

溶接構造用遠心力鋳鋼管の衝撃吸収エネルギーに関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON IMPACT ENERGY ABSORPTION CAPACITY OF CENTRIFUGALLY CAST STEEL PIPES FOR WELDED STRUCTURE

中野 明*, 森崎 充**, 前川幸次***

Akira NAKANO, Mitsuru MORISAKI and Koji MAEGAWA

* (株)クボタ 鋳鋼建材営業部技術グループ (〒103-8310 東京都中央区日本橋室町 3-1-3)

** (株)クボタ 鋳鋼建材営業部技術グループ長 (〒103-8310 東京都中央区日本橋室町 3-1-3)

***工博 金沢大学教授 工学部土木建設工学科 (〒920-0942 金沢市小立野 2 丁目 40-20)

キーワード：溶接構造用遠心力鋳鋼管，吸収エネルギー

(Centrifugally cast steel pipes for welded structure, Energy absorption)

1. はじめに

円形鋼管の衝撃吸収エネルギーに関する研究資料はモルタルやコンクリートを充填したものを含めても意外と少なく^{1)~3)}、しかも径厚比が 20 以上の大きなものについてしかない。一般に、溶接構造用遠心力鋳鋼管(以下、鋳鋼管という)は、中空でも局部座屈が発生しにくい径厚比 20 以下の厚肉のものが多く使用されている。この鋳鋼管を落石対策工の部材として使用するには、その衝撃吸収エネルギーを定量的に評価する必要がある。

そこで、本研究は、中空鋳鋼管の衝撃吸収エネルギーを実験的に研究し、これを定量的に評価し、落石対策工等の実用に供しうる資料を得ることを目的として行った。静的曲げ実験、落錘式衝撃曲げ実験およびこれらの実験結果から評価した鋳鋼管の衝撃吸収エネルギーについて報告する。

2. 実験概要

2.1 試験体と実験パラメータ

表-1 に静的曲げ実験、表-2 に落錘式衝撃曲げ実験の試験体、実験パラメータおよび機械的性質を示す。試験体は、外径φ150 の中空鋳鋼管を中心に以下の各実験パラメータを組み合わせて計画した。

径厚比は、鋳鋼管の衝撃吸収エネルギーを定量的に評価するためのパラメータである。変形拘束は、

鋳鋼管が落石防護柵の支柱や落石防止杭に使用された場合を想定し、基礎の拘束条件の違いによる影響を調べるために設けたパラメータである。具体的には、岩盤やコンクリート基礎へ根入れした場合を変形拘束あり、普通の土基礎へ根入れした場合を変形拘束なしと考えた。その他、コンクリート充填、開孔、溶接および内面加工を、各々の影響を調べるために設けた。

2.2 実験方法

(1) 静的曲げ実験

静的曲げ実験の概要を図-1 に示す。実験は、支点間距離 1.0m にセットした試験体中央部に、載荷治具をセットし、その上にロードセルを挟み、静荷重を載荷する 3 点曲げ試験を行った。測定項目は、①荷重、②試験体中央部の鉛直変位、③試験体中央より 100mm, 250mm の位置のひずみであり、各々①ロードセル、②ワイヤー式変位計、③ひずみゲージで計測した。

(2) 落錘式衝撃曲げ実験

実験概要を図-2 に示す。実験は、静的曲げ実験と同様にセットした試験体に重錘を自由落下させ衝撃載荷した。各試験体の落錘条件を表-4 に示す。測定項目は、①衝撃荷重、②試験体中央部の鉛直変位、③試験体中央から 50mm, 250mm の位置のひずみであり、各々①支点下にセットした 4 台のロードセル

