

論文 鋼管内に充填されたコンクリートの高速圧縮強度実験

黒木勇人^{*1}・太田貞次^{*2}・香月智^{*3}・石川信隆^{*4}

要旨:本研究は、鋼管内に充填されたコンクリートの圧縮強度に及ぼす鋼管の拘束効果およびひずみ速度効果について検討したものである。実験は、荷重速度 3m/sec に達する高速荷重試験機を用いて行われ、同時に中速度および静的荷重実験も行った。コンクリート充填鋼管は、円形鋼管の肉厚径比を4種類に変化させたものおよび角形鋼管の肉厚幅比を3種類に変化させたものを用いた。実験結果によると充填コンクリートは、鋼管の拘束度に応じてその圧縮強度が著しく増大し、プレーンコンクリートの約6~10倍になるが、ひずみ速度効果は、圧縮強度増加率が約1.1倍程度と小さくなることが明らかになった。

キーワード: 充填コンクリート, 鋼管拘束効果, ひずみ速度効果, 圧縮強度増加率, 高速荷重

1. 緒言

鋼管内に充填されたコンクリートは、鋼管の拘束効果により、その圧縮強度が増加することが知られている¹⁾²⁾。最近、土木・建築分野において、このコンクリート充填鋼管のはりや柱・橋脚への利用が検討されている³⁾⁴⁾が、著者ら⁵⁾⁶⁾も、ロックシェッドに対する合成構造の適用について検討している。このコンクリート充填鋼管をロックシェッドのような耐衝撃構造部材として用いる場合には、コンクリートのひずみ速度⁷⁾の影響が現れるが、その特性については未解明なままである。

そこで本研究は、鋼管内に充填されたコンクリートに対する高速荷重圧縮試験を行い、その圧縮強度や弾塑性挙動に及ぼす鋼管の拘束効果およびひずみ速度効果について検討したものである。

2. 実験要領

2.1 実験装置

実験は、水平高速荷重装置を用いて行った。本装置は、試験開始前にアキュムレータに蓄

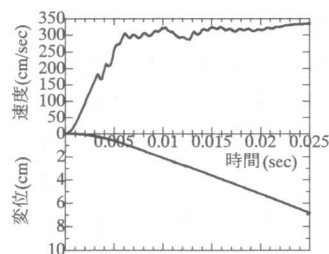
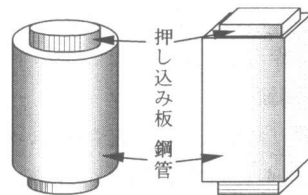


図-1 高速荷重試験機のスPEEDおよび変位の時刻歴特性



(a)円形鋼管内充填コンクリート (b)角形鋼管内充填コンクリート

図-2 供試体形状

積された高圧の油を一気に解放して荷重するため、図-1に示すような高速荷重が可能であり、さらにその最大速度を設定速度にコントロールすることができる。本実験では、高速荷重で約3.0m/sec、中速度で約1cm/min、静的で約0.5mm/minの荷重速度で行った。

*1 防衛大学校 理工学研究科 地球環境科学専攻 (正会員)

*2 (株)宮地鐵工所 技術開発部 課長 工博 (正会員)

*3 防衛大学校助教授 理工学部 土木工学科 工博 (正会員)

*4 防衛大学校教授 理工学部 土木工学科 工博 (正会員)

2.2 実験供試体

供試体は、高さ 100mm で図-2 に示すような円形鋼管内充填コンクリートと角形鋼管内充填コンクリートであり、その種類は表-1 に示すようにプレーンコンクリート (1 種類)、円形鋼管内充填コンクリート (4 種類) および角形鋼管内充填コンクリート (3 種類) の計 8 種類である。全供試体の高さは 100mm であり、プレーンコンクリート供試体の直径(D)は 50mm、その他の供試体については鋼管の寸法によって直径または幅は表-1 に示すとおりである。使用したコンクリートの配合を表-2 に示す。管径の小さな供試体への充填を考慮して、粗骨材最大寸法を 10mm でスランブを大きくするために水セメント比が大きい配合としている。鋼管は SM490 材質を使用し、母材の応力～ひずみ関係は図-3 に示すものである。鋼管と充填コンクリートとの間には剥離剤を塗布して摩擦を小さくするように工夫した。鋼管内の充填コンクリートの試験に際しては、図-2 に示すように各供試体の内径 (内幅) より約 1mm 小さな径(幅)で、厚さ 10mm の鋼製の押し込み板を上下にあてて内側の充填コンクリート部のみに載荷荷重が作用するようにした。

