

礫衝突による損傷を受けたコンクリート充填鋼管の残存耐力に関する実験的研究

白石博文¹・梶田幸秀²・香月 智³・石川信隆⁴・松村和樹⁵・嶋 丈示⁶

¹学生会員 防衛大学校理工学研究科学生 建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

E-mail:d03005@nda.ac.jp

²正会員 博士(工学) 防衛大学校助手 建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

³正会員 工博 防衛大学校助教授 建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

⁴フェロー 工博 防衛大学校教授 建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

⁵正会員 工修 (財)砂防・地すべり技術センター 砂防技術研究所

(〒102-0074 東京都千代田区九段南 4-8-21)

⁶非会員 砂防鋼構造物研究会 (〒102-0093 東京都千代田区平河町 2-7-5)

本研究は、礫衝突による損傷を受けたコンクリート充填鋼管の残存耐力を明らかにするために、2段階の実験を行ったものである。まず、第1段階として重錘落下衝突実験によりコンクリート充填鋼管に損傷を与え、第2段階として損傷を受けたコンクリート充填鋼管に対し静的および急速曲げ載荷実験を行った。静的曲げ載荷実験により損傷の度合と残存耐力および残存吸収エネルギーの関係を明らかにし、コンクリート充填鋼管の使用限界と終局限界を定量的に提案した。また、急速曲げ載荷実験により、損傷を受けたコンクリート充填鋼管の残存耐力および残存吸収エネルギーに及ぼす載荷速度の影響について検討した。

Key Words : concrete filled steel tube, residual strength, residual absorption energy, impact test, damaged level

1. 緒言

我が国では土石流および流木の対策として砂防ダムが全国に設置されており、中でも機能面・施工面において優れた特性を持つ鋼製砂防ダムが数多く施工されている。この代表例として、写真-1に示す格子形鋼製砂防ダム²⁾がある。格子形鋼製砂防ダムは直径約600mmの中空鋼管を立体格子状に組み合わせた剛結合構造物であり、礫および流木の衝突に対しては、その運動エネルギーを局部変形(へこみ変形)およびはりの塑性変形で吸収する構造になっている。すなわち、格子形鋼製砂防ダムは土石流発生時には、礫衝突により鋼管部材自身は変形(損傷)することを前提に設計されており、土石流流体力や堆砂圧には構造全体すなわち骨組構造で抵抗する設計がなされている¹⁾。

平成12年に被災した格子形鋼製砂防ダム(岐阜県

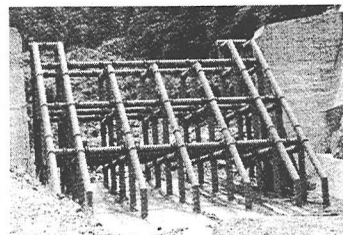
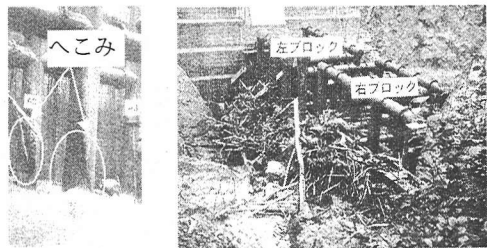


写真-1 格子形鋼製砂防ダム



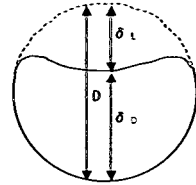
(a) 最下段部

(b) 構造全体

写真-2 格子形鋼製砂防ダムの実被災例

表-1 損傷レベルに対する考え方

部材の状態	レベル	判定	対策	現地調査でわかる物理量	
変形なし	I	健全	放置	中空鋼管:へこみ率 (文献17で提案) CFT:残留変形角 (本研究)	
変形あり	II	使用限界	補修・補修		A
	III	損傷	補修・補修		B
	IV	終局限界	取替		
	V	破壊	取替		



$$\text{へこみ率 } \alpha = \delta_t / D$$

図-1 へこみ率の算定法

阿木川の実例を見ると、写真-2(a)に示すとおりダム最下段部の鋼管部材は損傷しているものの、構造全体としては写真-2(b)に示すように流木や礫をせき止め、機能を果たしていることがわかる。しかし、今回のように中空鋼管が損傷を受けた場合、機能回復のための対策(放置・補修・取替等)に対する判断基準が明確に定められていないため、損傷が発生しても補修・取替などの処置をすみやかに講じていないのが現状であり、次の土石流発生時に砂防ダムとしての機能が十分に果たせないことも考えられる。このため、全体としての安定性を向上させる案として今後建設される格子形鋼製砂防ダムに対して最下段部の鋼管にコンクリートを充填させ鋼管部材強度を向上させる案が検討されはじめている。このコンクリート充填鋼管は鋼製スリットダムでは一部に使用されている^{11),12)}が、コンクリート充填によって生ずる効果や限界状態の変化は設計に考慮されていない。

これまでに中空鋼管の耐力に関する研究は建設時を想定して健全な鋼管に対して行われており^{3)~10)}、損傷を受けた鋼管に対しては上田・Rashed¹⁶⁾が海洋構造物を対象として軸力と2方向曲げを受ける場合、局部変形(へこみ変形)と曲げ変形をもつパイプの耐力評価に関する解析的研究があるにすぎない。しかし、この研究では、与えられた局部変形量(へこみ量)が鋼管直径の10%までと非常に小さい範囲となっているため、損傷を受けた中空鋼管に対する終局限界の決定に関する明確な力学的根拠となっていない。そこで筆者ら¹⁷⁾は、損傷を受けた中空鋼管に対する判定および対策を表-1のように提案し、各レベルの境界を使用限界および終局限界とした。すなわち損傷を受けた中空鋼管に対して残存耐力評価実験を実施し、現地調査でわかる物理量として図-1に示すへこみ率を定義し、使用限界(無損傷鋼管の残存耐力の90%以上を有する状態)におけるへこみ率を0.1、また終局限界(無損傷鋼管の残存耐力の60%以上を有する状態)におけるへこみ率を0.4と提案した。つづ

