

I-16 繰返応力を受けるコンクリート充填鋼管の耐荷力

北見工業大学	正員	大島 俊之
北見工業大学	正員	三上 修一
北海道開発局		池田 浩康
日本大学	正員	能町 純雄

1. まえがき

本研究では、氷海域構造物の一つである防水堤構造を対象として、その構造要素であるコンクリート充填鋼管（図1）の曲げモーメントに対する耐荷力特性を検討する。

氷海域構造物の設計は一般に次節で概説するように氷と構造物の相互作用が複雑で、未知の点も多く、設計においては現状では安全側を考えて氷圧力を大きめに見積り、構造要素各部もそれに従った設計となっている。したがって氷と構造物の相互作用をより実際に近い状態で解析するためのデータが必要となり、本研究はこのうち構造要素の耐荷挙動を明らかにすることを目的としている。

コンクリート充填鋼管に関する研究は一般に合成構造の一種として古くから研究されてきているが、^{1), 2)} 最近、橋脚の一種としての研究も行なわれている。^{3), 4)}

コンクリート充填鋼管が曲げモーメントを受ける場合、充填コンクリートがどのような挙動を示すか複雑である。内部のコンクリートは載荷直後、中立軸より下の範囲に曲げひび割れが入り、その後、その下の部分は曲げ抵抗には寄与しない非軸対称構造となり、以後複雑な挙動を示すことになる。本論文では文献に引き続き、その後の実験と解析を含めて報告する。

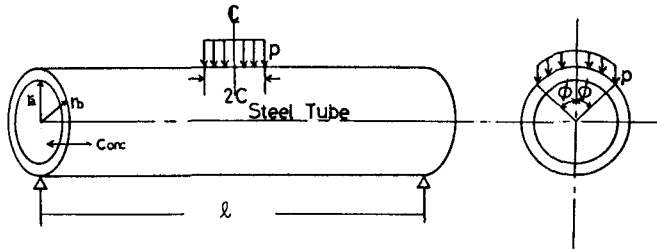


図1 コンクリート充填鋼管

1. Type of Structure

A. Materials

- (1) Steel Structure
- (2) Concrete Structure
- (3) Composite Structure

B. Main Structure

- (1) Vertical Cylinder
- (2) Inclined Cylinder
- (3) Island

2. Estimation of Ice Pressure

(1) Modelling of ice behavior

- a. Visco-elastic
- b. Elastic-plastic
- c. inhomogeneous

(2) Strain rate

- a. Creep
- b. Impluse
- c. Moving load

(3) Classification of Failure

a. Failure pattern

- (1) Bending
- (2) Buckling
- (3) Crushing

b. Stress distribution

- (1) Aspect ratio D/h
- (2) Inclination
- (3) Adhesion

c. Breaking condition

- (1) Triaxial test
- (2) Yield criterion

3. Variable Parameter

- (1) Location of Ice
- (2) Temperature
- (3) Strain Rate
- (4) Brain Volume

図2 氷海域構造物の設計

2. 氷海域構造物の設計

氷海域構造物の設計においては考慮すべき事項が非常に多く、未知の点も多い（図2参照）。

構造物の種類は鋼構造、RC構造、合成構造などが考えられ、氷圧力の作用方向と構造物の角度により直立構造、および傾斜構造が考えられている。

また、氷圧力の予測においては、氷と構造物の相互作用に関して次のような要因により予測値は大きく異なる。

まず氷の変形特性として粘弾性的性質があり、また破壊の際の破壊条件の設定にいろいろな考え方がある。さらに海水はブラインの存在や発達経過から均一材料ではなく、直交異方性体に近い。また氷の変形速度（歪速度）によっても相互作用は大きく変化し、長期荷重挙動と衝撃性荷重挙動では大きく異なる。さらに構造物の半径と氷厚の比（Aspect ratio）によっても氷の変形パターンが変化し、氷圧力の予測値に影響する。さらに以上の変動要因は、氷の生成条件の違いや荷重作用時の水温などによってもその影響程度が変化する。このようなことから氷海域構造物の設計における氷と構造物の相互作用については検討すべき点が多い。