2.3 計測要領

ここでは、水平高速載荷装置を用いたため、供試体を図-4 に示すように水平に設置した。そのため荷重の計測は、図-4 に示すように載荷治具固定端での荷重をロードセルを用いて、載荷点直近の荷重を載荷治具に貼付したひずみゲージを用いて計測した。また、供試体の変形については、載荷治具変位と固定端変位をレーザー式変位計を用いて計測し、その差から求める変形と、クリップゲージにより固定端から載荷治具の差を直接計測する方法で重複して計測した。また、各供試体の鋼管表面の縦横にひずみゲージを貼付しひずみを計測した。

3. 実験結果および考察

3.1 試験後の変形性状

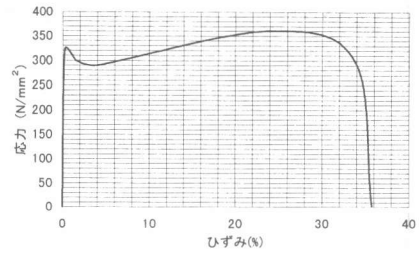


図-3 鋼管母材の応力～ひずみ関係

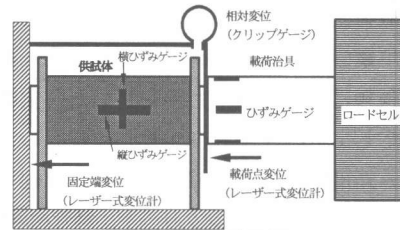


図-4 計測要領

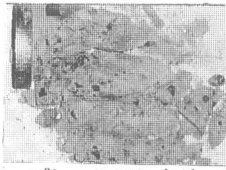
表-1 供試体の種類および実験ケース

供試体	鋼管の種類	高さ (mm)	外径(D) 幅(B) (mm)	厚さ (mm)	t/D t/B	載荷速度	回数	
N	無	100	50		-	静的	3	
						中速	3	
						高速	3	
SQA	角形		50	50	1.6	0.032	静的	3
							中速	3
							高速	3
SQB	角形		50	50	2.3	0.046	静的	3
							中速	3
							高速	3
SQC	角形	50	50	3.2	0.064	静的	3	
						中速	3	
						高速	3	
CRA	円形	100	34		0.068	静的	3	
						中速	3	
						高速	3	
CRB	円形		50	42.7	2.3	0.054	静的	3
							中速	3
							高速	3
CRC	円形		50	60.5		0.038	静的	3
							中速	3
							高速	3
CRD	円形	100	60.5	3.2	0.053	静的	3	
						中速	3	
						高速	3	

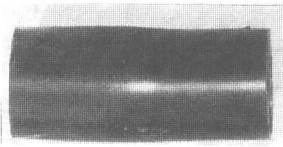
表-2 コンクリート配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランブの範囲 (cm)	空気量の範囲 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 S/a (%)
10	12±2	4.3	47.5	42.0
単位量(kg/m ³)				
水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材	混和材料
171	360	725	1019	1,440
備考：普通ポルトランドセメントを使用				

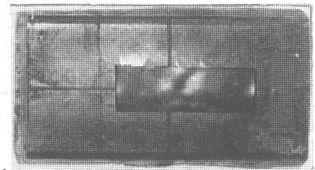
写真-1(a)にプレーンコンクリートの静的実験における試験後の破壊性状を示す。写真-2(a)には高速載荷実験での破壊性状を示す。静的実



(a) プレーンコンクリート

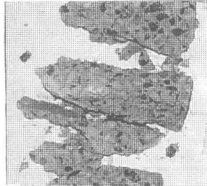


(b) 円形鋼管内充填コンクリート

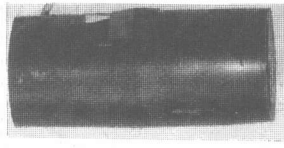


(c) 角形鋼管内充填コンクリート

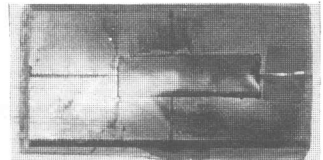
写真-1 破壊形状 (静的載荷)