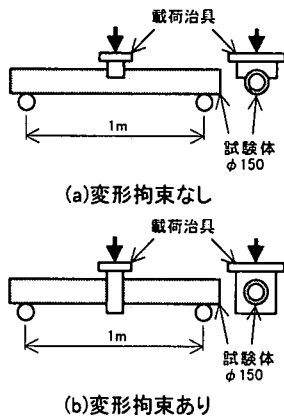


図-1 静的曲げ実験の概要

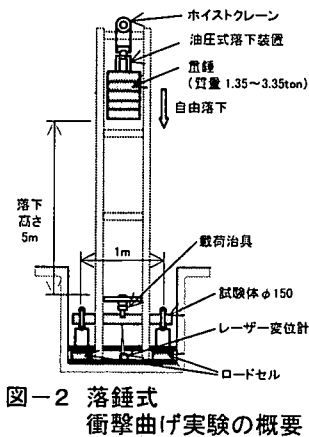


図-2 落錘式衝撃曲げ実験の概要

表-1 静的曲げ実験の試験体、実験パラメータおよび機械的性質

試験体名称	実測サイズ φD×t	実験パラメータ					機械的性質				
		径厚比 D/t	変形拘束	溶接	開孔	コンクリート充填	降伏点 σ _y (N/mm ²)	引張強さ σ _u (N/mm ²)	シャルピ吸収エネルギー (J)	伸び (%)	絞り (%)
S20	φ150.4×9.0	16.7	なし	なし	なし	なし	335.7	521.3	141	33	62
S12	φ150.6×13.4	11.2					351.9	529.4	163	31	65
S8.6	φ149.9×18.1	8.3					351.6	529.6	150	30	62
S20-C	φ149.7×7.9	18.9				あり	328.8	511.6	155	30	63
S20F	φ151.7×8.9	17.0	あり	なし	なし	なし	338.1	525.7	136	33	63
S12F	φ149.9×13.6	11.0					355.2	531.2	164	31	65
S8.6F	φ150.3×17.5	8.6					367.5	526.3	137	34	63
S8.6F-W	φ150.0×17.0	8.8		あり			365.1	522.2	147	32	66
S20F-A	φ150.7×8.6	17.5		なし	あり		367.6	535.5	129	29	64
S20F-C	φ149.9×7.8	19.2			なし	あり	353.3	531.1	162	33	58

表-2 落錘式衝撃曲げ実験の試験体、実験パラメータおよび機械的性質

試験体名称	実測サイズ φD×t	実験パラメータ						機械的性質				
		径厚比	変形拘束	コンクリート充填	溶接	開孔	内面加工	降伏点 σ _y (N/mm ²)	引張強さ σ _u (N/mm ²)	シャルピ吸収エネルギー (J)	伸び (%)	絞り (%)
I20	φ151.5×8.8	17.2	なし	なし	なし	なし	あり	342.8	526.0	129	33	61
I12	φ149.3×12.6	11.8						351.6	524.3	169	31	64
I8.6	φ150.7×18.2	8.3						376.9	527.1	142	33	62
I20-A	φ149.9×8.0	18.7				あり		374.4	531.5	125	30	67
I8.6-W	φ150.5×18.2	8.3			あり	なし		371.0	527.5	143	31	63
I8.6-Y	φ149.5×20.5	7.3			なし		なし	344.6	518.8	160	34	64
I20-C	φ150.4×8.5	17.7		あり			あり	343.0	524.8	148	33	65
I20F-C	φ149.8×8.2	18.3	あり					332.4	522.4	143	31	65

ル、②レーザー変位計、③ひずみゲージで計測した。計測データは、0.1msec 間隔でサンプリングした。

3. 実験結果および考察

3.1 静的曲げ実験

実験結果と計算値との比較を表-3に示す。変形拘束、径厚比を組み合わせた6種類の中空鑄鋼管試験体の荷重-変位関係および吸収エネルギー-変位関係を図-3に示す。ここで、吸収エネルギーは荷重-変位曲線の変位軸に関する積分値である。また、その他のパラメータの有無を比較した荷重-変位関係を、図-4(a)~(d)に示す。

(1) 中空鑄鋼管の静的曲げ挙動特性

中空鑄鋼管の静的曲げ挙動は、降伏荷重後塑性変形に入り徐々に耐力が増加する。やがて最大耐力に達し、その後徐々に耐力が低下しながら変形を続けていく。載荷点の断面形状は変形が進むにつれ局部座屈が進行し円形断面が偏平化していく。耐力低下および局部座屈の度合いは、径厚比が大きいものほど大きい。変形拘束ありの場合、鑄鋼管の局部座屈を治具で拘束しているため、当然載荷点の円形断面の偏平化が抑制され、変形拘束なしよりも耐力の低

