

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評価実験

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

白石博文*, 梶田幸秀**, 香月 智***, 石川信隆****, 松村和樹*****, 嶋 丈示*****

Hirobumi SHIRAISHI, Yukihide KAJITA, Satoshi KATSUKI, Nobutaka ISHIKAWA,

Kazuki MATSUMURA and Joji SHIMA

*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)

**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)

***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)

****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)

***** (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)

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

キーワード：損傷コンクリート充填鋼管，残存耐力，変形角，残存吸収エネルギー

(Damaged CFT, residual strength, deformation angle, residual absorption energy)

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がある．この鋼製砂防ダムは直径約600mmの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，鋼管部材自身は変形（損傷）することが許容されており，その後の土石流流体力・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．

この鋼製砂防ダムの機能の維持・補修については，現地調査に基づき放置・補強・取替などの処置が決定されている．そのため，管理者にとって重要なことは土石流発生後，損傷を受けた砂防ダムに対してどのような対策（放置，補修，取替）を施すかということになる．

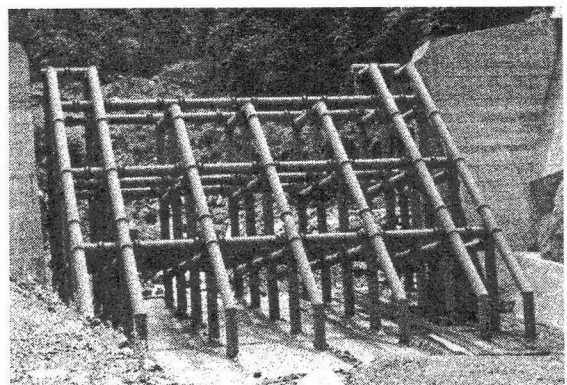
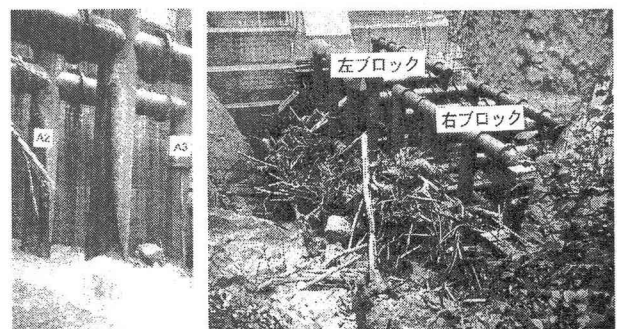


写真-1 格子形鋼製砂防ダム



(a) 最下段部

(b) 構造全体

写真-2 実被災例

表-1 損傷レベルに対する考え方

部材の状態	現行		本研究の提案		
	視認による損傷レベル	定義	判定	対策	現地調査でわかる物理量
変形なし	I	完成時と比べ機能の低下がない	健全	放置	
変形あり	II	完成時と比べ機能低下の恐れがある	使用限界	補修・補強	A
	III	次に設計荷重が作用すると機能が発揮できない	終局限界	取替	B
			損傷	補強・補修	
			破壊	取替	

表-2 コンクリート配合表

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプの範囲 (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

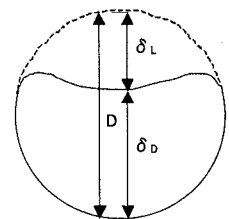
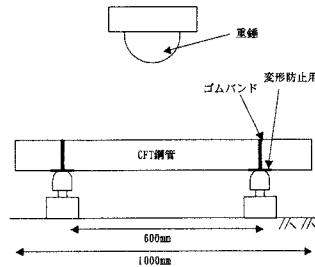
※普通ポルトランドセメント使用

一方、平成 12 年に被災した格子形鋼製砂防ダム(岐阜県阿木川)の実例をみると写真-2 に示すとおり砂防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流木や礫をせき止めていることがわかる。しかしながら、格子形砂防ダムに要求される巨礫を下流部に流出させないという性能をより高める構造として最下段部の鋼管にはコンクリートを充填し剛性を高める案が検討されている。