(a) プレーンコンクリート



(b) 円形鋼管内充填コンクリート



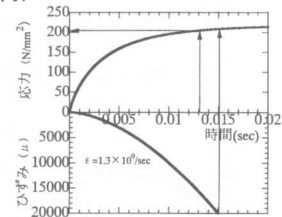
(c) 角形鋼管内充填コンクリート

写真-2 破壊形状 (高速載荷)

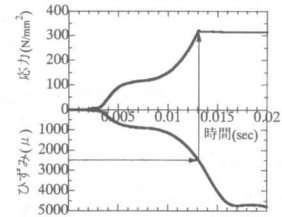
験では細かい碎片に碎けているが、高速載荷実験では大きな塊が斜めせん断破壊面を明瞭に形成して破壊している。写真-1(b), (c)には、それぞれ静的実験での円形および角形鋼管充填タイプの供試体の変形状況を示す。いずれの場合にも供試体中央部が膨らんでおり内部のコンクリートが、破壊に伴って側方に膨らんだことがわかる。写真-2(b), (c)には同じく高速載荷実験のものを示すが、静的実験と同様に側方に膨らんでいる。

3.2 応力～ひずみ関係に及ぼす拘束効果

図-5(a)に円形鋼管内充填コンクリートのCRA 供試体に対する高速載荷実験での応力およびひずみの時刻歴データを示す。ここで、応力はロードセルの計測値を供試体の初期コンクリート断面積で除したものである。ちなみに載荷治具先端のひずみゲージにより得られた荷重を用いても有意な差異はなかった。また、ひずみについては、供試体の全変形量を供試体長さで除したものである。これより、載荷開始時からのひずみが 20000 μ (最大応力時)に達する時間(15ms)までの平均ひずみ速度を求めると $0.02 \div 0.015 \approx 1.3 \times 10^9$ (1/sec)となる。図-5(b)は、鋼材の円周方向のひずみを図-3で示した鋼管母材の応力～ひずみ関係をパイリニアモデルとして応力に変換し、その時刻歴を示したものである。このデータを図-5(a)と同調してみると、図-5(a)のコンクリートの最大強度は鋼材の円周方向ひずみが降伏点に達した後で得られるこ



(a) コンクリートの軸ひずみと応力～時間関係



(b) 鋼管の円周方向ひずみと応力～時間関係

図-5 高速載荷実験の応力・ひずみの時刻歴応答
CRA 供試体 (円形, D=34mm, t=2.3mm)

とがわかる。これは、鋼管の拘束度がコンクリートの最大強度発揮に大きな影響を及ぼすことを意味している。次に、図-6には、図-5(a)に示した時刻歴データの時間軸を同調させて得られる応力～ひずみ関係について鋼管種類をパラメーターとして比較図示する。図-6(a)には円形鋼管内充填コンクリートに対する静的載荷実験の結果を示す。プレーンコンクリートは、最大応力 17N/mm²に 1000 μ で達し、その後瞬時に圧壊した。しかし、一方の充填コンクリートの場合にはいずれの供試体も 20000 μ に至るまで応力が低下することなく、緩やかな応力増加を続ける。その最大応力は 120～200N/mm²とプレーンコンクリートの約 6～10 倍も大きくなっている。また、その弾塑性挙動は、鋼管の