下が小さくなる。

静的曲げ実験では試験機の都合で最大変位 250mm (変位角 27°) で終了したが、衝撃曲げ実験では、407mm (変位角 39°) まで変位しても鑄鋼管には亀裂が入らないことが確認されている。

以上から、中空鑄鋼管は、最大耐力発揮後その耐力を徐々に低下させながらも亀裂が入ることなく変形を続ける挙動特性を有していると言える。

(2) コンクリート充填の影響

径厚比が一番大きな 17 程度のものについてのみにコンクリートを充填しその影響を調べた。

変形拘束なしの場合、中空管に比べ最大耐力およびその時の変位が上昇し、耐力面では充填の効果があるが、変位角 15° 程度で鋼管下面(引張側)に亀裂が発生し耐力が急激に低下することから、変形耐力面では中空管に比べ劣る(図-4(a))。その結果、充填管の亀裂発生時までの吸収エネルギーと中空管の終局変位角までのものとはほぼ等しい(表-3)。終局変位角については後述する。

変形拘束ありの場合、拘束なしに比べ、充填管下面の亀裂発生時の変位角が 3° 程度伸びるものの、中空管の方も耐力低下が少なくなるため、耐力面、

表-3 静的曲げ実験の実験結果および計算値との比較

試験体 名称	実験値					実験終了時の 試験体の状況	計算値			実験値と計算値との比			
	降伏 荷重 ePy (kN)	最大 荷重 ePmax (kN)	最終 変位 δ^* (mm)	吸収 エネルギー eE ₁₅ ^{*1} (kN・m)	吸収 エネルギー eEu ^{*3} (kN・m)		降伏 荷重 cPy (kN)	全塑性 荷重 cPp (kN)	吸収 エネルギー cE ₁₅ ^{*4} (kN・m)	ePy cPy	eP cPp	ePmax cPp	eE ₁₅ cE ₁₅
S20	210.3	254.4	251.4 186.0	27.5	41.9	くの字変形	179.1	242.0	24.0	1.17	0.87	1.05	1.15
S12	307.8	439.3	244.7	53.1	88.8	くの字変形	256.5	356.2	34.4	1.20	0.86	1.23	1.55
S8.6	382.4	600.2	246.6	72.0	142.8	くの字変形	311.1	445.0	41.7	1.23	0.86	1.35	1.73
S20-C ^{*5}	204.4	347.5	147.4 143.2	42.1	41.3	下面に亀裂発生	155.9	209.1	20.9	1.31	0.98	1.66	2.02
S20F	228.9	317.2	237.4	39.3	72.3	くの字変形	182.2	245.8	24.4	1.26	0.93	1.29	1.61
S12F	331.4	505.0	241.0	60.8	124.3	くの字変形	258.9	360.2	34.7	1.28	0.92	1.40	1.75
S8.6F	417.8	644.3	232.4	76.8	162.6	くの字変形	320.3	456.3	42.9	1.30	0.92	1.41	1.79
S8.6F-W	407.5	655.6	236.0	78.8	165.8	くの字変形	310.8	441.6	41.6	1.31	0.92	1.48	1.89
S20F-A ^{*6}	189.2	283.4	231.7	34.2	62.8	引張側孔部に亀裂発生	189.8 (164.4)	255.7 (228.8)	25.4 (22.0)	1.00 (1.15)	0.74 (0.83)	1.11 (1.24)	1.35 (1.55)
S20F-C ^{*5}	202.8	358.8	201.0	43.8	52.9	下面に亀裂発生	166.2	222.8	22.3	1.22	0.91	1.61	1.97

注*1) 二段書きの場合は、上段が試験体上面の変位、下段が試験体下面の変位である
 注*2) eE₁₅は、変位角が15°となる変位までの吸収エネルギーの実験値で、試験体上面の荷重-変位曲線の変位軸に関する積分値
 注*3) eEuは、終局変位角に到達するまでの吸収エネルギーの実験値で、中空管の場合は30°、充填管の場合は亀裂発生時までの積分値
 注*4) 落石防護柵支柱の吸収エネルギー計算式 $cE_{15} = 2 \sigma_y \cdot Z \cdot \tan 15^\circ$ による計算値 (落石対策便覧記載)
 注*5) コンクリート充填管の計算値は、コンクリートを無視した鋼管のみでの計算値
 注*6) 二段書き上段の値は、孔の断面欠損を無視した計算値。下段()内の値は、孔の断面欠損を考慮した計算値