いて本研究では、格子形鋼製砂防ダムにおいて現在検討中のコンクリート充填鋼管(以下 CFT)に対して、損傷を受けた後の残存耐力および残存吸収エネルギーを評価することを目的とした。具体的には、鋼管径が等しく、肉厚の異なる2種類のCFTに対し静的曲げ載荷実験を行い、残存耐力および残存吸収エネルギーについて考察し、さらに急速曲げ載荷実験により、損傷を受けたCFTの残存耐力および残存吸収エネルギーに及ぼす載荷速度の影響を考察した。

2. 実験の概要

本研究では、礫衝突による損傷を受けたCFTの残存耐力を求める目的から、まず第1段階として重錘落下衝突実験によりCFTに損傷を与え、第2段階として損傷を受けた鋼管に対し、静的曲げ載荷実験により残存耐力および残存吸収エネルギーを評価し、さらに急速曲げ載荷実験により載荷速度が残存耐力および残存吸収エネルギーに及ぼす影響を調べた。

(1) 供試体

本実験に用いた鋼管は、一般構造用炭素鋼管(JIS G 3444, 材質 STK400)であり、直径 139.8mm、長さ 1000mm、肉厚 3.5mm および 2.0mm(径厚比 40 および 70)のものを用いた。実際の格子形鋼製砂防ダムでは径厚比 20~50 程度の中空鋼管が使用されており、本研究では径厚比 40 の鋼管を基準とした。基準鋼管より薄い肉厚(2.0mm)の鋼管も用意した理由は、鋼管にコンクリートを充填すると鋼管全体の強度が増すため径厚比の大きい鋼管が使用されると考えたためである。直径 139.8mm、肉厚 3.5mm の鋼管は市場に出回っているため入手は容易であるが、肉厚 2.0mm の鋼管は規格外の鋼管であるため、本実験用に厚さ 4.5mm の一般構造用圧延鋼材(JIS G 3101, 材質 SS400)を削り 2.0mm とし、これを巻いて TIG 溶接し鋼管を作成した。そのため、2.4 節(実験ケース)で述べるが、肉厚 3.5mm の鋼管に対しては実験を 9 ケース行っているが、肉厚 2.0mm の鋼管に対しては 5 ケースしか行っておらず、材料特性値についても得られなかった。同様の理由で急速曲

表-2 コンクリート配合表

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランブの範囲 (mm)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
				水 W	セメント C	細骨材 s	粗骨材	混和剤
20.0	120.0	61.5	46.5	160	261	864	1025	2.61

※普通ボルトランドセメント使用

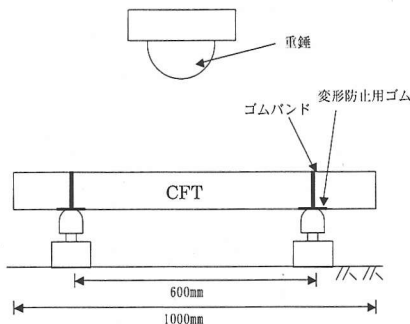


図-2 重錘落下衝突実験概要

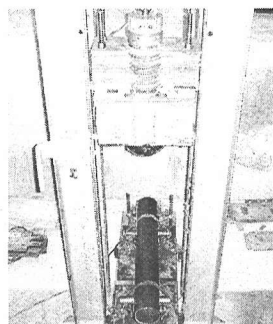


写真-3 落錘式衝撃荷装置

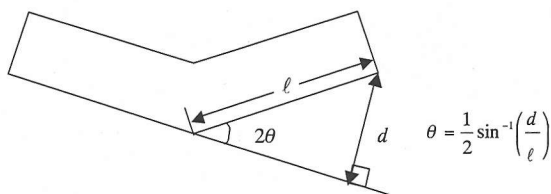


図-3 残留変形角の算定法

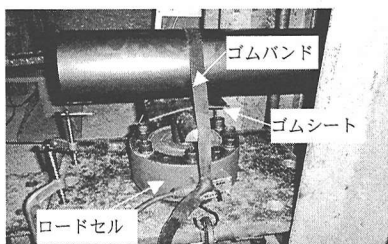


写真-4 支点近傍状況

げ荷実験は肉厚 3.5mm の CFT に対してのみ行っている。鋼管内に充填したコンクリートは表-2 に示すように粗骨材最大寸法を 20mm、水セメント比を 61.5%とし、28 日強度(水中養生)での圧縮強度は 21N/mm²であった。

(2) 第1段階: 重錘落下衝突実験(礫衝突による損傷を与える実験)

重錘落下衝突実験は、写真-3 に示す落錘式衝撃荷装置を用いて行った。実験は図-2 に示すように、CFT を両端単純支持させスパン長を 600mm とし、スパン中央部に重錘が落下するように設置した。支点には写真-4 に示すとおりロードセル上に鋼製のカマボコ型の治具を取付け、その上にゴムシートを敷き、ゴムバンドにより鋼管の上下方向の移動を拘束した。重錘質量は 420kg、重錘先端部は直径 220mm の半球状である。なお、ゴムシートを敷いた理由は支点部での鋼管の損傷を防ぐためである。本実験の主目的は、鋼管の荷点部に損傷を与えることであるため、計測項目としては、実験終了後、図-1 に示す鋼管の残存径 δ_D をノギスにより計測し、鋼管のへこみ量 δ_L (局所変形量) を算定し、へこみ率を求め、また、図-3 に示すとおりはり変形により発生した変

