

低環境負荷な鋼コンクリート合成部材を用いた耐震補強に関する実験的研究

鹿島 政重¹、河本 裕行²

^{1, 2} 福岡建設専門学校

再生粗骨材 L を構造部材に適用させることを目的として、コンクリート充填鋼管部材の中心圧縮実験を行った。再生コンクリートを鋼管に充填することで、一般的に弱点と考えられる強度・剛性を鋼材に期待し、耐久性は、被覆鋼管が外的因子から遮断させる効果を発揮させる。その結果、普通コンクリートと同等の耐力を発揮し、剛性も改善された。

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物は、耐震性・耐火性・耐久性に優れていることから、非常に多く建設工事で使用されてきた。特に、終戦後の日本国内では、高度成長の時代を迎え、住む場所の確保およびインフラ整備が最優先事項として大量に建設工事が行われた。スクラップアンドビルドにより、建設業も比例して成長していた。しかし、近年においては、資源の有効活用や省エネルギー政策、CO₂ 排出量の削減等、環境負荷低減型の時代にシフトし、建設業においてもリサイクル・リユース・リデュースをもとに資材の生産、施工が行われている。計画供用年数に達した構造物は、補強・修繕工事により長期的に供用されているが、最終的には解体される。

平成 12 年に制定され建設リサイクル法により、建設廃棄物の分別回収および再資源化が義務付けられている。平成 24 年度建設副産物実態調査¹⁾において、国内における建設廃棄物は増加傾向にあり、その内、「コンクリート塊」「アスファルト・コンクリート塊」が約 75%を占めている。さらに高度成長時代に建設されたコンクリート構造物が供用年数の更新を向かえ、増加することは必至である。廃コンクリートは、再資源化される割合が約 99%と高い水準を保っているが、その大半が再生クラッシャーランとして路盤材料等に用いられており、再生骨材を用いたコンクリートの利用実績は 2%に満たない現状にある。再生コンクリートとして利用されている中でも、そのほとんどが再生骨材 H である。再生骨材は、不純物やモルタル塊を含むことから、普通骨材に比べ、絶対密度が小さく吸水率が大きくなるため、高次処理法(加熱す

りもみ法など)により、高品質な再生骨材を製造している。しかし、高次処理を行う結果、製造装置や処理方法に多額のコストと膨大なエネルギーを費やすこととなり、かつ製造工程を増やすため時間と労力がかかる問題や、製造時に除去したモルタル塊の微粉処理における課題が残る。そのような問題等が、再生コンクリートの普及を阻害する一因であると考えられる。また、一般にフライアッシュ等の混和材と同様に、その性質に対する技術者の理解度が低く、有効活用への妨げになっているものと思われる。

福岡県においても、管理する 2m 以上の橋梁 4524 橋の内、約 60%が 1960 年代から 80 年代にかけて建設されており、中でも、RC 橋梁が約半分を占めている²⁾。また、八代海・有明海の海砂採取禁止等により、骨材の需給に関する問題が発生することは必至である。

再生骨材を最も有効に利用し、資源循環型の社会の形成には、製造によるエネルギーの低減、構造体へ適用できる再生コンクリートであることが必須の課題となる。再生骨材 M および再生骨材 L においては、製造エネルギーが小さい反面、再生骨材表面の付着モルタルやモルタル塊、プラスチックや木片、ガラス等の不純物が混入していることで、品質の安定性、使用箇所の制限を受けること、また、強度・耐久性が低下する可能性が高い等の問題点はあるものの、砕石や砂利のように山・川・海を掘削することがないため、環境保全につながることや、骨材からコンクリート製造一連の工程で CO₂ 排出量を低減できる特徴を有する。

既往の研究において、再生骨材 M および L

を用いたコンクリートを構造部材として検討している研究^{例えば 3)}においては、骨材置換法を用いて再生骨材と普通骨材を混合することにより、品質の低下を小さくする方法が多くみられる。また、一般的に生コン製造工場における JIS 認定においても同様である。著者らは、再生骨材 L を用いたコンクリートを対象に、2 軸強制練ミキサにより能動的に骨材に付着するモルタルが擦れ合い、品質が向上する「すりもみ効果」に期待し、簡易に再生コンクリートの性質を改善する手法について、どの程度品質が改善するか実験的に確認を行っている^{4)および 5)}。その中で、再生コンクリートの弾性係数が、普通コンクリートに比べ小さくなること、中性化の進行が大きくなる恐れがあることが課題となる。