前述したとおり、格子形鋼製砂防ダムにおいて表-1 に示す土石流発生後の損傷を受けた鋼管部材に対する対策の決定は重要な事案である。しかしながら、過去の研究を振り返ると格子形鋼製砂防ダムの設計に重点がおかれているため健全な中空・コンクリート充填鋼管(以下 CFT 鋼管と記す)に対する研究^{1~4)}がほとんどであるため、本研究では損傷を受けた CFT 鋼管に対して載荷実験を行い、損傷の度合いが CFT 鋼管の残存耐力や残存吸収エネルギーに与える影響を検討し、表-1 に示した使用限界・終局限界の決定法について提案を行うものである。

2 実験の概要

本研究では、礫衝突による損傷を受けた CFT 鋼管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 鋼管に損傷を与え、第 2 段階として損傷を受けた鋼管に対し静的曲げ載荷



へこみ率 $\alpha = \delta_L / D$

図-1 重錘落下実験概要図

図-2 ヘこみ率の算定法

実験により残存耐力を評価した。

2.1 供試体

本実験に用いた鋼管は、直径 139.8mm、長さ 1000mm、肉厚 3.5mm および 2.0mm (径厚比 40 および 70) のものである。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 の鋼管を基準として用いた。基準鋼管より肉厚の薄い肉厚 2.0mm の鋼管を用意した理由は、将来 CFT 鋼管が導入された際、コンクリートを充填すると鋼管全体の強度は増すため径厚比の大きい鋼管が使用されることが考えられるためである。直径 139.8mm、肉厚 3.5mm の鋼管は一般構造用炭素鋼管(JIS G 3444 材質 STK400)として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、本実験用に肉厚 3.5mm の鋼管内径を切削して 2.0mm とした。そのため、実験ケースで述べるが、肉厚 3.5mm の鋼管に対しては 9 ケース行っているが肉厚 2.0mm の鋼管に対しては 5 ケースしか行っていない。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)でのコンクリートの圧縮強度は応力~ひずみ関係より 21N/mm²である。

2.2 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、図-1 に示すように、CFT 鋼管を両端単純支持させた。鋼管はりのスパン長を 600mm とし、スパン中央部に重錘が落下するように設置した。支点には図-1 に示すとおり支点部での鋼

表-3 第1段階のケースと実験結果

肉厚 (mm)	質量 (kg)	番号	落下高さ (m)	衝突速度 (m/s)	衝撃エネルギー (kJ・m)	へこみ率 α	残留変形角 θ (°)
3.5	420	1	0.00	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	1	0.00	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

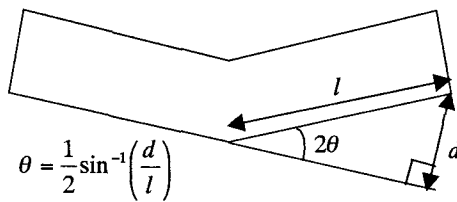


図-3 残留変形角の算定法

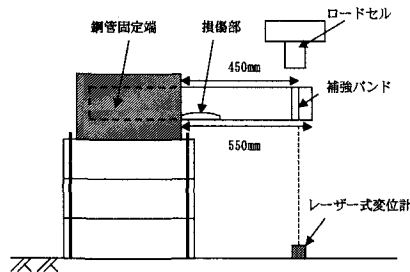


図-4 静的載荷曲げ実験概要図

管の損傷防止のためゴムシートを敷き、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。本実験の主目的は鋼管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-2に示す鋼管の残存径 δ_0 をノギスにより計測し、鋼管のへこみ量 δ_1 (局所変形量)を算定しへこみ率を求め、また図-3に示すとおりは変形により発生した変位を定規で測定し、残留変形角 θ を計算により求めた。

2.3 第2段階：静的載荷実験(残存耐力評価実験)

静的載荷実験は、図-4のように損傷部を下側(圧縮側)にし、片持ちばりによる曲げ耐力を評価する方法を採用した。損傷部の向きと荷重を載荷する向きについては鋼製砂防ダムの設計における方向とは逆であるが、礫衝突によって損傷部に引張作用が生じる方向の荷重のみが作用するとは限らず、礫が流心方向とずれて衝突する可能性もある。それらの荷重に対して、損傷を受けたCFT鋼管の残存耐力を求めるためには損傷部が残存耐力に何らかの影響を及ぼす実験を行うことが必要であるため、さらに圧縮作用を受ける方向に下向きに設置する工夫をした。