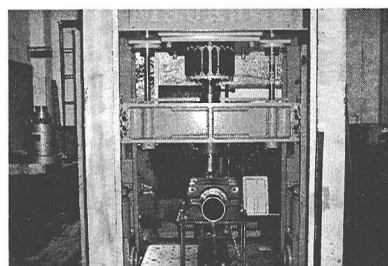


写真-5 急速荷試験装置

位を定規で測定し、残留変形角 θ を計算により求めた。

(3) 第2段階: 静的および急速曲げ荷試験(残存耐力評価実験)

静的および急速曲げ荷試験は、写真-5 に示す急速荷試験装置を用いて行った。本研究では、損傷を受けた CFT の残存耐力評価法として、図-4 のように損傷部を下側(圧縮側)にし、片持ちばりにより耐力を評価する方法を採用した。この理由は以下のとおりである。まず図-5(a)のように重錘落下衝突実験では鋼管の荷点下部には引張力、上部には圧縮

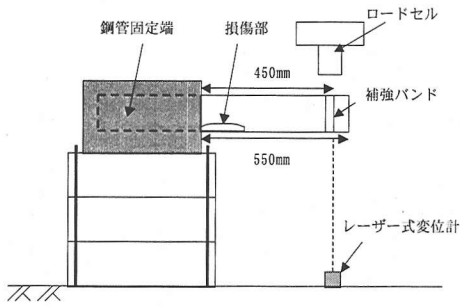


図-4 静的および急速曲げ载荷実験概要図

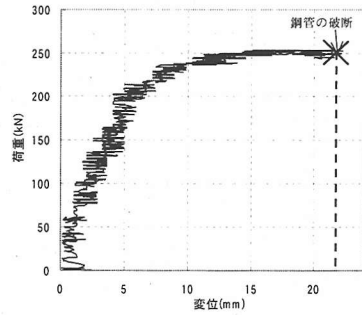
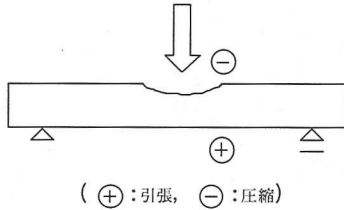
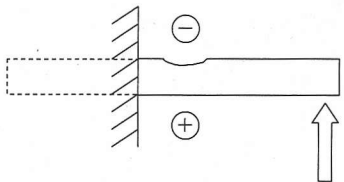


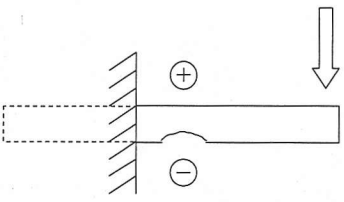
図-6 荷重～変位関係



(a) 単純ばりによる曲げ耐力評価



(b) 片持ちばりによる実験 1



(c) 片持ちばりによる実験 2

図-5 損傷部の向きに対する考え方

力が作用する。次に、この損傷部に堆砂圧や流体力が作用するときの残存耐力を調べる実験として、図-5(b)のように片持ちばりにして下から载荷することを考えた。これは損傷部がさらに圧縮作用を受けるようにするためである。しかし、実験装置の都合上、図-5(c)のように上から载荷し損傷部に圧縮力を作用させることとし、図-5(b)と同じ力学的関係を保持するようにした。

実験の状況としては、図-4 に示すとおり片持ちばりのスパンは 550mm とし、载荷位置は固定端より 450mm とした。さらに、载荷位置では鋼管断面の変形を拘束するため写真-6 に示すような補強バンドを取り付けている。計測項目は図-4 に示すとおり、ロードセルによる载荷点荷重とレーザー式変位計に

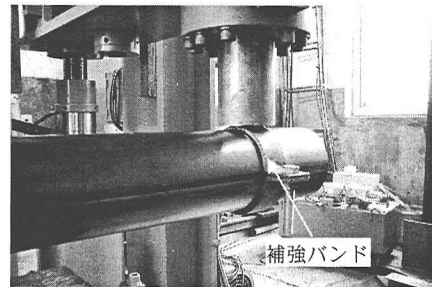


写真-6 補強バンド

よる载荷点変位の 2 種類である。また、急速曲げ载荷実験においては設定载荷速度を 4.0m/s と一定とした。

(4) 実験ケース

重錘落下衝突実験において CFT に与えるエネルギーの基準値を設定するため、スパン 600mm の両端単純支持した CFT に対し中央载荷による静的载荷実験を行った。図-6 に得られた荷重～変位関係を示す。図-6 より変位量約 22mm で CFT が破断し、これより、CFT が破断するまでのエネルギーが 4.13kN・m と得られた。よって、重錘質量を 420kg に設定したため落下高さは 0.98m(約 1.0m)となる。この値を基準値として、動的エネルギーが静的の約 3 倍になると想定して表-3 のように落下高さを 3.0m まで実施した。また、肉厚 2.0mm の鋼管の場合は落下高さを低い順から表-3 のように与え、重錘の落下高さを 1.8m までとした。なお、急速载荷実験は、表-3 の最右欄に○印を付したものについて行った。

(5) 相似則による検討

2.4 節で CFT に与えるエネルギーを決定したが、このエネルギー量について実現におけるエネルギーにスケーリングを行い、実際の土石流災害における巨礫の衝突エネルギー量との比較検討を行った。

表-3 重錘落下高さと測定へこみ率および残留変形角

肉厚 (mm)	質量 (kg)	降伏応力 (公称)(N/mm ²)	番号	落下高さ (m)	衝突速度 (m/s)	鋼管に与えた エネルギー(kN・m)	へこみ率α	残留変形角θ(°)	急速載荷
3.5	420	370	1	0.00	-	0.00	0.000	0.000	○
			2	0.50	3.13	2.10	0.012	0.287	○
			3	1.00	4.43	4.20	0.027	1.261	○
			4	1.25	4.95	5.25	0.027	1.662	-
			5	1.50	5.42	6.30	0.027	2.293	○
			6	2.00	6.26	8.40	0.027	3.669	○
			7	2.50	7.00	10.50	0.027	4.927	○
			8	2.75	7.34	11.55	0.041	6.420	-
			9	3.00	7.67	12.60	-	-	-
2.0	420	370	1	0.00	-	0.00	0.000	0.000	-
			2	0.50	3.13	2.10	0.012	1.146	-
			3	1.00	4.43	4.20	0.012	2.809	-
			4	1.50	5.42	6.30	0.012	4.930	-
			5	1.80	5.94	7.56	0.027	5.904	-