3. コンクリート充填鋼管の実験概要

実験供試体寸法や実験の荷重装置、計測状況については文献で既述しているが、ここではこれらの内容を含めて新たためて実験の概要について説明する。

実験供試体は外径 216mm，内厚 6mm，長さ 2m の鋼管供試体（SS41）に $\sigma_{ck}=240$ kgf/cm²， $d_{max}=25$ mm，スランプ 10 cm，空気量 5%， $W/C=0.45$ などを配合条件とするコンクリートを充填したものである。コンクリートの材料試験結果より、圧縮強度 σ_c と接線弾性係数 E_c （および $n = E_s/E_c$ ）を求め、表1に示している。いずれも配合の強度は満足している。供試体個数はコンクリート充填鋼管3体、鋼管のみの供試体1体を用意した。供試体番号と試験項目を表1に示している。表中のTest 1，Test 2，Test 3，Test 4 の分類は図4に示しており、コンクリート充填鋼管の供試体 No 1と No 2について断面方向に回転することにより想定ひび割れ位置を回転し、鋼管中に生じる応力を正負の

繰り返しとなるように荷重した状況を示している。また個々の実験項目について4回の荷重と除荷の繰り返し荷重を行ない、第4回目に最大耐荷力値となるまで負荷する方法によった。荷重荷重装置は長軸方向に 2C-20 cm，円周方向に $2\Phi=90^\circ$ の分布面積となる器具を用いている。供試体は両端単純支持となるよう支持されており、荷重は支間中央に荷重している。（ $2C/l=0.1$ ）

表1 実験項目

項目	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	σ_c (kgf/cm ²)	E_c (10 ⁵) (kgf/cm ²)
Conc.-filled Pipe	1 1-1	1-2	1-3	1-4	293	1.71 (12.3)
	2 2-1	2-2	2-3	2-4	306	2.11 (10.0)
	3 3-1				255	1.68 (12.5)
Steel-Pipe	0 0-1					
平均値	$n=E_s/E_c$				285	1.83 (11.5)

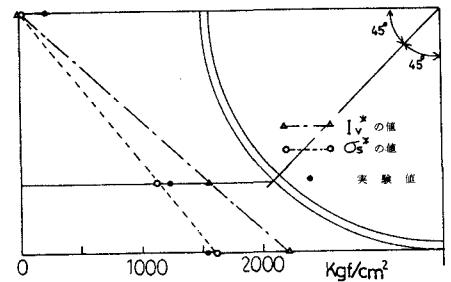


図3 応力分布の比較（ $L/2$ ）

4. 繰返し応力を受けるコンクリート充填鋼管の実験結果と解析

実験結果のうち、鋼管表面の応力分布の変化の例を表2に示した。

表3は No1 の供試体について

Test 1, Test 2, Test 3, Test

4 と実験を繰返した時、支間中央

$\ell/2$ 点 (載荷点直下) の中央面

より下側の応力分布3箇所と 5ℓ

/8 点の中央面およびその上下2箇所

所づつの合計5箇所による応力分布を表にし

たもので、荷重が 10tf と 13 tf の二つの場

合についての結果を示している。全体的傾向

としては Test 1 と Test 2 の応力の値は

ほぼ近似している。また下縁では Test 2 の

値の方が Test 1 の値より小さく出ており

Bauschinger 効果がみられる。次に Test 3,

Test 4 となるにつれて下縁応力は大きくなり、

さらに Test 4 では中立軸は

中央面よりやや下側になっている。

Test 4 の場合には支間中央断面

でひび割れが入ることになり、支

間中央の下縁応力の値は 10 tf の

場合ですでに降伏点近くに達して

いる。表3および図3には支間中

央下側断面の応力分布について理

論計算値と実験値の比較を示して

いる。表3において (1), (2)

(6) の値はそれぞれ初等はり理

論による値である。(2) の I_v の値

は鋼管とコンクリートの合成断面 (

コンクリート全断面考慮) による断

面二次モーメントによる値, (1)

の I_v^* の値は (2) の計算でコン

クリートの圧縮部分 (上半分) のみを

考慮した合成断面による値である (

この時 $n=11.5$ を用いている)。

3) の FPM の値は、鋼管とコン

クリートの全断面有効として有限プリ

ズム法により計算した結果である。こ

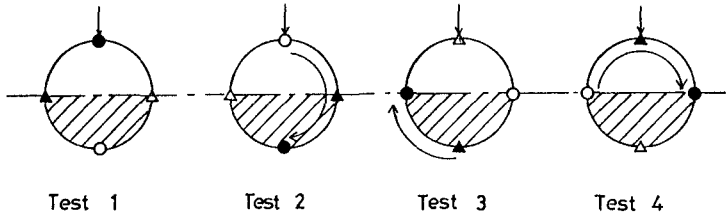


図4 供試体の回転状況

表2 支間中央下縁の応力分布の比較

ψ	Conc.-filled Pipe				Steel-Pipe	
	(1) I_v^* Ac/2 有効	(2) I_v Ac 有効	(3) FPM σ_s^p (Case 1)	(4) σ_s^*	(5) 実験値	(6) 初等はり理論 σ_s^*
0	2	0	7	4	235	0
$\pi/4$	1573	1307	543	1146	1257	1749
$\pi/2$	2223	1848	765	1619	1549	2473
$I_v(\text{cm}^4)$	2431	2923				2184