表-4 落錘式衝撃曲げ実験の落錘条件および実験結果

試験体 名称	落錘条件		落錘の 位置 Eh (kN・m)	試験体上面(治具)の変位			試験体下面の変位			最大 ひずみ 速度 (1/S)	試験体 温度 (°C)	実験終了時の 試験体の状況
	落錘 重量 W (kN)	落下 高さ H (m)		吸収 エネルギー Ei ^{*1} (kN・m)	比率 Ei/Eh (%)	最大 変位 δ max (mm)	吸収 エネルギー Ei ^{*1} (kN・m)	比率 Ei/Eh (%)	最大 変位 δ max (mm)			
I20	13.24	5	66.20	—	—	—	48.05	72.6	329.0	8	9	くの字変形
I12	23.05	5	115.25	—	—	—	91.50	79.4	315.5	9	10	くの字変形
I8.6	32.85	5	164.25	—	—	—	141.51	86.2	210.3	11	11	くの字変形
I20-A	13.24	5	66.20	—	—	—	53.25	80.4	406.6	2	12	くの字変形
I8.6-W	32.85	5	164.25	—	—	—	142.88	87.0	206.5	11	13	くの字変形
I8.6-Y	32.85	5	164.25	153.08	93.2	192.0	141.70	86.3	178.0	11	11	くの字変形
I20-C	13.24	5	66.20	63.25	95.5	171.0	59.62	90.1	165.5	10	12	試験体下面に亀裂発生
I20F-C	13.24	5	66.20	62.17	93.9	145.4	—	—	—	8	14	くの字変形