再品質な再生骨材をコンクリートに適用できるか検討する上で、弾性係数の低下、中性化の進行抑制および不純物による品質変動に対応した構造形式として、コンクリート充填鋼管構造が考えられる。コンクリート充填鋼管構造は、鋼管の局部座屈変形が充填コンクリートによって拘束されるため、座屈による耐力低下が少ないこと、充填コンクリートは鋼管の拘束により圧縮強度および靱性が向上するため、高靱性が期待できる構造形式である。また、施工時にコンクリート用型枠が不要であることから、省人化・省力化構法として優れている構造として一般に普及している。

本研究では、再生骨材 L を用いたコンクリートを鋼管に充填することにより、耐震補強等の充填材として適用できないか実験的に検討を行った。

2. 研究の目的

再生コンクリートの弱点となる耐久性および剛性の低下などを抑制することを目的として、再生コンクリートを鋼管に充填させた構造部材の適用性について実験的に検討を行う。対象とする構造部材は、ブレースや方杖といった比較的小さな部材として圧縮性状を検討する。再生コンクリートを鋼管で覆うことで、中性化や塩害等の劣化に対する抵抗性の向上が期待できる。また、剛性の大きな鋼材に充填することにより、コンファインド効果によ

る強度上昇や変形性能の向上が期待できる。

3. 充填する再生コンクリートの検討

コンクリートを鋼管に充填する場合、RC 構造および SRC 構造とは異なり、配筋によるコンクリートの閉塞等の問題がないため、ある程度の流動性を有していれば施工上問題は発生しにくい。このことから、再生コンクリートのスランプ $Sl(cm)$ および水セメント比 $W/C(\%)$ は、2 軸強制練ミキサにより骨材が品質改善される上限を試験練により確認し、充填コンクリートの配合を決定する事とした。

3.1 使用材料の物性

骨材試験を行った結果を表 1 に示す。再生骨材の品質判定は、再生 H が JIS A 5021, 再生 M が JIS A 5022 (2012), 再生 L が JIS A 5023 (2012) に従い、骨材試験を行った結果について判定した。絶乾密度・吸水率・不純物量・微粒分量の 4 項目が指標となる。加えて、耐凍害性・すりへり減量に対する抵抗性が再生 H および M の指標に加わる。試験結果より、本研究に用いた粗骨材は吸水率が 5% を上回る結果より、再生 L と判定ができる。再生骨材に混入している不純物は、全量に対して 1.0% 程度であり、中でも、アスファルト塊およびタイル片が大半を占め、木片およびガラス片が少量混入していた。

コンクリートに使用した材料として、普通ポルトランドセメント(密度 $3.15g/cm^3$)、細骨材は玄界沖海砂、粗骨材は再生骨材の比較用に普通骨材(篠栗産かんらん岩碎石)を用いた。

表 1. 骨材の物性

骨材の種類	絶乾密度	吸水率	単位容積質量	F.M.
	g/cm^3	%	kg/L	
細骨材	2.53	1.60	1710	2.82
普通粗骨材	2.53	2.00	1560	6.55
再生粗骨材	2.45	2.30	1371	6.80

3.2 配合計画

再生骨材をミキサのすりもみ効果(図 1)によって改善する上で、練混ぜ時間により練混ぜ後の骨材品質が改善される結果⁵⁾より、モルタル練混ぜ 30 秒後に、再生骨材を投入し、

表 2. 配合一覧

シリーズ	粗骨材種別	スランプ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位水量 (kg/m ³)	質量(kg/m ³)		
							セメント	細骨材	粗骨材
スランプの影響を検討	再生L	3	4.5	55.0	45.0	148	269	835	973
		8				158	287	817	952
		18				181	330	669	901
	普通	3	4.5	55.0	45.0	148	269	835	1024
		8				158	287	817	1002
		18				181	330	669	949
水セメント比の影響を検討	再生L	18	4.5	45.0	45.0	189	420	633	853
				55.0		181	330	669	901
				65.0		178	274	690	930
	普通	18	4.5	45.0	45.0	189	420	633	898
				55.0		181	330	669	949