表-4 フルド相似則による相似比

物理量	次元	相似比	
長さ	L	S	4.30
重量	W	S ²	18.49
時間	T	S ^{1/2}	2.07
ひずみ	-	1	1.00
応力	FL ⁻² (WL ⁻²)	1	1.00
速度	LT ⁻¹	S ^{1/2}	2.07
加速度	LT ⁻²	1	1.00
力	F	S ²	18.49
エネルギー	FL(WL)	S ³	79.50

表-5 フルド則による実現象への適応

	実験	実験に相似則を適用 (相似比4.3)	実際の設計で用いられる値
鋼管径	139.8mm	600mm	500~800mm
鋼管長	1000mm	4.3m	4m~5m
礫重量	4.2kN	78kN(礫直径1.8m)*	100kN(礫直径2.0m)*
礫の衝突速度	3.1~7.7m/s	6.4~16.0m/s	7.0~10.0m/s
衝突エネルギー	2.1~12.6kN・m	167.0~1001.7kN・m	246.4~502.7kN・m

*礫の単位体積重量を 24kN/m³ として算定

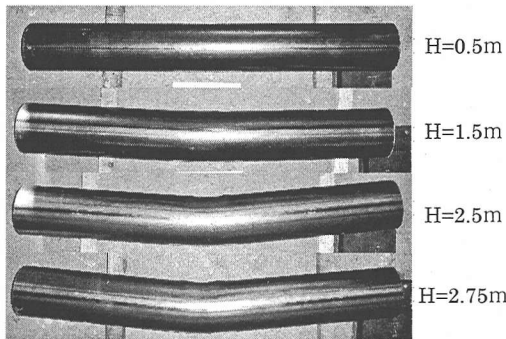


写真-7 CFTの損傷モード(t=3.5mm)

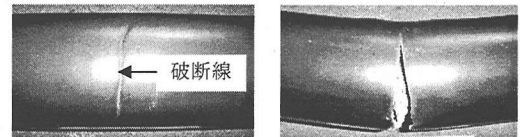


写真-8 破断線の状況 (H=2.75m)

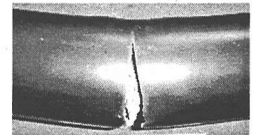


写真-9 完全に破断した状況 (H=3.0m)

本実験では重錘落下衝突実験を採用したため、重力場の影響を考慮したフルード相似則¹⁸⁾を用いて実験を実現象にスケーリングすることにした。まず、表-4にフルード則を用いた際の模型と実現象の相似比を示す。表中のSは相似比であり、今回は実現象として鋼管の直径600mm、肉厚16mmのものを想定し、1/4.3スケールで実験を行ったためS=4.3となる。表-4の一番右の列は実験値を何倍すれば実現象相当になるかを示した。つづいて表-5に実験値、相似比を用いて実現象にスケーリングした値、そして実際の設計(中空鋼管を対象とした設計)で用いられている値を示した。表-5より、礫の重量については実験からスケーリングした値が実際の設計値より少し小さいことがわかる。一方、衝突エネルギーは実験をスケーリングした方が現在の設計値の0.5倍~2.0

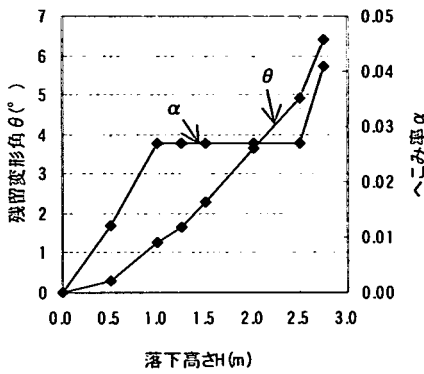
倍の値となっている。実際の設計値よりも実験で与えたエネルギーを少し大きくした理由は、CFTを用いた場合には中空鋼管より大きな衝撃荷重に耐えられるため、中空鋼管では耐えられない衝突エネルギーが作用した際の損傷の度合を見る必要があると考えたためである。以上まとめると、本実験でCFTに与えるエネルギー(重錘重量、衝突速度)は、実際の土石流による巨礫の衝突エネルギーにほぼ相当したものであり、実現象においても3章以降で示す損傷が起こりうることを示している。

3. 実験結果および考察

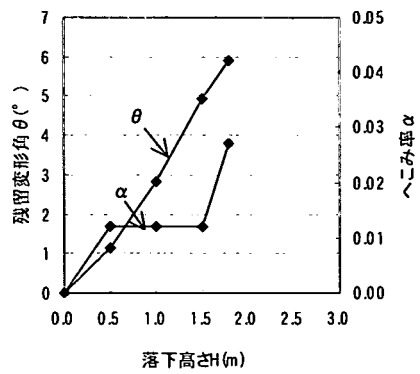
(1) 重錘落下衝突実験における結果と考察

a) CFTの損傷モード

CFTの損傷モードとしては写真-7のようなはり変形がみられた。肉厚3.5mmにおいて、落下高さ2.75mでは写真-8のように引張力が生じる鋼管中央部において破断線が発生し、さらに落下高さ3.0mでは写真-9に示すように鋼管は完全に破断し、中のコンクリートが露出した。