注*1) 衝撃吸収エネルギー Ei は、荷重-変位曲線の变位軸に関する最大変位 δ max までの積分値

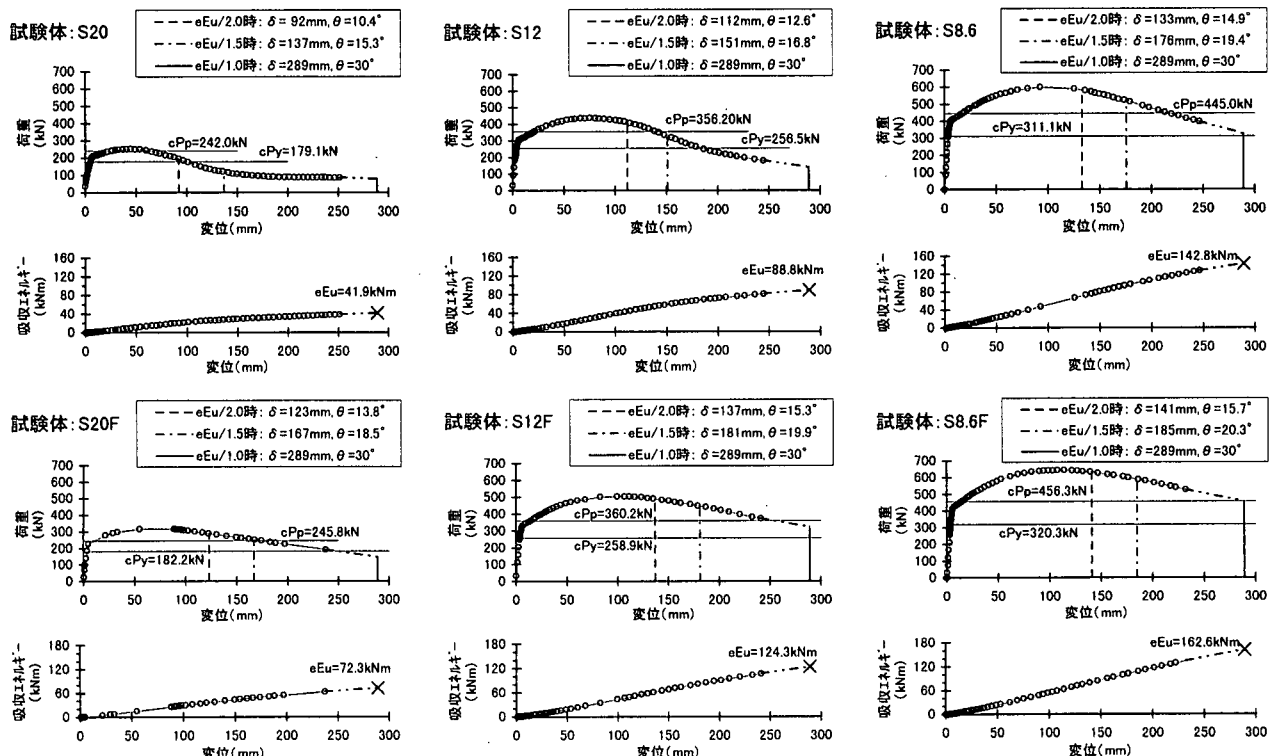


図-3 中空鋳鋼管の荷重、吸収エネルギー-変位関係

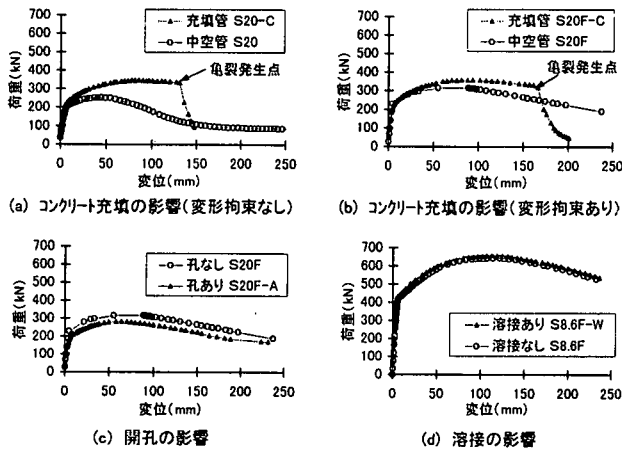


図-4 各パラメータの有無による比較

変形能力面とも充填の効果は少なく(図-4(b))、吸収エネルギー性能は中空管の方が良い(表-3)。

径厚比が小さい鋳鋼管については、中空管の耐力低下の度合いが小さくなることから、コンクリート充填の効果は減少することが予想される。

以上から、径厚比 20 以下の鋳鋼管では、基礎への根入れ条件によらず、コンクリート充填管より中空管の方が吸収エネルギー性能が良いと言える。

(3) 開孔の影響

鋳鋼管にワイヤーロープ等を取付けるために開孔した場合の影響を調べるため、試験体中央から 65mm, 365mm の位置の上・下面にφ15 の孔を設け実験した。

図-4(c)より、開孔があるとほぼ一定の耐力が低下したまま変形することがわかる。また、表-3中の実験値と計算値との比が、開孔による断面欠損を考慮すると孔なしの値にほぼ近づくことがわかる。また、後述する衝撃実験でも開孔による悪影響はないので、吸収エネルギーを評価する上では、孔の断面欠損を考慮しておけば実用上問題は無いと考える。

