

(3) 鋼管部材の耐力実験

川崎製鉄(株)研究開発センター 川井 豊
 川鉄建材工業(株)土木技術部 石渡 正夫
 川鉄建材工業(株)土木技術部 ○山野井 節雄

1. はじめに

鋼管部材の設計に必要な局部荷重載荷時の力学的挙動ならびに崩壊までに部材が吸収できるエネルギー量に関する研究は、これまで水山、中西ら¹⁾の研究において行われたオープンダムを対象とした一連の試験のほか、海洋構造物に一般的に用いられている鋼管ジャケット部材を対象として幅広い実験的、解析的研究が行われている。しかし、既往研究の多くは、小型供試体を用いたものが多く、考慮されたパラメーターにおいても鋼管部材と落錘の質量比あるいは管径、管厚比等についての検討が必ずしも充分とはいえないことから、実大に合わせた供試体を用い、静的載荷による部材耐力実験を行った。

2. 実験

2.1 実験方法

静的載荷実験の実験条件を表-1に示す。又、供試体の諸元を表-2に示す。載荷には、1,000トン構造物試験機を用い、供試体の支間中央に集中荷重を加えた。また、供試体の両端は単純支持とした。集中荷重は、鋼塊を先端半径R = 600mmに機械加工した半球状鋼塊（以下鋼球と呼ぶ）を構造物試験機上部耐圧盤にとりつけ、鋼管中央部上面に押し付けることにより与えた。これらの概略図を図-1に示す。

載荷荷重の測定は、試験機内蔵の荷重計（測定レンジ1,000トン、500トン、100トン、20トン）を用いた。支点反力の測定は2ヶ所ある支承部のうち片方で行った。載荷時に支承部が転倒しないよう支承部下面に3個のロードセル（40t）を配した。また、荷重点変位は構造物試験機内蔵の変位計を用いて測定し、全体としてのたわみは鋼管中央部下面に配した変位計により測定した。荷重点変位は、全体としてのたわみと局部変位としてのへこみの和として測定される。このため、荷重点変位とたわみの差が局部変位（へこみ）となる。測定諸量のうち、載荷荷重は直接ミニコンに入力したが、その他の測定値はデジタル静歪計を介してミニコンに取り込んだ。これら、測定系の概略図を図-2に示す。

表-1 静的載荷の実験条件

試験 No	鋼管の外径 ϕ_o (mm)	鋼管の厚板 t_o (mm)	支点間の距離 L (mm)
S 0 1	5 0 8	1 2	4, 0 0 0
S 0 2			5, 0 0 0
S 0 3	4 0 6 . 4	9	2, 5 0 0
S 0 4			3, 0 0 0
S 0 5			4, 0 0 0
S 0 6		1 2	3, 0 0 0
S 0 7		1 6	3, 0 0 0
S 0 8		3 5 5 . 6	8
S 0 9	3, 0 0 0		

表-2 供試体（鋼管）の諸元

実験 No	降伏点 σ_y (kg f/mm ²)	引張強さ (kg f/mm ²)	伸び (%)	ヤング率 ($\times 10^4$ kg f/cm ²)
S 0 1	4.8	6.5	3.0	2.05
S 0 2	4.3	5.8	3.0	—
S 0 3	4.3	5.9	3.0	2.18
S 0 4	4.3	5.9	3.0	2.18
S 0 5	4.3	5.9	3.0	2.18
S 0 6	4.5	6.0	3.2	2.15
S 0 7	5.0	6.3	3.2	2.08
S 0 8	4.8	6.3	2.8	2.13
S 0 9	4.8	6.3	2.8	—