練混ぜ時間を 30 秒・210 秒の 2 水準とした。普通コンクリートは粗骨材投入後 30 秒で統一した。

水セメント比およびスランプ値の変動が、再生コンクリートの強度および骨材品質にどのように影響するか検討するために、表 2 に示す配合とした。

スランプの違いによる影響について、一般に土木では $S_L = 8\text{cm}$ 、建築においては $S_L = 18\text{cm}$ 、舗装用 $S_L = 3\text{cm}$ であるため、その三水準について検討を行った。また、水セメント比の違いによる影響については、水セメント比の上限値である 65%、一般に普通コンクリートで 사용되는 45%、55%を加えた配合条件とした。共通の要件としては、空気量 $\text{Air} = 4.5\%$ 、細骨材率 $s/a = 45\%$ で配合計画を行い、所定のスランプおよび空気量が、普通コンクリートで得られた配合に対して、同一容積の再生骨材を置換する条件で配合を行った。また、スランプ $S_L = 8\text{cm}$ 、

水セメント比 $W/C = 55\%$ については、両シリーズ共通試験体として検討した。

3.3 試験体

圧縮強度試験用供試体は、直径×高さが $10\phi \times 20\text{cm}$ の円柱とした。曲げ試験用供試体は、 $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ の角柱供試体を用いた。試験材齢は、標準養生下（水中、 20°C ）で 7 日・28 日時点で各 3 本ずつ試験を行った。

3.4 載荷方法および測定方法

強度試験の荷重は、500kN 万能試験機にロードセルを取り付け測定した。圧縮試験においては側面 2 面にひずみゲージを貼付し、ひずみを測定した。

4. 再生コンクリートの性状に関する実験

スランプ及び水セメント比の違いが再生コンクリートの性状に及ぼす影響について実験的に検討を行った。

4.1 フレッシュコンクリートの性状

再生コンクリートの品質を確認するために、スランプおよび空気量試験を行った。その結果、スランプを変動させたシリーズでは、表 3a に示すように目標スランプが小さいほど、値は小さくなり、骨材処理時間が長いほどスランプが大

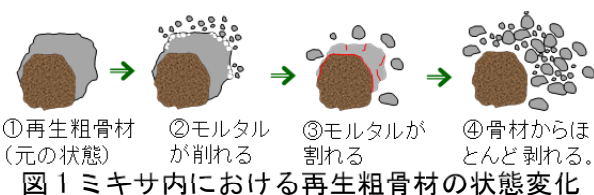


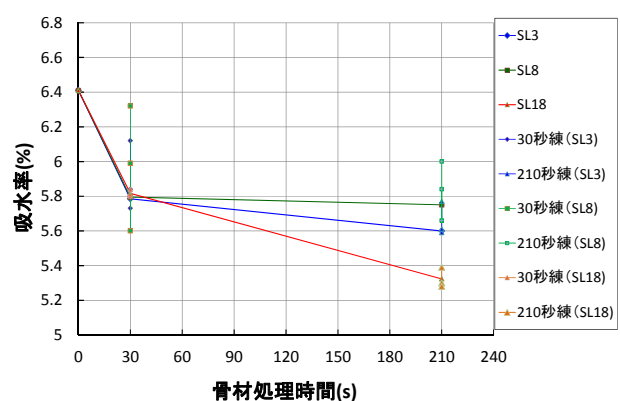
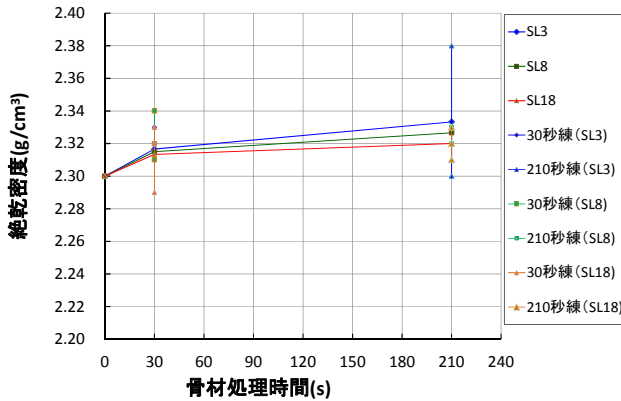
表 3. フレッシュコンクリートの物性