(4) 溶接の影響

図-4(d)及び衝撃実験結果から、溶接が鋳鋼管の吸収エネルギー性能に与える影響はないと言える。

3.2 落錘式衝撃曲げ実験

各試験体の落錘条件および実験結果を表-4に示

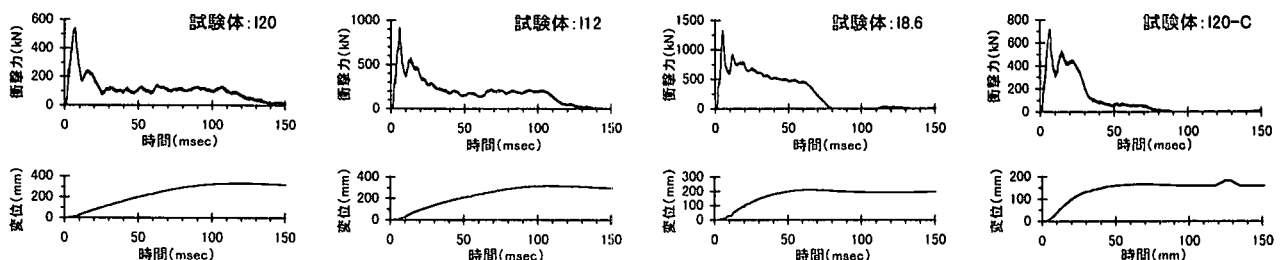


図-5 衝撃力、変位-時間関係

す。また、衝撃力-時間関係および変位-時間関係を図-5に示す。図-6には、図-5の時間軸を消去して得られる衝撃力-変位関係および吸収エネルギー-変位関係を示す。なお、図-6中には同タイプの静的曲げ実験試験体の結果も○印で併記してある。また、実験終了時の状況を写真-1に示す。

(1) 衝撃力の載荷時間とひずみ速度

図-5より、試験体の剛性が高いものほど衝撃力の載荷時間が短いことがわかる。

表-4から、試験体中央から 50mm の位置での鋳鋼管の最大ひずみ速度は孔あき管以外は 8~11/sec であり、剛性の高い試験体ほどひずみ速度も大きいことがわかる。孔あき管のみ 2/sec と小さいのは、ひずみゲージの貼付位置と孔の位置が近接していたため、孔の変形が孔近傍の鋳鋼管本体のひずみ及びひずみ速度に影響を与えたものと考えられる。

(2) 内面加工の有無の影響

本研究では鋳鋼管の持つ衝撃吸収エネルギーを定量的に評価するため試験体内面を加工したが、通常、鋳鋼管は内面加工しない状態で使用される。試験体 18.6 と 18.6-Y の結果から、内面加工の有無による影響はないと言える(表-4)。

(3) その他の因子の影響

コンクリート充填、開孔、溶接が衝撃曲げ挙動に悪影響を及ぼすことはなく、静的曲げ挙動で見られた影響と特に変わる点はなかった。

(4) 衝撃吸収エネルギー

図-6より、衝撃曲げ実験の吸収エネルギーは、静的曲げ実験のものに比べて大きいことがわかる。したがって、衝撃吸収エネルギーは、静的曲げ挙動から評価しておけば安全側である。