2.2 実験結果

(A) へこみおよび崩壊荷重

表-3は、ピーク荷重時荷重、へこみ、たわみの測定データと、現在の設計^{2) 3)}で用いられている式(1)、(2)により求められた崩壊時荷重、へこみを示す。

図-1 載荷方法

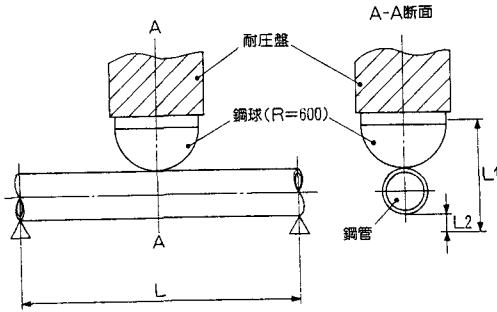
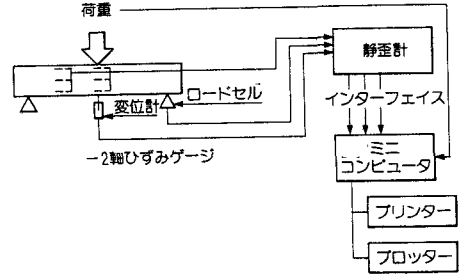


図-2 測定データの流れ



$$P_1 = \frac{1}{4} \cdot K \cdot \sigma_Y \cdot t^2 \cdot \left(\frac{\delta_d}{D} \right)^\alpha \quad \dots (1)$$

ここに、 P_1 ; へこみ反力

K ; 実験定数 (150)

σ_Y ; 鋼管材料の降伏応力

t ; 鋼管の板厚

D ; 鋼管径

δ_d ; へこみ

α ; 実験定数 (0.5)

$$P_{od} = \frac{4}{L} \cdot D^2 \cdot t \cdot \sigma_Y \cdot (\cos \beta - \beta) \quad \dots (2)$$

ここに、 P_{od} ; 鋼管の崩壊荷重

L ; 支点間距離

$$\beta = \left(\frac{\delta_d}{D} \right)^{1/2} \cdot \left[1 - \sqrt{\frac{16}{9} \left(\frac{\delta_d}{t} \right)^2 + 1} + \frac{4}{3} \cdot \frac{\delta_d}{t} \right]$$

実験により測定された値と計算により求められた値を平均値と比較すると、計算値はへこみで60%、崩壊荷重で72%となり、両者は十分一致しているとはいえない。

表-4は、式(1)、(2)に含まれる実験定数の実験値を示す。この中で降伏応力は、材料試験により求めた。 α の値は、図-3に一例を示すように、測定データを $(\delta_d / D) \sim (P / t^2)$ の関係についてまとめ両対数メモリでプロットすることにより、勾配 $1 / \alpha \approx 2$ を得た。図-4に示す K 値は式(1)にへこみ、へこみ反力

表-3

実験 No.	実 験 値			計 算 値	
	ピ ー ク 荷 重 時			崩 壊 時	
	荷 重 P_p (tonf)	へこみ H_p (mm)	たわみ T_p (mm)	荷 重 P_s (tonf)	へこみ H_s (mm)
S 0 1	91.6	192.9	74.3	62.5	121.4
S 0 2	63.1	171.2	92.2	45.2	120.4
S 0 3	57.9	183.5	43.0	39.8	105.0
S 0 4	50.7	167.7	55.4	35.2	98.8
S 0 5	41.3	140.2	77.1	29.4	86.8
S 0 6	75.8	157.6	71.4	56.0	86.2
S 0 7	122.9	132.4	79.6	92.5	75.6
S 0 8	41.5	164.3	54.7	31.2	89.4
S 0 9	36.4	134.6	54.6	28.7	79.6

の実測データを用いることにより求めた。 $-(\delta d/D)-$
 又、図中に対応する荷重 \sim へこみ曲線を破線で示した。崩壊荷重の算出にあたっては、K値として $K=K_p$ を用いた。