a) スランプを変動させた場合

目標 スランプ (cm)	練混ぜ時間		実測値	
	総時間 (秒)	処理時間 (秒)	スランプ (cm)	空気量 (%)
3	60	30	1.0	5.0
	240	210	1.6	6.0
8	60	30	4.0	6.2
	240	210	6.0	5.2
18	60	30	22.8	5.0
	240	210	23.2	5.5

b) W/C を変化させた場合

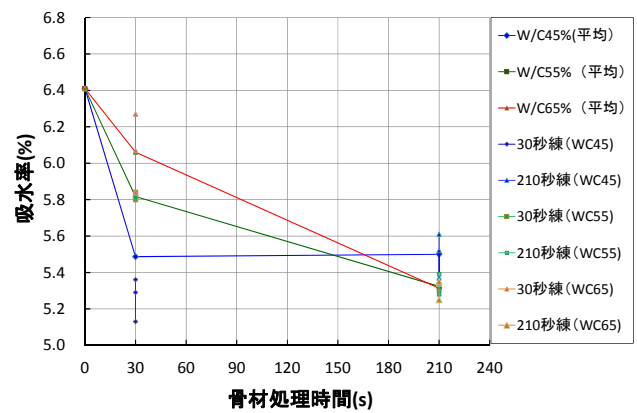
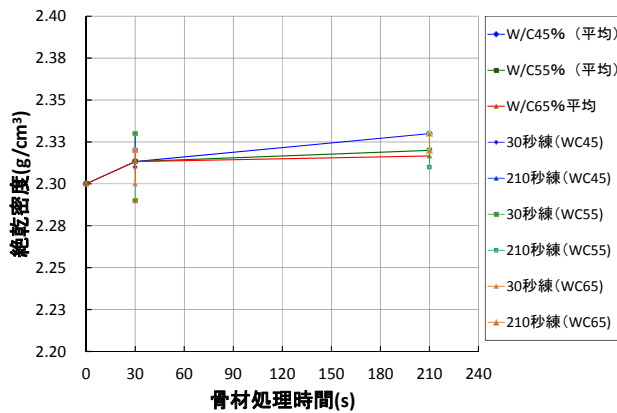
水セメント 比 (%)	練混ぜ時間		実測値	
	総時間 (秒)	処理時間 (秒)	スランプ (cm)	空気量 (%)
45	60	30	22.9	3.6
	240	210	20.4	5.5
55	60	30	22.8	5.0
	240	210	23.2	5.5
65	60	30	20.7	4.5
	240	210	21.7	5.5



a) 絶乾密度と処理時間の関係

b) 吸水率と処理時間の関係

図 2. 練混ぜ後の粗骨材の物性(スランプを変化させた場合)



a) 絶乾密度と処理時間の関係

b) 吸水率と処理時間の関係

図 3. 練混ぜ後の粗骨材の物性(水セメント比を変化させた場合)

きくなる傾向が見られた。また、空気量は全体的に大きくなり、スランプおよび処理時間による変動は見られなかった。

水セメント比を変化させたシリーズでは、目標スランプ 18cm に対して、全体的に大きくなる結果が得られた(表 3b)。空気量に関しては多少のバラつきは見られるたが、目標空気量 4.5%に近い値が得られた。

練混ぜ時に、粗骨材の品質がミキサのすりも

み効果により、どの程度改善されたか確認するために、ウェットスクリーニングを行い練混ぜ後の再生粗骨材の採取し、骨材試験を行った。その結果を図 2 および図 3 に示す。絶乾密度は、大きくなる傾向にあり、吸水率は 0.6%~1%小さくなる結果が得られた。特に、処理時間の影響が最も大きく、スランプが小さくなるほど、水セメント比が小さくなるほど効果が大きいことがわかった。