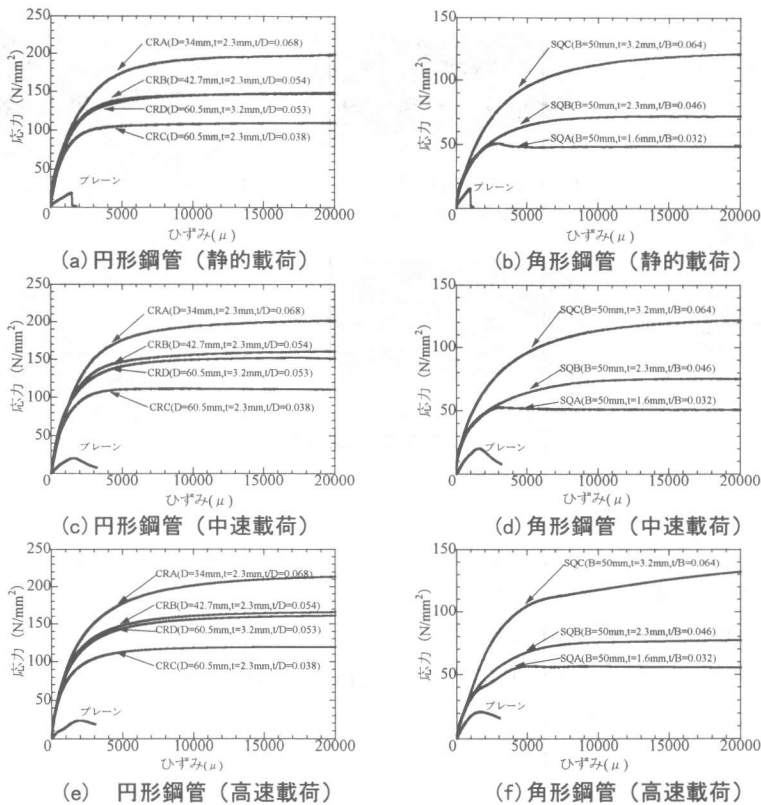


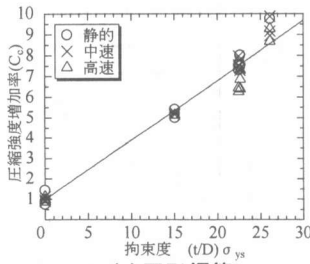
図-6 応力～ひずみ関係に及ぼす鋼管拘束の影響

肉厚と直径比(t/D)が等しい CRB 供試体 ($t/D=0.054$)と CRD ($t/D=0.053$)供試体では、ほぼ完全に一致しており、強度増加は鋼管の肉厚直径比(t/D)に強い相関があることがわかる。図-6(c), (e)には、それぞれ中速載荷および高速載荷時の円形鋼管内充填コンクリートの応力～ひずみ関係を示すが、いずれの場合にも静的載荷実験と同様に応力が低下することのない応力～ひずみ関係となり、その弾塑性挙動が(t/D)の影響を受けていることがわかる。図-6(b)には、角形鋼管内充填コンクリートに対する静的載荷実験の応力～ひずみ関係を示す。この場合にも円形鋼管と同様に鋼管拘束によって大ひずみまで強度を維持する弾塑性挙動を示している。しかし、SQA 供試体の場合には、ひずみ $\epsilon = 2500 \mu$ において一旦 50N/mm^2 の最大強度となった後、耐力が低下し、応力 45N/mm^2 となって一定値を維持している。他の供試体では、このような応力の低下領域が現れないが、SQC 供試体

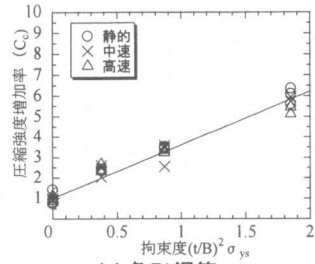
は、応力の増加割合が大きな弾塑性挙動を示している。角形鋼管内充填コンクリートの最大応力を円形鋼管のものと比較すると、肉厚が同じでほぼ等しい径と幅であっても角形鋼管の応力は、概ね円形鋼管の約7割程度になっており、円形鋼管よりも拘束効果が小さい(例えば、静的で SQB 供試体の約 70N/mm^2 に対して CRC 供試体は約 100N/mm^2)ことがわかる。図-6(d), (f)には、それぞれ中速載荷、高速載荷時の応力～ひずみ関係を示すが、静的載荷時とほぼ同様な傾向を示している。

3.3 最大圧縮強度に及ぼす鋼管の拘束度効果

文献6)では、充填コンクリートの圧縮強度は、円形鋼管で(t/D) σ_{ys} 、角形鋼管で(t/B) $^2 \sigma_{ys}$ と線形関係があるものとしている。そこで、本研究でも鋼管の拘束度のパラメーターとして、円形鋼管には(t/D) σ_{ys} を、角形鋼管に対しては(t/B) $^2 \sigma_{ys}$ を選び圧縮強度増加率と拘束度の関係を図-7のように整理した。また、鋼管の拘束