実験の状況としては、図-4に示すとおり片持ちば

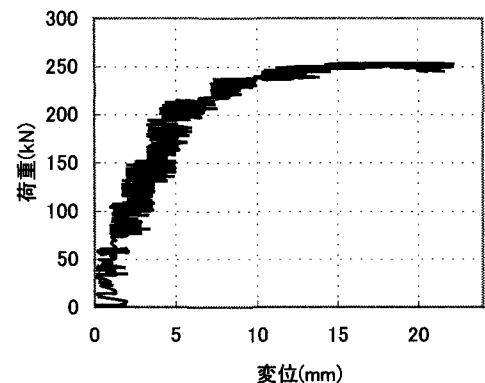


図-5 荷重～変位関係

りのスパンは550mmとし、載荷位置は固定端より450mmとした。さらに、載荷位置では鋼管断面の変形を拘束するため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、ロードセルによる載荷点荷重とレーザー式変位計による載荷点変位の2種類である。

2.4 実験ケース

(1) 基準落下高さの設定

重錘落下実験においてCFT鋼管に与えるエネルギーの基準値を設定するため、スパン600mmの両端単純支持されたCFT鋼管に対し中央載荷による静的載荷実験を行った。図-5に得られた荷重～変位関係を示す。これより、CFT鋼管が破断するまでのエネルギーは4.13kJ・mと得られた。重錘落下実験において重錘質量を420kgに設定したため保有吸収エネルギーと同じ重錘の位置エネルギーを得るためには落下高さは0.98mとなる。この値を基準値として、その後は実験室にて落下高さを適宜決定した。なお、

表-4 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	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	7.0～17.0m/s	7.0～10.0m/s

肉厚 2.0mm の鋼管は先に述べたとおり特注品であるため保有吸収エネルギーを求める試験は省略し、肉厚 3.5mm と同じ落下高さを低い順に 50cm 間隔で与えた。その結果、重錘落下高さは表-3 のとおりになった。なお、肉厚 2.0mm のとき、最高落下高さが 1.8m となっているが、これは落下高さ 1.5m の実験結果から落下高さ 2.0m では CFT 鋼管が破断し、次の静的曲げ載荷実験が行えないと判断したためである。

2.5 相似則による検討

実験を実現象へ適用するためには相似則による検討が必要であり、ここではフルード則を用いた。実鋼製砂防ダムの鋼管直径が 600mm、実験に用いた鋼管が 139.8mm であることから相似比は 4.3 となり、この値をもとに実寸相当の物理量を求めた結果を表-4 に示す。まず重錘重量については実設計における礫重量が約 100kN に対し、実寸相当重量が約 78kN とやや小さい値となっている。また、礫の衝突速度については本実験で設定した高さから得られる衝突速度(表-3)を実物相当にすると表-4 のようになる。表より実設計における礫の衝突速度は 7.0～10.0m/s であるのに対し、実寸相当は 7.0～17.0m/s となりやや上限値が大きいものの、設計における速度は範囲内に入っており概ね一致していると言える。すなわち、本実験を相似則を用いて実構造物規模におきかえた場合、ほぼ現在用いられている設計条件(荷重)を満足していると考えられる。

3 実験結果および考察

3.1 重錘落下実験(第1段階)

(1) CFT 鋼管の損傷モード

CFT 鋼管の損傷モードとしては写真-5 のようにはり変形が生じていることがわかる。肉厚 3.5mm において、落下高さ 2.75m では写真-4 のように引張力が

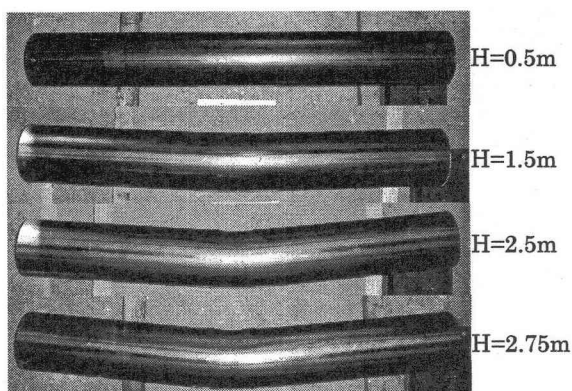


写真-3 CFT 鋼管の損傷モード(t=3.5mm)