表 4. 強度試験結果一覧(材齢 28 日)

a) 圧縮強度試験結果

骨材種別	W/C	S _L	骨材処理時間	密度	圧縮強度	静弾性係数
	(%)		(cm)	(s)	(g/cm ³)	(N/mm ²)
再生	55	3	30	2.29	30.5	25.4
			210	2.28	29.9	26.9
		8	30	2.31	29.8	26.9
			210	2.32	30.9	27.3
	45	18	30	2.29	32.9	27.3
			210	2.29	30.6	28.2
	55		30	2.28	24.8	23.7
			210	2.28	27.4	25.2
	65		30	2.27	21.8	23.2
			210	2.27	22.9	23.7
普通	45	18	30	2.40	38.8	30.2
	55	3	30	2.37	27.8	26.9
		8	30	2.38	28.0	27.2
		18	30	2.38	26.8	27.7
			210	2.39	27.3	26.9

b) 曲げ強度試験結果

骨材 種別	W/C	S _L	処理 時間	曲げ 強度
	(%)		(cm)	秒
再生	55	3	30	4.3
			210	4.4
		8	30	4.4
			210	4.4
普通		3	30	4.2
			8	30
		18	30	4.7
			210	4.2

4.2 硬化コンクリートの性状

品質管理材齢である 28 日強度について、圧縮強度試験および曲げ強度試験を行った。その結果、表 4 に示すように、再生コンクリートの強度はスランプが小さくなるほど、普通コンクリートと差がない圧縮強度を発揮している。また、骨材処理時間が長いほうが圧縮強度が大きい。

静弾性係数において、再生コンクリートは骨材処理時間が長いほど大きくなる傾向を示した。特に、スランプが 8cm 以下の場合、圧縮強度および静弾性係数ともに安定した試験結果であった。また、図 4 に示すように、スランプが小さくなるほど、処理時間の影響が圧縮強度に与える効果大きい。

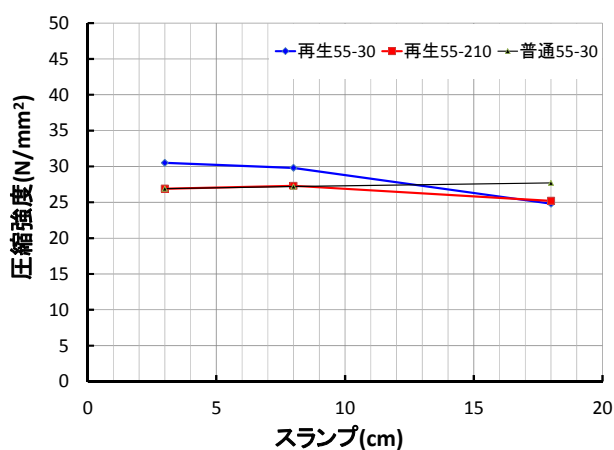


図 4. 圧縮強度とスランプの関係

5. コンクリート充填鋼管部材に関する実験

再生骨材 L を用いたコンクリートが、2 軸強制練ミキサのすりもみ効果により、普通コンクリートと変わらない強度発現を有しているが、弾性係数および耐久性に関して弱点となる可能性が大きい。そこで、鋼管のコンファインド効果による強度の上昇、靱性の確保、被覆鋼管による中性化等劣化因子の遮断により、再生骨材 L を用いたコンクリートの適用範囲の拡大の一助となることを目的として、実験を行った。

検討対象とする部材は、橋脚などの柱部材のような大断面部材ではなく、鋼管トラス桁や座屈補剛ブレースおよび耐震補強時の部材等、比

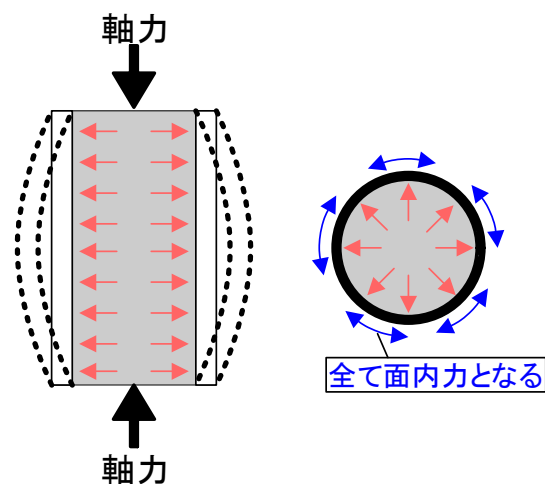


図 5. 鋼管によるコンファインド効果

表 5. 使用した鋼材の機械的性質

鋼材種別	板厚	$\sigma_y(\text{N/mm}^2)$	$\sigma_u(\text{N/mm}^2)$	$E(\text{N/mm}^2)$	伸び(%)	降伏比
STK400	2.8	356	460	2.05×10^5	33	0.77