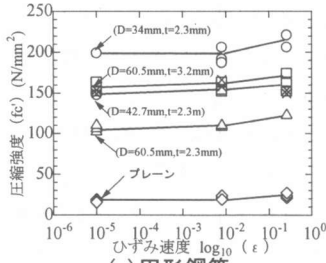


(a) 円形鋼管

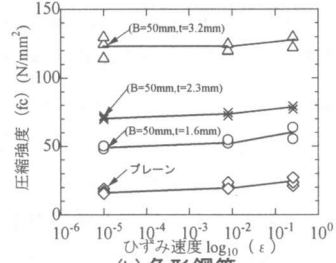


(b) 角形鋼管

図-7 圧縮強度増加率（拘束度倍率）と鋼管拘束度の関係



(a) 円形鋼管



(b) 角形鋼管

図-8 最大圧縮強度～ひずみ速度関係

度による圧縮強度増加率（拘束度倍率 C_c ）は次式による。

$$C_c = \frac{f'_{cc}}{f'_{cp}} \quad (1)$$

ただし、 C_c ：鋼管の拘束度による圧縮強度増加率、 f'_{cc} ：充填コンクリートの最大圧縮強度、 f'_{cp} ：プレーンコンクリートの最大圧縮強度。

ここで、最大圧縮強度とは、プレーンコンクリートや角形鋼管 SQA 供試体のようにその応力～ひずみ関係にピーク値が現れたものはその値を、それ以外の応力の低下が見られない弾塑性タイプではひずみ $\epsilon = 20000 \mu$ における応力をもって最大圧縮強度とした。図-7 より圧縮強度増加率（拘束度倍率）と鋼管の拘束度の間には、静的・中速・高速の荷重速度の如何に関わらずほぼ線形的に増大することが認められ、プレーンコンクリートに比し円形鋼管では最大約 10 倍、角形鋼管では約 6 倍大きくなっている。そこで円形鋼管と角形鋼管に対して圧縮強度増加率（拘束度倍率）の線形回帰式を求めると次式となる。

(a) 円形鋼管

$$C_c = 1.0 + 0.29 \left(\frac{t}{D} \right) \sigma_{ys} \quad (2)$$

(b) 角形鋼管

$$C_c = 1.0 + 2.62 \left(\frac{t}{B} \right)^2 \sigma_{ys} \quad (3)$$

ただし、 t ：鋼管の肉厚、 D ：円形鋼管の直径、 B ：角形鋼管の幅、 σ_{ys} ：鋼管の降伏応力。

3.4 最大圧縮強度に及ぼすひずみ速度効果

図-8 に最大圧縮強度とひずみ速度との関係を示す。供試体ごとに見ると、ひずみ速度が大きくなるにつれ緩やかな強度増加が見られる。そこで、圧縮強度と中速および高速荷重時の強度の比率をひずみ速度効果による圧縮強度増加率つまり動的倍率 C_s と名付けて整理すると図-9 のようになる。

$$C_s = \frac{f'_{dc}}{f'_{sc}} \quad (4)$$

ただし、 f'_{dc} ：プレーンコンクリートの中速・高速荷重時の圧縮強度、 f'_{sc} ：プレーンコンクリートの静的荷重時の圧縮強度。

図中に高橋がプレーンコンクリートの実験を基に提案したひずみ速度効果の式を点線で示す。この推定値は、プレーンコンクリートにはやや似ているとも見られるが、充填コンクリー