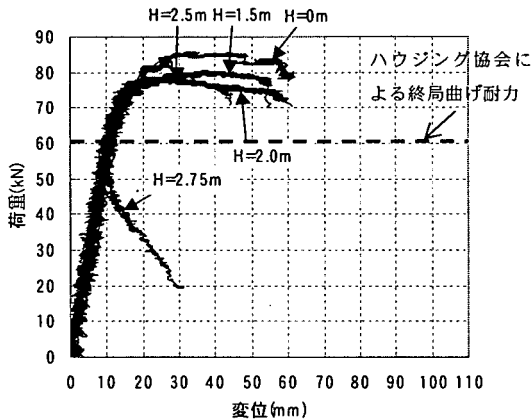


(a) t=3.5mm

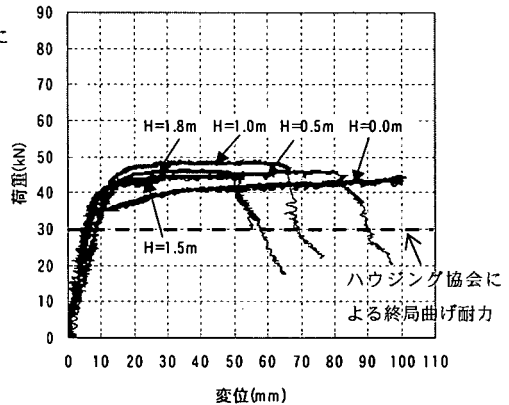


(b) t=2.0mm

図-7 へこみ率・残留変形角～重錘落下高さ関係



(a) t=3.5mm



(b) t=2.0mm

図-8 荷重～変位関係(静的載荷)

b) へこみ率および残留変形角～落下高さ関係

表-3 および図-7 に各実験ケースでのへこみ率および残留変形角を示す。図-7 より肉厚 3.5mm の場合、落下高さ 1.0m～2.5m、また肉厚 2.0mm の場合、落下高さ 0.5m～1.5m までへこみ率はそれぞれ 0.027(t=3.5mm)、0.012(t=2.0mm)と一定であることがわかる。すなわち、落下高さを高くしてもへこみ率が変化しないため、へこみ率を損傷の度合を表すパラメータとしては適当でないことがわかる。

一方、図-7 より残留変形角～落下高さ関係はほぼ比例関係にあり、CFT は衝突エネルギーの増大に応じて変形角も増大することがわかる。また、写真-7 からも落下高さに応じてはり応答としての残留変形角が大きくなっていることがわかる。よって、鋼管が損傷を受けたことを示すパラメータとして残留変形角が適当であると考えられる。

(2) 静的曲げ載荷実験における結果と考察

a) 荷重～変位関係

図-8 に静的曲げ載荷実験後の荷重～変位関係を示す。実験において CFT の終局限界を片持ちばり固定端部上縁(引張力作用側)に亀裂が生じ、充填したコンクリートが見えた状態とし、その時点で載荷を中止し、この時の変位を終局変位とした。図-8 より、両肉厚において損傷が増大しても最大荷重は無損傷の場合とほとんど変わらないことがわかる。しかし、鋼管に破断線が入った場合(肉厚 3.5mm、H=2.75m)には、その影響を受け最大荷重は急激に低下している。また、終局変位については両肉厚(特に肉厚 2.0mm)において損傷に応じ徐々に小さくなることがわかる。

b) 最大荷重について

図-9 に最大荷重～残留変形角関係を、図-10 に最

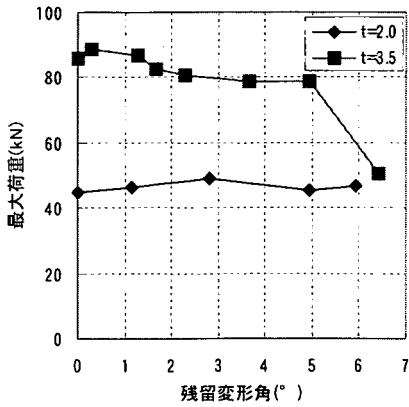


図-9 最大荷重～残留変形角関係

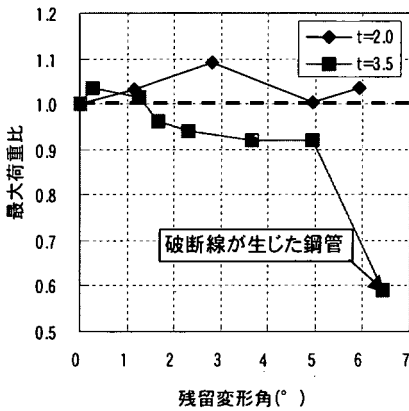


図-10 最大荷重比～残留変形角関係

大荷重比～残留変形角関係を示す。ここで最大荷重比とは、各実験ケースでの最大荷重の値を無損傷CFTの最大荷重の値で無次元化したものである。ここで最大荷重は図-8において破断により試験を中止するまでにあらわれた荷重の最大値である。図-9より肉厚 3.5mm のCFTは肉厚 2.0mm に比べて概ね 1.6～1.8 倍の耐力があることがわかる。図-10より肉厚 3.5mm では残留変形角が 5°までは最大荷重比が 0.9～1.0 とほぼ 1.0 付近で、残留変形角 6.4°(破断線が発生した CFT)では 0.6 に低下している。また、肉厚 2.0mm でも 1.0～1.2 とほぼ 1.0 付近をとり、損傷を与えても耐力は低下していない。これは、鋼材およびコンクリートの材料特性、特に降伏強度には顕著な変化が生じていないことを示唆していると思われる。