表 6. 充填コンクリート

a)配合表

スラン プ	空気量	水セ メント 比	細 骨材 率	単位 水量	質量(kg/m^3)		
					セ メント	細 骨材	粗 骨材
(cm)	(%)	(%)	(%)	(kg/m^3)			
8	5	50.0	43.0	157	314	768	966

b)実測値

スラン プ	空気量
(cm)	(%)
8.5	5

較的小径な部材の充填材として適用する事と
して検討した。

5.1 試験体計画

被覆鋼管は、直径 76.3 ϕ (mm) $\times$ 板厚 2.8 (mm) で、径厚比 $D/t = 27$ 、高さ直径比が 3 とした。表 5 に使用した鋼管の機械的性質を示す。充填コンクリートは、再生骨材へのすりもみ効果が大きくなる条件および打設時の材料分離の影響を考慮し、 $W/C = 50\%$ 、 $S_L = 8\text{cm}$ で、表 5 に示す配合表で打設を行った。

試験体形状は、コンクリート充填鋼管部材(以下、CFT 部材) および鋼管のみが、直径 76.3 ϕ (mm) $\times$ 高さ 229 (mm)、コンクリート供試体は、直径 $\times$ 高さが 10 $\phi \times 20\text{cm}$ の円柱とした。

5.2 荷重方法および測定方法

コンクリートおよび鋼管のみの試験体は、500kN 万能試験機を用いて荷重し、ロードセルにて荷重を計測した。CFT 部材は、5,000kN 耐圧試験機を用いて荷重を行った。コンクリートは、側面 2 面にひずみゲージを貼付し、ひずみを測定した。また、鋼管および CFT 部材の軸変形は、変位計を図 6 のように設置し、相対変位を計測した。

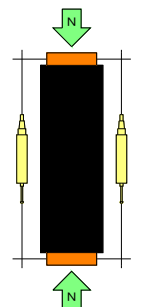


図 6. 荷重装置

5.3 実験結果

CFT 部材、構成材料である鋼管およびコンクリートシリンダーについて、圧縮強度試験を行

った。図 7 にコンクリートシリンダーの圧縮強度試験、図 8 に被覆鋼管の圧縮試験結果を示す。

各構成材料の試験結果より得られたコンクリート強度 $\sigma_B = 30.0\text{N/mm}^2$ 、鋼管の降伏点強度 $\sigma_y = 356\text{N/mm}^2$ より、CFT 部材の単純累加耐力 N_{CFT} をもとめると、 $N_{\text{CFT}} = 348\text{kN}$ が得られる。CFT 部材の圧縮強度試験を行った結果、図 9 に示すように、圧縮耐力は被覆鋼管の拘束効果により、単純累加強度よりも大きな結果が得られた。これは、鋼コンクリート合成部材の特徴として、初期剛性は、剛性の大きな鋼管に依存⁶⁾ および⁷⁾ し、降伏点耐力まで直線的に耐力が上昇する特徴であると言える。このことから、CFT 部材の充填コンクリートに再生コンクリートを用いても耐力および剛性の低下は見られず、普通コンクリートを用いた CFT 部材と差がないと考えられる。

荷重中の破壊過程においても、鋼管に局部座屈が発生しても耐力低下は見られず大きな変形能力を発揮している。(写真 1)



a)荷重状況



b)試験体

写真 1. 圧縮試験試験の状況

5.4 既往の構成則の適応性の検討

コンクリートの応力-ひずみ関係式は多くのモデルが提案されているが、本研究では直線型横補強鋼材による強度上昇が見込まれている崎野・孫モデル⁸⁾を元に、建設省技術開発プロジェクトで検討された NewRC モデルを用いて再生コンクリートを用いた CFT 部材の応力ひずみ関係に適用できるか比較検討を行った。