(B) 吸収エネルギー

載荷荷重がピーク荷重の80%に低下した状態を供試体(鋼管)が破壊したと定義し、それまでに入力されたエネルギーと吸収されたエネルギーを求めたものが表-5である。又、供試体のたわみが弾性限界時にたわみの20倍に至った状態を破壊と定義し、それまでに入力されたエネルギーと吸収されたエネルギーを求めたものが表-6である。表中のへこみ、たわみ、偏平化の各吸収エネルギーは図-5に示される変位すなわちへこみ、たわみ、偏平化に対応している。ここで偏平化とは鋼管の変形過程をモデル化することにより次のように定義した。変形の初期には鋼管上面に局部変位としてへこみが発

生ずる。荷重の増加に伴ってへこみが一定限界をこえて、大きくなると、鋼管が荷重をささえることができなくなり崩壊のはじまる。このとき鋼管上面のへこみは進展することはないが、鋼管下面の局部変位として偏平化のはじまる。この偏平化は試験終了後の供試体形状を実測することにより確認した。

表-7は、へこみ、たわみ、偏平化に対する各吸収エネルギーを実験S01～S09の平均値として求めたものである。偏平化吸収エネルギーを考慮すれば、入力されたエネルギーと吸収されたエネルギーの収支が非常に良くなっていることが分る。

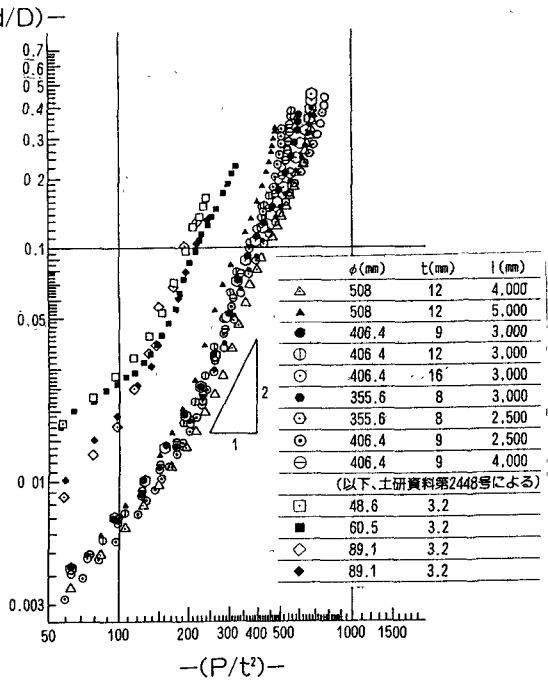


図-3 $(\delta d/D) \sim (P/t^3)$ 曲線

表-4

実験 No	降伏応力 σ_y (kg/mm ²)	式(1)におけるK値		式(1)における α 値
		ピーク荷重時		
		K_p	最大値 K_{max}	
S01	4.8	7.4	11.7	0.5
S02	4.3	6.0	10.5	0.5
S03	4.3	9.0	12.6	0.5
S04	4.3	8.2	12.5	0.5
S05	4.3	7.3	12.4	0.5
S06	4.5	7.5	12.2	0.5
S07	5.0	6.7	12.5	0.5
S08	4.8	8.1	11.7	0.5
S09	4.8	7.9	11.6	0.5

図-4 K値 (実験No S01)

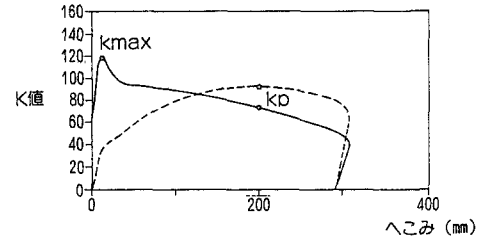
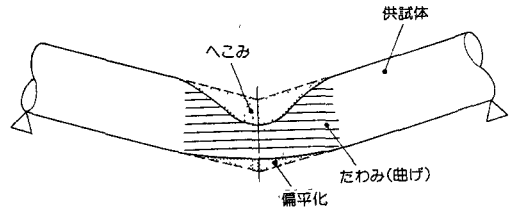