次章では、その評価方法および評価結果について述べる。

4. 衝撃吸収エネルギーの評価

落石防護柵等の設計では、対策工の吸収エネルギー

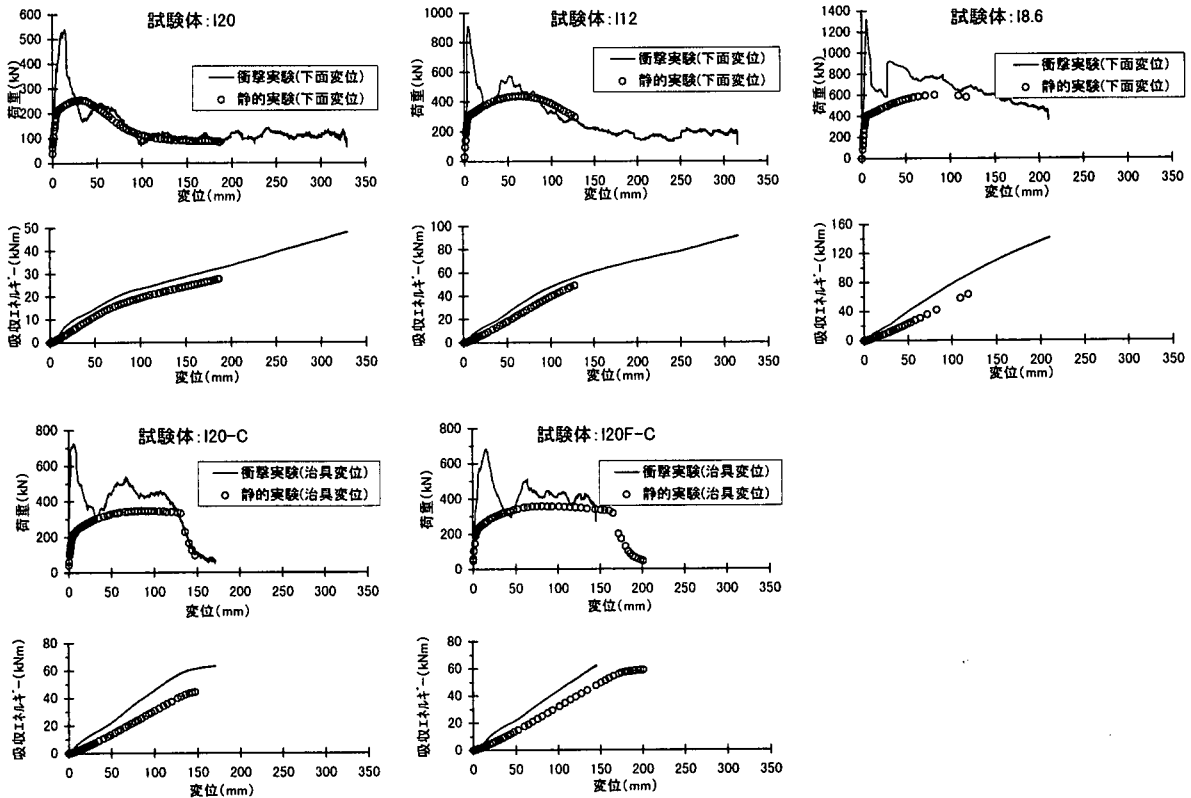


図-6 荷重、吸収エネルギー—変位関係(静的曲げ実験と衝撃曲げ実験との比較)



写真-1 衝撃曲げ実験終了時の状況(試験体 I20)

一が落石エネルギーを上回るように設計される⁴⁾。このような吸収エネルギーに基づく設計の場合、部材の持つ吸収エネルギーの評価を耐力低下する部分まで見込んで差し支えはないと考える。但し、中空鋳鋼管のような挙動特性(荷重—変位関係)を持つ部材を使用した場合、どこまで評価すべきかの判断は、対策工の設計の考え方(ex. 新設か既設対策工の補強か)やその構造(ex. 単独杭か防護柵の支柱か)等によっても異なるものと考えられ、一義的に決定するのは難しい。

そこで、ここでは実構造物として使用された場合の部材の変位角の上限値(以下、終局変位角という)を設定し、そこに到達するまでの吸収エネルギー(以

下、限界吸収エネルギーという)を算定するとともに、設計時の判断に役立つ安全率と変位角との関係も合わせて提供することとした。

4.1 片持梁形式使用時の終局変位角の設定

鋳鋼管の変形能力は実験結果から変位角で 30° 以上あるが、単独杭や防護柵の支柱のように片持梁形式で使用される場合、落石の飛び出し等を考慮して、中空鋳鋼管の終局変位角は 30° に設定することとした。

4.2 限界吸収エネルギー評価式

(1) 設計降伏荷重の評価式

鋳鋼管を支柱に使用した落石防護柵を設計するには、支柱に塑性ヒンジを形成させる力の算定が必要である。そこで、設計降伏荷重 dPy の算定式は、降伏荷重実験値 ePy と全塑性荷重計算値 cPp との比が径厚比によらずほぼ一定であることから(表-3)、次式とすることとした。

$$dPy = \alpha \cdot cPp \quad (1)$$

ここに、 $\alpha = 0.85$ (変形拘束なしの場合)

$\alpha = 0.9$ (変形拘束ありの場合)

式(1)を変形すると、次式ようになる。

$$dMy = \alpha \cdot cMp \quad (2)$$

ここに、 dMy : 設計用降伏曲げモーメント

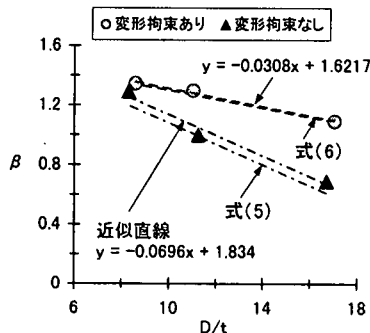


図-7 β - D/t 関係

cM_p : 全塑性モーメント ($=\sigma_y \cdot Z_p$)