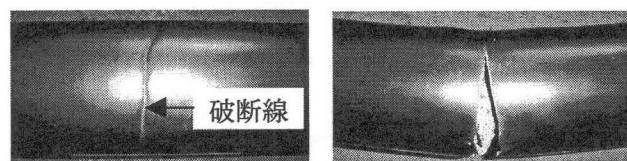


写真-4 破断線の状況 写真-5 完全に破断した状況
(H=2.75m) (H=3.0m)

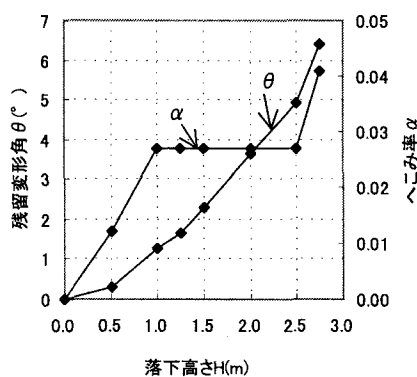
生じる鋼管中央部において破断線が発生し、さらに落下高さ 3.0m では写真-5 に示すように中のコンクリートが露出し鋼管は完全に破断した。

(2)へこみ率～落下高さ関係

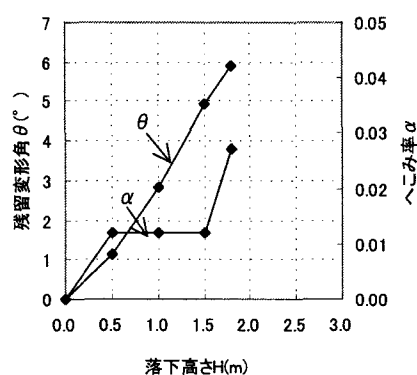
表-3 および図-6 に各実験ケースでの損傷度を示す。図-6より肉厚 3.5mm の場合落下高さ 1.0～2.5m、また肉厚 2.0mm の場合落下高さ 0.5m～1.5m までへこみ率はそれぞれ 0.027($t=3.5\text{mm}$)、0.012($t=2.0\text{mm}$)と一定であることがわかる。これは、落下高さを高くしてもへこみ率が変化しないことを意味することから、衝撃エネルギーに比例して増大する損傷のパラメータとしてへこみ率を用いることは適当でないと判断した。

(3)残留変形角～落下高さ関係

残留変形角(θ)～落下高さ(H)関係を表-3 および図-6 に示す。図-6より、残留変形角～落下高さ関係はほぼ比例関係にあり、CFT 鋼管は衝撃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-3 から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



(a) $t=3.5\text{mm}$



(b) $t=2.0\text{mm}$

図-6 ヘこみ率・残留変形角
～重錘落下高さ関係

して変形角が妥当であると考えた。

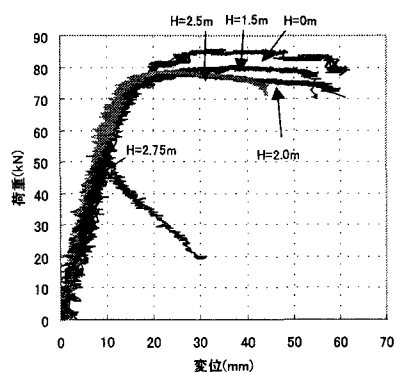
3.2 静的曲げ载荷実験(第2段階)

(1) 荷重～変位関係

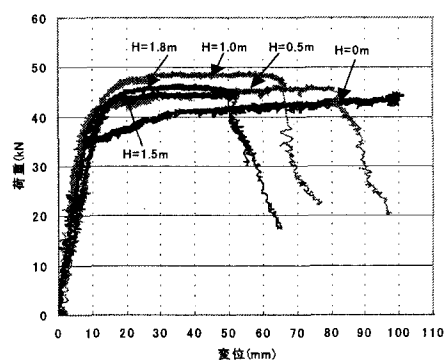
図-7 に静的载荷実験後の荷重～変位関係を示す。実験における終局限界状態を片持ちばり固定端部上縁(引張力作用側)に亀裂が生じ、中のコンクリートが見えた状態とし、その時点で载荷を中止し、この時の変位を終局変位とした。図-7 よりいずれの肉厚においても荷重～変位関係にほとんど違いは見られないが、肉厚 3.5mm の場合落下高さ 2.75m では発生した破断線の影響により最大荷重が急激に低下している。