c) 残存吸収エネルギーについて

図-11 に静的載荷実験の荷重～変位曲線を終局変位まで積分した残存吸収エネルギー～残留変形角および図-12 に残存吸収エネルギー比～残留変形角関係を示す。

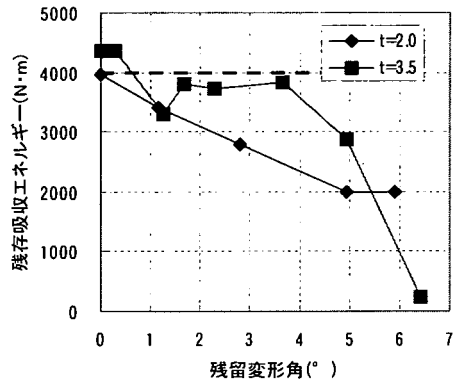


図-11 残存吸収エネルギー～残留変形角関係

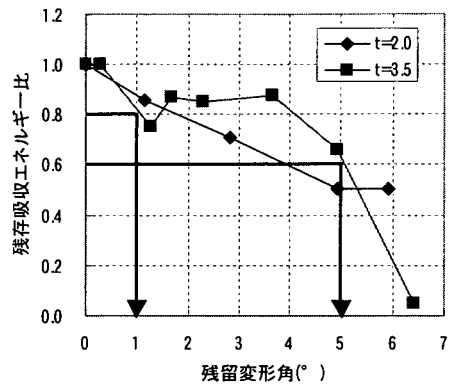


図-12 残存吸収エネルギー比～残留変形角関係

図-8の荷重～変位関係で鋼管引張線の破断によって荷重が急激に失われる変位までの面積を示し、また残存吸収エネルギー比とは各ケースでの残存吸収エネルギーの値を無損傷鋼管の値で無次元化したものである。図-11より残存吸収エネルギーについては肉厚の違いによらず残留変形角 1°までほぼ急激に低下している。図-8(a), (b)を比較してわかるとおり、肉厚 2.0mm のCFTの最大耐力は肉厚 3.5mm に比べて小さいもののじん性が大きく、終局変位が大きいことを示している。これは、径厚比が大きいと鋼管の局部座屈が発生しやすくなるためではないかと思われるが、解析による詳細な検討が必要である。さらに、図-12より肉厚 3.5mm の場合、残存吸収エネルギー比は残留変形角 1°で約 8 割程度まで低下し、5°では約 6 割まで低下している。また、肉厚 2.0mm においても残留変形角の増大に伴い残存吸収エネルギーは低下し、残留変形角 5°では残存吸収エネルギー比が約 0.5 まで低下している。これらから、損傷を受

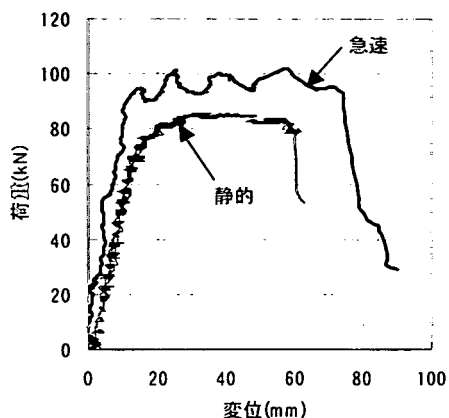


図-13 無損傷 CFT 鋼管における載荷速度の影響

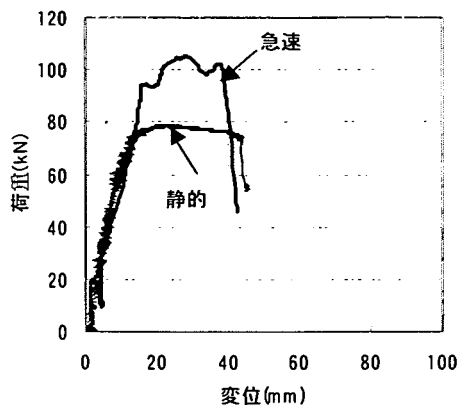
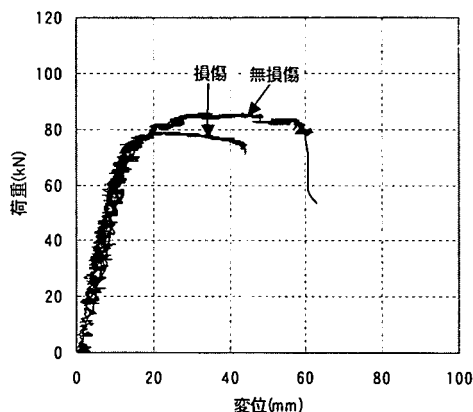
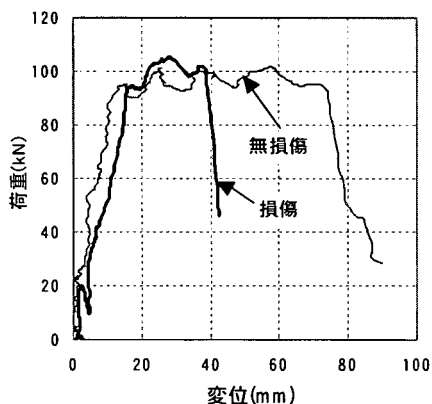


図-14 損傷 CFT 鋼管における載荷速度の影響



(a) 静的載荷の場合



(b) 急速載荷の場合

図-15 無損傷鋼管と損傷鋼管の比較

けた CFT の残存吸収エネルギーは CFT が寸法の影響を受けやすいため径厚比によるばらつきはあるものの、損傷が大きくなるにつれ徐々に小さくなる傾向にあるといっても差し支えないと考える。すなわち、損傷した CFT の最大荷重は無損傷鋼管と同程度を有しているが、残存吸収エネルギーは小さくなる、すなわち変形性能は低下することがわかった。

d) 使用限界・終局限界の定義および提案

使用限界および終局限界の検討にあたっては損傷の度合に比例する残存吸収エネルギー比で評価するのが適切と考え、ここでは肉厚 3.5mm の残存吸収エネルギー比と残留変形角の関係から検討を行った。図-12 より、残留変形角 0.28°では無損傷鋼管の残存吸収エネルギーとほとんど変わらず残留変形角 1.26°では 80%を下回っていることから 0.28°~1.26°の間に損傷が残存吸収エネルギー比に影響を

