縮強度は Table1 に示した一軸圧縮強度試験の結果から 35.2MPa を用い、ヤング係数とポアソン比はそれぞれ 29.5GPa と 0.20 を仮定した。解析供試体 NB1 はヤング係数を Fig.3 に示した圧縮強度とヤング係数の関係を参考に 22GPa と低減させたものである。解析供試体 NB の荷重-変位曲線は実験値よりやや剛性が大きいが終局耐力は実験値に概ね等しい。解析供試体 NB1 はヤング係数を低減させたため解析上剛性が若干低下したが耐力は若干上昇する結果となった。解析供試体 NB2 はヤング係数を 22GPa と低減させ、ポアソン比を 0.22 としたものである。この結果、剛性も低下し終局耐力もヤング係数のみを低減させた NB1 より低下した。

Fig.9 は供試体 RB の荷重-変位曲線を示している。解析供試体 RB1 のコンクリートの材料特

性値は Table5 に示すとおりポアソン比を普通コンクリートと同程度の 0.20 としたもので、解析供試体 RB2 は Fig.8 で示した解析結果を参考にポアソン比を 0.22 と仮定した場合である。図より解析供試体の剛性は実験よりやや大きい程度で、これは普通骨材コンクリートを解析した場合と同様である。また、ポアソン比を 0.22 と仮定したことにより耐力も実験値に近づくことが本解析によって示された。なお、適用した構成則<sup>8)</sup>では、弾性域のポアソン比が大きくなると弾塑性域の体積膨張が大きくなる。

Table 5 Material property of analytical specimen

Specimen	$f'_c$ (Mpa)	$E_c$ (Gpa)	Poisson's ratio
NB	35.2	29.5	0.20
NB1	35.2	22.0	0.20
NB2	35.2	22.0	0.22
RB1	38.0	23.6	0.20
RB2	38.0	23.6	0.22

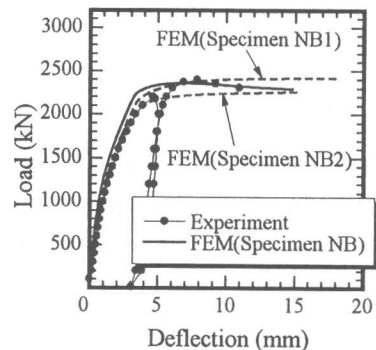


Fig.8 Load deflection curve of specimen NB

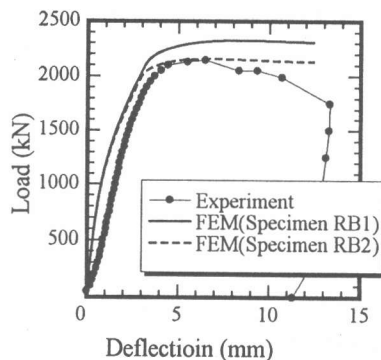


Fig.9 Load deflection curve of specimen RB

以上の解析的検討より、ヤング係数の差異は

コンクリート充填鋼管柱の剛性や耐力にあまり大きな影響を与えないことが推測された。このことは Fig.3 と Fig.7 に示すように、再生骨材コンクリートが普通骨材コンクリートよりヤング係数が小さいにもかかわらずコンクリート充填鋼管柱の耐力がほとんど変わらないことと符合する。しかし、弾塑性域の体積膨張は、コンクリート充填鋼管柱の耐力に影響を与えることが推測された。

## 5. まとめ

以上本研究により明らかになったことを以下に示す。

- 1) 一軸圧縮強度とヤング係数の関係に関して、再生骨材コンクリートのヤング係数は圧縮強度が高くなるほど普通骨材コンクリートのヤング係数より小さくなる実験結果が得られた。
- 2) 充填するコンクリートの圧縮強度の変化にともなうコンクリート充填鋼管柱の変形性状の違いは再生骨材コンクリートを用いた場合にも普通骨材コンクリートを用いた場合と同様であることが明らかとなった。
- 3) 再生骨材コンクリート充填鋼管柱の終局耐力は普通骨材コンクリート充填鋼管柱と概ね等しいが、再生骨材コンクリート充填鋼管柱の方が剛性が小さい。
- 4) ヤング係数は拘束コンクリートの強度増加にあまり影響は与えないが、弾塑性域での体積膨張の与える影響が大きいことが解析上示された。再生骨材コンクリート充填鋼管柱の耐力を推定する上でポアソン比に相関のある弾塑性域での体積膨張を正しく評価することが重要であることが示された。

謝辞：本研究を行うにあたり、ドービー建設工業株式会社の方々に御助力を賜りました。ここに、謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 今野克幸, 佐藤靖彦, 角田與史雄, 大平雅

司：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, コンクリート工学年次論文報告集, 第19巻第2号, pp.1443~1448, 1997.6

- 2) 小野正弘, 佐藤靖彦, 上田多門, 角田與史雄：再生骨材を用いたコンクリート充填鋼管柱における軸圧縮特性について, 土木学会北海道支部論文報告集, 1997.2, pp.534~539
- 3) 翁長昌章, 今野克幸, 佐藤靖彦, 今村晃久, 角田與史雄：再生骨材を用いたコンクリート充填鋼管柱の力学的特性について, 土木学会北海道支部論文報告集, 1998.2
- 4) コンクリート標準示方書[設計編]：土木学会
- 5) 南波篤志, 阿部道彦, 棚野博之, 前田弘美：再生コンクリートの品質改善に関する実験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.17, No.2, pp.65~70, 1995.6
- 6) 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, 1995.8
- 7) 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
- 8) 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
- 9) 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, February 1993