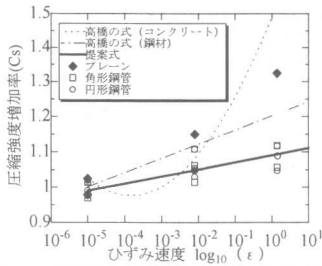


図-9 圧縮強度増加率（動的倍率）
～ひずみ速度関係

トには過大推定する。前述のように鋼管拘束による強度増加は、拘束している鋼管の降伏強度の影響を強く受けているので、同じく高橋らが提案している鋼材に対する強度増加の推定式も一点鎖線で図中に示してある。この場合には、コンクリートの推定式より良好な結果となっているが、同じく過大推定となっている。そこで、本実験に対するひずみ速度による圧縮強度増加率（動的倍率 C_s ）の回帰式を求めると次式となる。

$$C_s = 1.1 + 0.02 \log(\dot{\epsilon}) \quad (5)$$

以上により、充填コンクリートのひずみ速度効果は、プレーンコンクリートに比して小さいことがわかる。よって、式(1)～(5)を用いると充填コンクリートの鋼管の拘束度とひずみ速度効果の両方を考慮した最大圧縮強度の推定値が次式によって可能である。

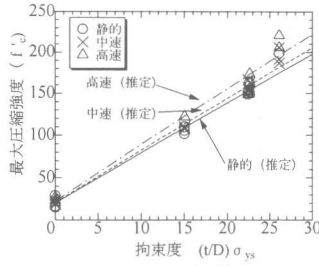
$$f'_c = C_c C_s f'_{cps} \quad (6)$$

ここで、 f'_{cps} ：プレーンコンクリートの静的载荷試験での最大圧縮強度。 C_c ：鋼管拘束による増加率(拘束度倍率)， C_s ：ひずみ速度効果による増加率（動的倍率）。

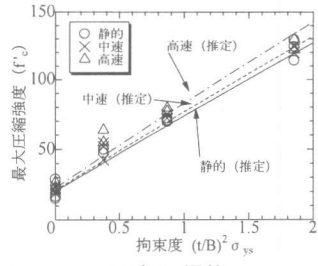
式(6)による推定値と今回の実験結果を図-10に比較図示する。図-10より、式(6)は円形鋼管および角形鋼管のいずれの実験値に対しても概ね静的・中速・高速のいずれも良好な推定値を与えることがわかる。

4. 結 言

本研究の成果を要約すると以下のようになる。



(a) 円形鋼管



(b) 角形鋼管

図-10 充填コンクリートの最大圧縮強度推定値

(1) 鋼管の拘束度によるコンクリートの圧縮強度増加率 C_c (拘束度倍率) は、円形鋼管では $(t/D)\sigma_{ys}$ 、角形鋼管では $(t/B)^2\sigma_{ys}$ に比例し、円形では最大約 10 倍、角形では約 6 倍大きくなった。

(2) 角形鋼管の拘束度効果は全般的に円形鋼管の約 7 割程度であることが認められた。

(3) 鋼管内に充填されたコンクリートのひずみ速度効果による圧縮強度増加率つまり動的倍率 C_s は、プレーンコンクリートに比して小さく、 $\dot{\epsilon} \approx 10^0/\text{sec}$ で約 1.1 倍程度であった。

(4) 本実験の範囲内で、鋼管の拘束度およびひずみ速度効果を考慮した最大圧縮強度の推定式を提案することができた。なお、今後さらに広い範囲のパラメーターに対して検討する必要がある。

参考文献

- 1) 佐藤孝典：円形断面の充填鋼管コンクリート構造におけるコンファインド効果のメカニズムとそのモデル化，日本建築学会構造系論文報告集，第 452 号，pp.149～158，1993.10.
- 2) 加藤勉：コンクリート充填鋼管短柱の圧縮強さ，変形能力（コンクリート充填鋼管の耐力，変形能力の研究，I），日本建築学会構造系論文報告集，第 468 号，pp.183～191，1995.2.
- 3) 磯江ほか：鋼・コンクリート合成鋼管アーチの内部滑りに関する検討，土木学会大 53 回年次学術講演概要集，I-A，pp.610～611，1998.10.
- 4) 太田貞治ほか：鋼・コンクリート合成構造ロックシェットの構造要素の耐衝撃挙動に関する実験的研究，鋼構造論文集，Vol.5，No.17，pp.45～55，1998.3.
- 5) 高橋芳彦ほか：衝撃荷重を受ける鉄筋コンクリートはりの弾塑性挙動に及ぼす材料のひずみ速度効果，構造工学論文集，Vol. 37A，pp.1567～1580，1991.3.
- 6) C F T 構造技術指針・同解説，社団法人 新都市ハウジング協会，1997.