図-5 供試体の変形モデル



3. 考察

(A) 崩壊荷重

へこみ反力を求める式(1)において、実験定数としての α 値は、既往のもの($\alpha=0.5$)とよく一致している。しかし、 K 値は $K=70\sim 80$ となり既往の値の約 $\frac{1}{2}$ となっている。又、崩壊荷重に関しても計算値は、実験値に対して約72%と約30%の誤差を生じている。これは、式(1)、(2)が導かれた解析モデルが図-6に示されるようなくさびによる線状載荷を対象としているのに対し、本実験では載荷面が球状であるという載荷条件の相違によるものと考えられる。即ち、式(1)、(2)のモデルでは、支点間距離は L であり、たわみは $a-a$ 断面の断面係数により規定されている。一方、本実験は、図-7に示されるように球体を用いた載荷であり、支点間距離は $l=L-\Delta L$ で、たわみは b_1-b_1 又は a_1-a_1 断面の断面係数により規定されている。実験終了後、供試体の形状を観察すると9ケースとも図-8に示すように中央部で崩壊しており、 b_1-b_1 断面ではなく a_1-a_1 断面の断面性能により規定されているものと判断される。

図-6 くさびによる載荷

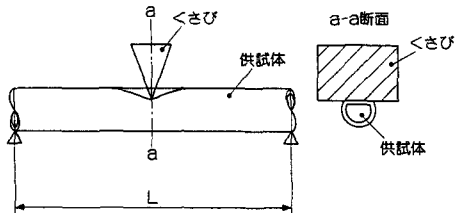


図-7 球体による載荷

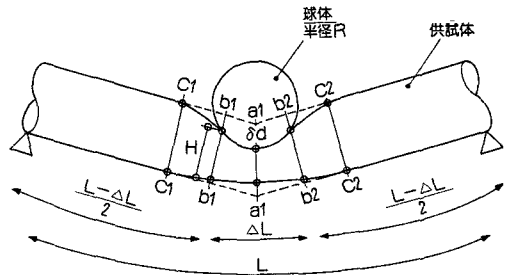


表-5 ピーク荷重の80%時における吸収エネルギー

実験 No	吸収エネルギー (tonf・cm)				入力されたエネルギー (tonf・cm)
	へこみ	たわみ	偏平化	合計	
S 0 1	1375.3	1897.4	925.5	4198.2	4197.5
S 0 2	858.6				
S 0 3	790.6	827.3	511.8	2129.7	2130.0
S 0 4	653.2	930.1	577.4	2160.7	2158.9
S 0 5	457.8	787.9	256.8	1502.5	1503.8
S 0 6	939.4	1637.5	683.2	3260.1	3263.3
S 0 7	1309.0	3420.8	1184.8	5914.6	5915.9
S 0 8	521.6	552.9	220.8	1295.3	1295.0
S 0 9	374.8	523.0	208.7	1106.5	1106.8

表-6 弾性限界たわみの20倍時における吸収エネルギー

実験 No	吸収エネルギー (tonf・cm)				入力されたエネルギー (tonf・cm)
	へこみ	たわみ	偏平化	合計	
S 0 1	1375.3	1004.5	218.1	2597.9	2534.7
S 0 2	858.6				2178.1
S 0 3	790.6	278.0	32.9	1101.5	1141.4
S 0 4	653.2	348.2	55.1	1056.5	1107.5
S 0 5	457.8	506.0	106.2	1070.0	1122.7
S 0 6	939.4	534.3	28.0	1501.7	1460.0
S 0 7	1309.0	950.0	43.0	2302.0	2249.4
S 0 8	521.6	254.9	26.5	803.0	765.7
S 0 9	374.8	322.1	76.1	773.0	746.0