およぼす点が存在すると考えられ、仮に使用限界を残存吸収エネルギーの 80%以上を確保している状態と定義すると残留変形角 1°と提案できる。さらに終局限界の残留変形角を無損傷鋼管の残存吸収エネルギーの 60%以上を確保した状態と定義すると変形角 5°を終局限界の残留変形角と提案できる。

(3) 急速曲げ載荷実験における実験結果と考察

a) 残存耐力におよぼす載荷速度の影響

図-13 に急速曲げ載荷実験から得られた無損傷 CFT の荷重～変位関係を示す。急速載荷における最大荷重は静的載荷の約 1.2 倍になり、また終局変位も約 25%増大しており、健全な CFT においては動的の方が耐力および変形性能とも増大することが確認された。一方、図-14 は損傷した(残留変形角 5.0°)CFT の荷重～変位関係であるが、損傷を受けた

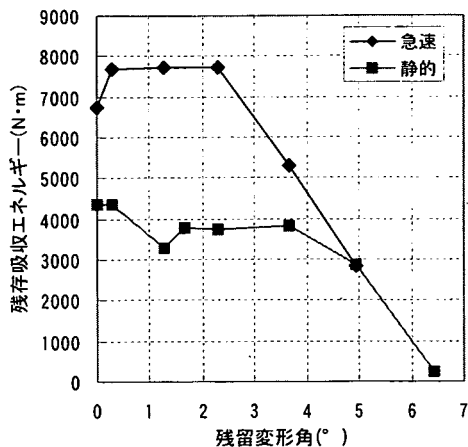


図-16 残存吸収エネルギー～残留変形角関係

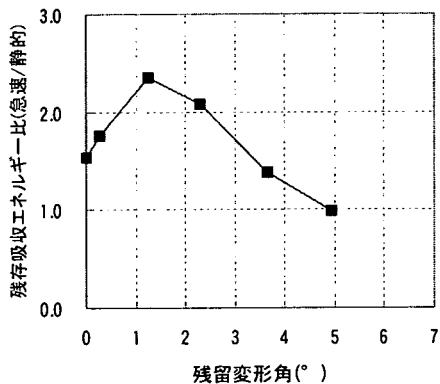


図-17 残存吸収エネルギー比(急速/静的)～残留変形角関係

鋼管の動的最大荷重は静的の約1.3倍に増大するが、終局変位は約10%低下しており、損傷したCFTにおいては動的耐力は増大するものの終局変位は低下することが認められた。黒木ら¹⁴⁾は無損傷CFTにおいて同じ傾向の結果を得ていることから、CFTの一般的な傾向ではないかと考えられる。

b) 無損傷鋼管と損傷鋼管との比較

次に無損傷鋼管と損傷鋼管(残留変形角 5°)とを比較すると図-15に示すようになる。すなわち、図-15(a)の静的の場合、損傷鋼管の方が最大荷重約6%、終局変位約30%低下するが、図-15(b)の急速になると損傷鋼管の最大荷重はあまり変化無いが、終局変位では約50%低下することがわかる。

c) 損傷(残留変形角)が残存吸収エネルギーに及ぼす影響

静的荷重の場合と同様に、急速曲げ荷重実験から得られた荷重～変位関係を終局変位まで積分し、残存吸収エネルギーを求めた。図-16に残存吸収エネルギー～残留変形角関係を、図-17に急速荷重で得られた結果と静的荷重で得られた結果の比を示す。図-16, 17より残留変形角が2°までと小さい場合、荷重速度の影響により急速荷重による残存吸収エネルギーは静的荷重の約1.5～2.5倍と非常に大きくなるのがわかるが、残留変形角が2°をこえると、荷重速度の影響が小さくなり、急速荷重による残存吸収エネルギーは静的荷重の値に近づいていくことがわかる。しかし、先に終局限界と定めた残留変形角5°においても急速荷重による残存吸収エネルギーは静的荷重のそれを下回ることなく、礫衝突の速度を考慮したとしても静的曲げ荷重実験より得た使用限界および終局限界の提案値を変更する必要がないことが

わかる。

4. 結論

本研究は、礫衝突により損傷を受けたCFTの使用限界および終局限界を定量的に評価する目的から、重錘落下衝突実験、静的および急速荷重曲げ実験を行い、損傷を受けたCFTの残存耐力および残存吸収エネルギーについて調べ、その使用限界および終局限界の値を定量的に把握しようとしたものである。本研究で得られた成果を要約すると以下のようになる。

- (1)CFTは、礫衝突による損傷の度合に応じてへこみ量は増大しないが、はり変形すなわち残留変形角は衝突エネルギーを大きくするとほぼ比例的に大きくなる。よって、損傷の度合を示す物理量として残留変形角を用いるのが妥当である。
- (2)CFTは、礫衝突による損傷を受けた後も、残存耐力は健全な場合とほぼ等しく減少傾向は見られない。しかし、すでに鋼管に亀裂が生じている場合には半分程度に急激に低下している。
- (3)残存吸収エネルギーは、残留変形角の増大に伴い減少していることから、エネルギー吸収能に及ぼす損傷の影響は大きく、損傷を受けると変形性能は低下する。
- (4)急速荷重における残存耐力は、無損傷の場合には静的荷重の1.2倍であり、損傷をした場合でも約1.3倍であり荷重速度の影響により耐力は増加する。しかし、終局変位の方は無損傷で約25%増大するのに対し、損傷鋼管では約10%低下することが認められた。
- (5)急速荷重時において、残留変形角が小さい(2°以

下)の場合、残存吸収エネルギーは静的載荷のそれよりも1.5~2.5倍と大きくなる。しかし、残留変形角が大きくなると(約5°)、残存吸収エネルギーは静的載荷の値に近づくが下回ることが認められない。