崎野・孫モデルの応力-ひずみ関係式は以下に示す通りである。

応力-ひずみ関係式

$$\frac{\sigma_C}{\sigma_{CB}} = \frac{AX + (D-1)X^2}{1 + (A-2)X + DX^2}$$

ここで、

$$\sigma_{CB} = 0.8\sigma_B + 2.09\left(1 - \frac{s}{2D_C}\right)^2 \rho_h \cdot \sigma_{hy}$$

$$X = \frac{\varepsilon_C}{\varepsilon_{CO}}, \quad A = \frac{E_C \cdot \varepsilon_{CO}}{\sigma_{CB}}, \quad K = \frac{\sigma_{CB}}{\sigma_B}$$

$$E_C = (0.69 + 0.332\sqrt{\sigma_B}) \times 10^4$$

$$\varepsilon_{CO} = \varepsilon_0 \begin{cases} 1 + 4.7(K-1), & K \leq 1.5 \\ 3.35 + 20(K-1.5), & K \geq 1.5 \end{cases}$$

$$\varepsilon_0 = 0.93(\sigma_B)^{1/4} \times 10^{-3}$$

$$D = \alpha + \beta \cdot \sigma_B + \gamma \sqrt{(K-1)\sigma_B} / 23$$

$$\alpha = 1.5, \quad \beta = -1.71 \times 10^{-2}, \quad \gamma = 2.4 (\text{鋼管})$$

σ_C, ε_C : コンクリートの応力, ひずみ

σ_{CB} : コンクリートシリンダ圧縮強度

ε_{CO} : 拘束コンクリート強度時ひずみ

σ_{CB} : 拘束コンクリートの強度

ρ_h : 横補強材の体積比

d : 鋼管の板厚

C : 有効横支持長さ($B-2t$)

s : 横補強筋間隔(鋼管の場合, 板厚)

D_C : 鋼管の内法

σ_{hy} : 鋼管の降伏点応力 (単位: MPa)

実験結果と解析結果から得られた応力ひずみ関係を図 10 に示す。降伏点強度に達するまでの剛性に関して概ね評価できるものと考えられる。最大耐力に大きく相違が生じているが、本実験