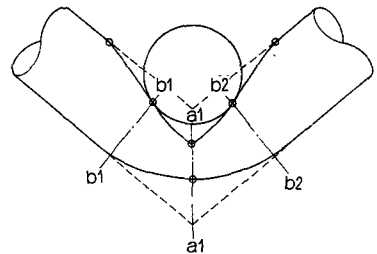


図-8 供試体の最終形状

図-7 球体による載荷

項目	ピーク荷重時の80%時	弾性限界たわみの20倍時
たわみ+へこみ	79.1	95.0
偏平化	20.8	5.4
合計	99.9	100.4

そこで、式(2)を下記に示す式(3)に書き直す。

$$P_{od} = \frac{4}{\ell} \cdot \sigma_Y \cdot Z \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 P_{od} ; 崩壊荷重

ℓ ; 有効支点間距離

σ_Y ; 供試体の降伏応力

Z ; 供試体の有効断面係数

表-8

ケース	ℓ	Z
1	L- Δ L	Z_{a1} (式(2)と同じ)
2	L- Δ L	$Z_{a'1}$
3	L- Δ L	Z_{b1}
4	L- Δ L	Z

式(3)において、 ℓ および Z を表-8に示す 4 ケースについて求め、式(1)、(3)により崩壊荷重を求めたものが表-9である。表中において式(2)とあるのは式(1)、(2)を用いた場合である。

ここで、 Z_{a1} ; 図-7において、 $a_1 - a_1$ 断面の断面係

$Z_{a'1}$; 図-7において、 $a_1 - a_1$ 断面が楕円に偏平化したと仮定した場合の断面係数

Z_{b1} ; 図-7において、 $b_1 - b_1$ 断面が厚さH (実測値) の楕円に偏平化したと仮定した場合の断面係数

Z ; 規格値としての断面係数

表-9でケース1において精度が改善されたことが分かる。しかしながら、測定データに比して計算結果は、約20%小さく、設計に用いる場合、安全性に問題が残る。安全側の設計で、しかも最も精度が良いのはケース2ということになる。

(B) 吸収エネルギー

本実験では、極限吸収エネルギーを求めておらず、破壊の定義を論ずることはできない。しかしながら、既往定義における吸収エネルギーは、偏平化吸収エネルギーを考慮することにより、精度が著しく向上することがわかった。従って、実験終了後、供試体の形状を測定することにより、へこみ、たわみ、偏平化による各吸収エネルギーを精度よく算定することができる。

一方、透過型ダム設計毎に部材の耐力試験を行うことは困難であり、設計手法の実用性を考慮に入れて吸収可能エネルギーは、次式より求めるものとする。

$$E_a = P_p \cdot \delta_c \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 E_a ; 吸収可能エネルギー

P_p ; 崩壊荷重又はピーク荷重

δ_c ; 破壊に至る変位

表-9

実験 No	崩 壊 荷 重 (tonf)					
	実 験 値	計 算 値				—
		式(2)	ケース1	ケース2	ケース3	
S 0 1	91.6	62.5	67.1	88.6	136.8	153.5
S 0 2	63.1	45.2	47.7	62.2	94.2	102.4
S 0 3	57.9	39.8	44.0	60.2	113.9	121.0
S 0 4	50.7	35.2	38.2	51.6	91.2	100.3
S 0 5	41.3	29.4	31.2	40.6	—	66.0
S 0 6	75.8	56.0	61.5	79.0	123.6	142.9
S 0 7	122.9	92.5	102.0	123.1	167.8	189.7
S 0 8	41.5	31.2	34.3	46.7	92.2	98.3
S 0 9	36.4	28.7	31.2	41.5	70.3	79.1
平 均	100%	72.4	78.7	102.1	172.3	181.2

ここで、破壊の定義として、「弾性限界時たわみの20倍」を例にとって考えてみる。式(1)、(2)より求まる崩壊荷重 P_p を用いて式(4)により吸収可能エネルギーを求めたものが表-10の(1)+(2)列である。これによると、入力エネルギーに対して吸収可能エネルギーは平均で約50.8%となっている。これは、エネルギーに関しては、安全側の値になるが、崩壊荷重に関しては、計算値に比して、測定データは約1.4倍となり、ダム構造体の安定性に問題を残すことになる。