(2) 最大荷重について

図-8 に最大荷重比～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



(a) $t=3.5\text{mm}$



(b) $t=2.0\text{mm}$

図-7 荷重～変位関係

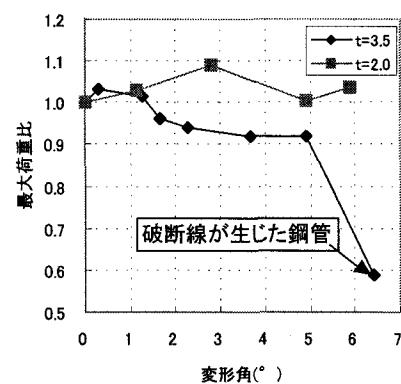


図-8 最大荷重の割合～変形角関係

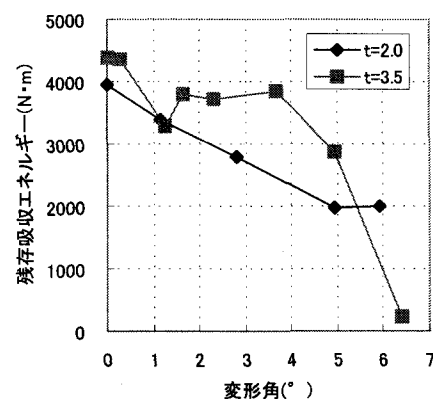


図-9 残存吸収エネルギー～変形角関係

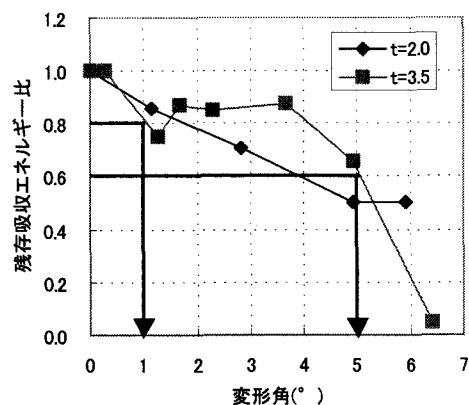


図-10 残存吸収エネルギー比～変形角関係

損傷 CFT 鋼管の最大荷重の値で無次元化したものである。図-8 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 鋼管) 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。これより、CFT 鋼管は破断線が生じるまでは受けた損傷の度合いに応じて最大荷重が低下しないことがわかる。

(3) 残存吸収エネルギーについて

図-9 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-10 に残存吸収エネルギー比～残留変形角関係を示す。ここで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-9 よりいずれの肉厚においても損傷の度合いすなわち残留変形角の増大に応じ残存吸収エネルギーは低下している。さらに、図-10 より残留変形角 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、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、損傷を受けた CFT 鋼管の残存吸収エネルギーは損傷が大きくなるにつれ徐々に小さくなることがわかる。すなわち、損傷した CFT 鋼管の最大荷重は無損傷鋼管と同程度を有しているが、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。

(4) 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いに比例する残存吸収エネルギー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と残留変形角の関係から検討を行った。図-10 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 $0.28^\circ \sim 1.26^\circ$ の間に損傷が残存吸収エネルギー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。

4 結論

本研究は損傷を受けた CFT 鋼管に対し静的曲げ実験を行い、残存吸収エネルギーを評価することにより CFT 鋼管の使用限界および終局限界を定量的に提案した。以下に本研究の成果をまとめて示す。

- (1) CFT 鋼管は礫衝突による損傷の度合いに応じたはり変形を生じるが、残存耐力(荷重)は低下せず鋼管に破断線がはいると急激に耐力は低下する。
- (2) CFT 鋼管は損傷の度合いに応じて残存耐力(荷重)は低下しないが残存吸収エネルギーは低下することから、損傷を受けると変形性能は低下する。
- (3) 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と使用限界を残留変形角 $\theta_s=1.0^\circ$ と提案できる。
- (4) 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すると終局限界を残留変形角 $\theta_u=5.0^\circ$ と提案できる。

謝辞

本実験を行うにあたり、当時防衛大学校本科学学生水野泰晴氏の御協力を得たことを付記し、ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 水山高久, 中西 宏, 松村和樹: 大口径鋼管に対する衝撃載荷試験, 新砂防, Vol.38, No.4(141), 1985.11.
- 2) 川井 豊, 石渡正夫, 山野井節夫: 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.
- 3) 齋藤英明, 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, 1989.3.
- 4) (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年度版.