(6)急速曲げ載荷実験より、残存耐力、残存吸収エネルギーともに静的曲げ載荷実験値を下回ることではなく、礫の衝突速度を考慮したとしても静的実験値を設計値として用いれば部材としては安全側の設計であることがわかる。

以上の実験結果より使用限界および終局限界を設定するには、損傷の度合として残留変形角を用い、その値の検討にあたっては静的載荷曲げ実験で得られた残存吸収エネルギーで評価することにより下記のように提案できる。

- (i)無損傷鋼管の残存吸収エネルギーの80%以上を確保している状態を使用限界と定義する(表-1のAに相当)と使用限界は残留変形角 $\theta=1.0^\circ$ となる。
- (ii)無損傷鋼管の残存吸収エネルギーの60%以上を確保している状態を終局限界と定義する(表-1のBに相当)と終局限界は残留変形角 $\theta=5.0^\circ$ となる。

謝辞：本実験を行うにあたり、(財)砂防・地すべり技術センターおよび砂防鋼構造物研究会の皆様のご協力を得たことを付記し、ここに心から感謝の意を表します。

参考文献

- 1) (財)砂防・地すべり技術センター 鋼製砂防構造物委員会：鋼製砂防構造物設計便覧，平成13年版。
- 2) 砂防鋼構造物研究会：「鋼製砂防構造物」ガイドブック 鋼製砂防構造物の全国設置事例，平成13年
- 3) 水山高久，中西 宏，松村和樹：大口径鋼管に対する衝撃実験，新砂防，Vol.38, No.4(141)，1985.11。
- 4) 中島一義，中西 宏，井村章雄：大径鋼管の落錘式衝撃実験と衝撃解析，神戸製鋼技法，Vol.35, No.4，pp.101-104，1992。
- 5) 川井 豊，石橋正夫，山野井節雄：鋼管部材の耐力実験，落石等による衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集，pp.9-14, 1991.3。
- 6) 斎藤英明，石川信隆，大野友則，水山高久：鋼管片持ちばりの衝撃吸収エネルギーに関する基礎的研究，土木学会論文集，第386号/I-8, pp.321-328，1987.10。
- 7) 斎藤英明，大野友則，石川信隆，水山高久：局部変形を考慮した鋼管片持ちばりの衝撃吸収エネルギーに関する実験的研究，構造工学論文集，Vol.35A，pp.1057-1068, 1989.3。
- 8) 星川辰雄，石川信隆，彦坂 照，阿部宗平：半球状の重錘落下による鋼管固定はりの衝撃応答変位，構造工学論文集，Vol.40A，pp.1543-1554, 1994.3。
- 9) 星川辰雄，石川信隆，彦坂 照，阿部宗平：局部変形とひずみ速度効果を考慮した鋼管固定はりの衝撃応答変位，土木学会論文集，No.513/I-31，pp.101-115, 1995.4。
- 10) 星川辰雄，石川信隆，彦坂 照，阿部宗平：鋼管はり部材の動的終局限界に関する一考察，土木学会論文集, No.525/I-33，pp.139-152, 1995.10。
- 11) 伊藤一雄，石川信隆，川嶋幾夫，鈴木 宏：モルタル充填鋼管はりの衝撃限界吸収エネルギーに関する実験的考察，構造工学論文集，Vol.37A, pp.1581-1589, 1991.3。
- 12) 伊藤一雄，石川信隆，香月 智，鈴木 宏：コンクリート充填鋼管はりの衝撃限界吸収エネルギーに関する解析的考察，構造工学論文集，Vol.38A, pp.1553-1563, 1992.3。
- 13) 井浦雅司，折野明宏，石澤俊希：コンクリートを部分充填した円形鋼製橋脚の弾塑性挙動に関する研究，土木学会論文集，No.696/I-58，pp.285-298, 2002.1。
- 14) 香月智，黒木勇人，石川信隆，太田貞次：高速載荷を受けるコンクリート充填鋼管はりの動的弾塑性挙動に関する研究，土木学会論文集，No.696/I-58, pp.61-76, 2002.1。
- 15) 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化とそのモデル化，日本建築学構造系論文報告集，第452号，1993.10。
- 16) 上田幸雄，Sherif M.H.Rashed：損傷パイプ部材の挙動と最終強度，日本造船学会春季講演会，pp.439-448，1984.5。
- 17) 白石博文，梶田幸秀，香月智，石川信隆，松村和樹，嶋丈示：礫衝突による損傷を受けた中空鋼管の残存耐力評価実験，構造工学論文集，Vol.48A，pp.1505-1512, 2002.3。
- 18) 江守一郎，斉藤孝三，関本孝三：模型実験の理論と応用(第三版)，技報堂出版，2002.3。
- 19) 社団法人 新都市ハウジング協会：CFT 構造技術指針・同解説，1997。

(2002.6.3 受付)

EXPERIMENTAL STUDY ON THE RESIDUAL STRENGTH OF CONCRETE FILLED TUBE DAMAGED BY ROCK COLLISION

Hirobumi SHIRAISHI, Yukihide KAJITA, Satoshi KATSUKI,
Nobutaka ISHIKAWA and Kazuki MATSUMURA

This paper presents an experimental study on the residual strength of concrete filled tubes damaged by rock collision. We carried out two kinds of tests to obtain the residual strength and the residual energy absorption capacity of damaged concrete filled tubes. First, the weight dropping test was conducted to give the damage to the concrete filled tube. Second, the static and rapid speed flexural test were performed to obtain the load-displacement relation and to investigate the speed effect on the residual strength and the residual energy absorption capacity. We could propose the serviceability limit and the ultimate limit of the damaged concrete filled tube as the residual deformation angles $\theta = 1^\circ$ and $\theta = 5^\circ$, respectively.