表-10の(1)+(3)列は、式(1)および式(3)(ケース2)を用いて崩壊荷重および吸収可能エネルギーを求めたものである。計算結果は著しく改善されており、エネルギー吸収体の設計に際し、式(1)および式(3)(ケース2)を用いるのが実用上適当と考えられる。

式(3)(ケース2)を式であらわすと次のようになる。

$$P_{\circ d} = \frac{4}{\ell} \cdot \sigma_v \cdot Z \quad \text{----- (5)}$$

$$\ell = L - \Delta L \quad \text{----- (6)}$$

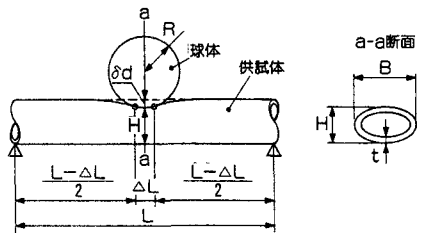
$$\Delta L = 2 \cdot \sqrt{R^2 - (R - \delta_d)^2} \quad \text{----- (7)}$$

$$Z = \frac{\pi}{64} \cdot \{ H^3 \cdot B - (H - 2t)^3 \cdot (B - 2t) \} \cdot \frac{H}{2} \quad \text{(8)}$$

$$H = D - \delta_d \quad \text{----- (9)}$$

$$B = \frac{1}{2t} \{ D^2 - (D - 2t)^2 - 2tH + 4t^2 \} \quad \text{----- (10)}$$

図-9 球体載荷による崩壊モデル



- | | |
|---------------------------|------------------------|
| ここに、 $P_{\circ d}$; 崩壊荷重 | R ; 球体の半径 |
| ℓ ; 有効支点間距離 | δ_d ; へこみ |
| σ_v ; 供試体の降伏応力 | H ; へこみを生じた供試体中央部の高さ |
| Z ; 供試体の有効断面係数 | B ; へこみを生じた供試体中央部の幅 |
| L ; 支点間距離 | D ; 供試体(鋼管)の径 |
| ΔL ; 球体のめり込み幅 | t ; 供試体(鋼管)の板厚 |

表-10

実験 No.	実験値		計 算 値				
	P_1 (tonf)	E_1 (tonf·cm)	(1) + (2)		(1) + (3)		
			P_2 (tonf)	E_2 (tonf·cm)	δ_d (cm)	P_3 (tonf)	E_3 (tonf·cm)
S 0 1	91.6	2534.7	62.5	1255.7	24.4	88.6	2504.6
S 0 2	63.1	2178.1	45.2	1120.8	22.8	62.2	1990.4
S 0 3	57.9	1141.4	39.8	487.5	24.0	60.2	1279.5
S 0 4	50.7	1107.5	35.2	497.3	21.2	51.6	1118.8
S 0 5	41.3	1122.7	29.4	564.0	16.6	40.6	995.1
S 0 6	75.8	1460.0	56.0	762.9	17.2	79.0	1531.2
S 0 7	122.9	2249.4	92.5	1278.1	13.4	123.1	2181.6
S 0 8	41.5	765.7	31.2	393.9	20.0	46.7	934.7
S 0 9	36.4	746.0	28.7	428.7	16.6	41.5	858.9

4. おわりに

実物大の鋼管の耐力実験を行ない、得られたデータを用いて鋼管製エネルギー吸収体に巨礫が衝突するという状況により適した計算式を導くことができた。

引用文献

- 1) 水山高久, 中西 宏, 松村和樹: 大口径鋼管に対する衝撃実験, 新砂防, Vol. 38, No. 4 (141) 昭60. 11.
- 2) 財砂防・地すべり技術センター: 鋼製砂防構造物設計便覧 昭和62年版
- 3) ELLINAS C.P., Ultimate Strength of Damaged Tubular Bracing Members, J. Structural Division, ASCE, 1983.