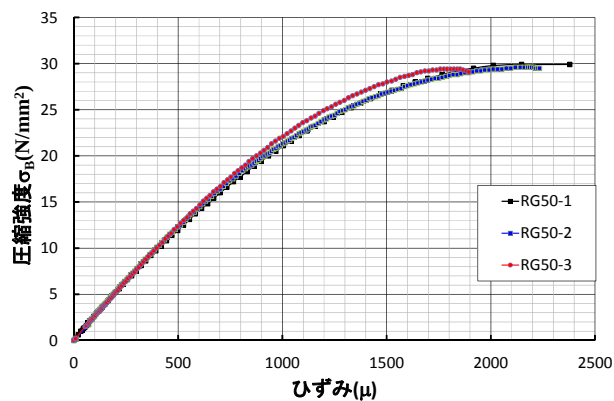


図 7. 充填コンクリートの応力ひずみ関係

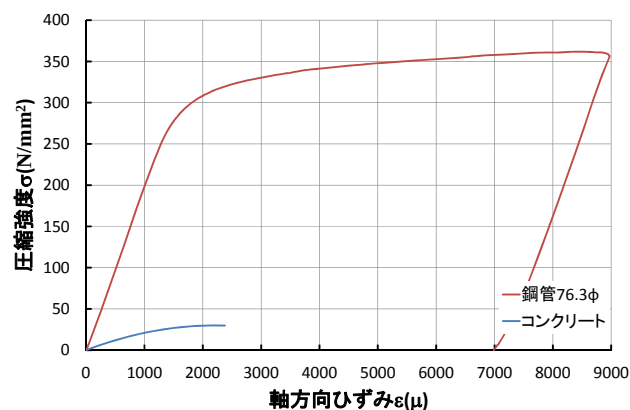


図 8. 鋼管(STK400)の応力ひずみ関係

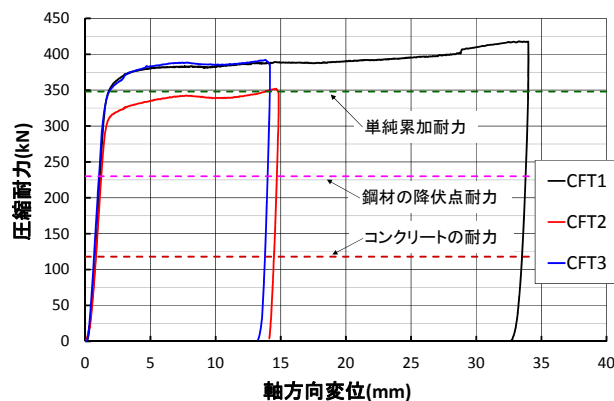


図 9. CFT 部材の荷重変形関係

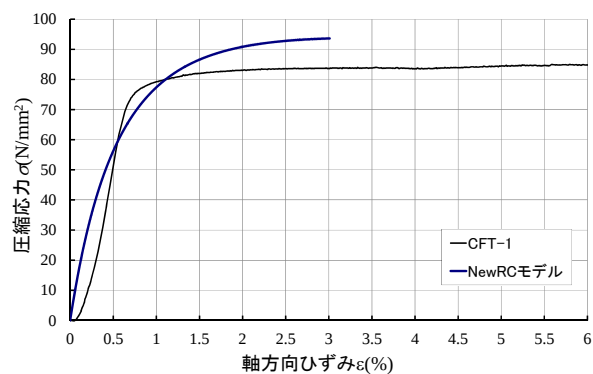


図 10. 解析モデルと実験結果

の試験体寸法が小さかったこと、また鋼材の径厚比が大きいため、充填コンクリートへの拘束効果が過大評価となったものと考えられる。

6.まとめ

練混ぜにより再生骨材 L の品質を向上させたコンクリートを CFT 部材へ適用できるかどうか実験的に検討を行った結果について、以下に記す。

- 1) 鋼管に充填された再生コンクリートは、剛性の低下も見られず、普通コンクリートと同等の性状を示すものと考えられる。
- 2) 2 軸強制練ミキサにより能動的にすりもみ効果を受けた再生骨材は、処理時間でスランプが大きくなるように、充填性が碎石に比べ高くなるものと考えられる。
- 3) 解析モデルとの精度を向上させるためには、さらに大きな断面を用いて実験を行うことで、精度が向上し、適応性が高いものと考えられる。

以上のことから、再生コンクリートを用いた CFT 部材の適応性は、初期剛性や外的因子による劣化の抑制等を鑑みても、再生 L 等の低品質な再生骨材の適用範囲を拡大できる可能性が高いと考えられる。

7. 謝辞

本研究にあたり、福岡県設専門学校土木工学科卒論生の田中創一郎氏、同建築工学科卒論生の内田朝海氏、黒石純美氏、菅原輔氏、園田幹氏、山本真司氏、城島翔氏、同建築科の石塚隆司氏、緒方真司氏、黒瀬信吾氏、星野泰広氏に充填コンクリートの性状に関する一連の実験において協力を得た。また、CFT 部材の載荷試験について、北九州市立大学国際環境工学部建築デザイン工学科の小山田英弘准教授、同 EA の三倉英史氏に協力を得た。ここに記し、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省：平成 24 年度建設副産物実態調査結果，2014.03
- 2) 福岡県県土整備部道路維持課：福岡県橋梁長寿命化修繕計画（20012 年度版），2013.03

- 3) 藤本利昭，小松博，櫻田智之：再生骨材コンクリートの合成構造への適用に関する研究，日本建築学会技術報告集，2011.02
- 4) 河本裕行，小山田英弘，小山智幸，伊藤是清：高炉スラグ微粉末を外割混合した再生コンクリートに関する実験的研究 その 1 圧縮強度発現に関する予備的実験，日本建築学会学術講演梗概集（中部），2012.9
- 5) 河本裕行，小山田英弘，伊藤是清，吉里哲郎：再生骨材 L 種を用いた低環境負荷で高品質な再生コンクリートの製造に関する研究，H24 年度九州建設技術管理協会研究助成報告書，2013.05
- 6) 倉富 洋，堺 純一，田中 照久，河本 裕行：薄肉鋼管で横補強した鋼・コンクリート合成柱材の復元力特性 -骨格曲線の定式化-，日本建築学会構造系論文集，2012. 03
- 7) 倉富 洋，堺 純一，田中 照久，河本 裕行：多数回繰返し水平力を受ける鋼・コンクリート合成柱材の安定限界軸力の実験的研究，日本建築学会構造系論文集，2013.04
- 8) 崎野健治，孫玉平：直線型横補強材により拘束されたコンクリートの応力ひずみ関係，日本建築学会構造系論文集 1994.7