σ_y : 降伏点

Z_p : 塑性断面係数

(2) 限界吸収エネルギーの評価式

終局変位角までの吸収エネルギーの実験値 eEu を降伏荷重実験値 ePy と終局変位 δu との積で割った値を β とすると、限界吸収エネルギー Eu の評価式は、式 (3) で定式化できる。

$$Eu = \beta \cdot dPy \cdot \delta u \quad (3)$$

ここに、 δu は、荷重作用位置と支点との距離を l とすると、 $\delta u = l \cdot \tan 30^\circ$ であり、降伏曲げモーメント dMy は、 $dMy = dPy \cdot l$ であるので、式 (3) を変形すると、次式で表わされる。

$$Eu = \beta \cdot dMy \cdot \tan 30^\circ \quad (4)$$

β と径厚比 D/t との関係を図-7に示す。両者の関係は、一次直線で近似でき安全側に平行移動すると、次式で表わされる。

$$(\text{変形拘束なし}) \beta = -0.07 (D/t) + 1.78 \quad (5)$$

$$(\text{変形拘束あり}) \beta = -0.03 (D/t) + 1.6 \quad (6)$$

4.3 限界吸収エネルギーの算定

前節評価式により算定した任意サイズの中空鋳鋼管の限界吸収エネルギー量の一部を参考までに下表に示す。

表-5 限界吸収エネルギー量(片持梁形式の場合)

サイズ $D \times t$	径厚比 D/t	変形拘束なし		変形拘束あり	
		設計降伏 モーメント $dMy1$ ($kN \cdot m$)	吸収 エネルギー $Eu1$ ($kN \cdot m$)	設計降伏 モーメント $dMy2$ ($kN \cdot m$)	吸収 エネルギー $Eu2$ ($kN \cdot m$)
150×9	16.7	48.0	17.0	50.8	32.3
	13	65.5	36.8	69.4	50.2
	17	81.0	54.3	85.7	66.1
300×18	16.7	384	136	406	258
	27	541	313	572	419
	34	648	435	686	529
600×36	16.7	3,070	1,087	3,251	2,065
	54	4,324	2,502	4,579	3,348
	69	5,238	3,543	5,547	4,288

なお、スケール効果についてはその影響がないことを、別目的で実施した外径 $\phi 318.5$ の試験体の静

的曲げ実験結果との比較により確認している。

この実験は、 $\phi 318.5$ の試験体を 3.2m スパンで今回と同様な荷重治具(変形拘束なし用)を用いて3点曲げ試験を行っており、最大荷重近傍で実験を終了している。荷重-変位曲線のデジタル値が残っていなかったため、今回導出した吸収エネルギー評価式の妥当性の検討は行えなかったが、ほぼ同じ径厚比の試験体は最大荷重時の変位角および最大荷重と降伏荷重との比が今回の実験結果とほぼ等しかった。

4.4 安全率と部材変位角との関係

図-3中に、各径厚比の中空鋳鋼管の限界吸収エネルギー実験値を安全率で割った吸収エネルギー値になる時の変位および変位角を示す。径厚比によって安全率と変位角との関係は若干異なっている。落石対策工設計時の目安として、以上の結果をまとめると、下表の通りである。

表-6 限界吸収エネルギーに対する安全率と部材変位角

安全率	部材変位角	
	変形拘束なし	変形拘束あり
1.0	30°	30°
1.5	15~19°	19~20°
2.0	10~15°	14~16°

5. 結び

本研究では、鋳鋼管を試験体として静的曲げ実験、落錘式衝撃曲げ実験を行い、これらの実験結果を基に、鋳鋼管の衝撃吸収エネルギーについて、これを定量的に評価した。また、実際の設計時に役立つ限界吸収エネルギーの算定およびこれらに対する安全率と部材変位角との関係も示すことができた。これにより、鋳鋼管を使用した落石対策工等の吸収エネルギーに基づく設計が簡便にできるようになった。

参考文献

- 1) 前川幸次, 吉田 博: コンクリート充填鋼管はりの静的および重錘衝撃実験, 土木学会論文集 No.513/I-31, 117-127, 1995.4
- 2) 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, 1991年3月
- 3) 星川辰雄, 石川信隆, 彦坂熙, 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, 139-152, 1995.10
- 4) 日本道路協会: 落石対策便覧, 1983