表3 繰返し応力による鋼管応力分布の変化

Test		10 tf					13 tf				
		1	2	3	4	理論値 σ_s^*	1	2	3	4	理論値 σ_s^*
$\ell/2$	0	235	318	95	-29	4	361	576	149	-42	5
	$\pi/4$	1257	1033	756	1033	1146	1812	1790	1145	2202	1490
	$\pi/2$	1549	1264	1680	2644	1619	2269	2140	2675	4414	2105
	$3\pi/4$	-974	-889	-1053	-1200	1208	-1299	-1314	-1430	-1687	1570
$5\ell/8$	$-\pi/2$	-632	-588	-713	-897	854	-841	-750	-968	-1259	1110
	0	134	95	48	0	3	211	162	50	-7	4
	$\pi/4$	930	788	701	983	860	1276	1135	923	1367	1118
	$\pi/2$	1284	1143	967	1322	1214	1773	1718	1254	1835	1578

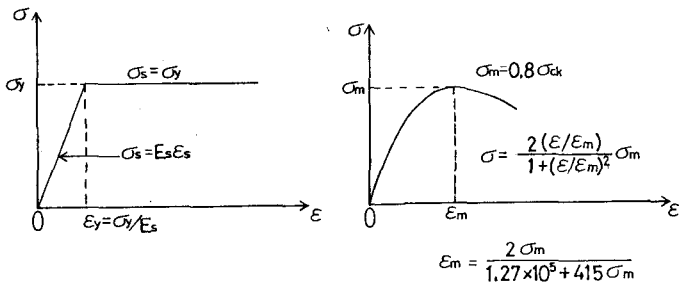


図5 鋼管とコンクリートの応力-ひずみ関係

の解析では初等はり理論では考慮していない応力分布の三次元的影響、特に圧縮縁における横断面方向（半径方向および円周方向）のコンクリートと鋼管の相互作用を考慮している点が異なる。またこの FPM の解析において鋼管とコンクリートの境界面でせん断力を伝達しないモデル（Case II という）についても計算を行なったが、この場合は Case I の場合より鋼管の応力は約 1 割ほど小さくなり、コンクリートの負担が増える結果となった。たわみは応力の場合ほどの差は生じない。（4）の σ_s の値は、以上（1），（2），（3），（6）の計算方法に対する考察から、実際にはコンクリートの引張部（下縁）では、鋼管内部での相互作用が小さいものと考えられるので、極端な場合としてコンクリート断面を無視すると鋼管のみの断面となることから実用計算値として、（3）の FSP の値 σ_s と（6）の鋼管のみののはりの初等理論値 σ_s を平均化した

$$\sigma_s^* = 0.5 (\sigma_s^p + \sigma_s^o) \tag{1}$$

なる値を示している。（5）の実験値と（4）の値はほぼ近似しているものと思われる。

5. 定和分変換を応用したCDCs解析

CDCs (Column Deflection Curves) 法は材料の応力ひずみ曲線をもとに軸方向圧縮力、曲げモーメントからはりの曲率を求め、スパン方向のいくつかの分割点の断面でつりあい条件 M 外力 = M 内力 を満足させることを前提とし、作用荷重に対するたわみ曲線は曲率を数値積分法によって求めることにより構造部材の耐荷挙動を追跡する方法である。この場合、解析上の仮定には次の条件を用いる。

- （1） 応力－ひずみ曲線は鋼管、コンクリートともに 1 軸応力状態のものを用いる。
- （2） コンクリートの引張応力は無視する。
- （3） 鋼とコンクリートは完全に変位の適合条件を満足し、平面保持の法則に従う。
- （4） 鋼管の局部座屈、コンクリートのせん断破壊は生じない。

またこのようにして求められた各分割点の曲率 ϕ_i は、各点のたわみ w_i と

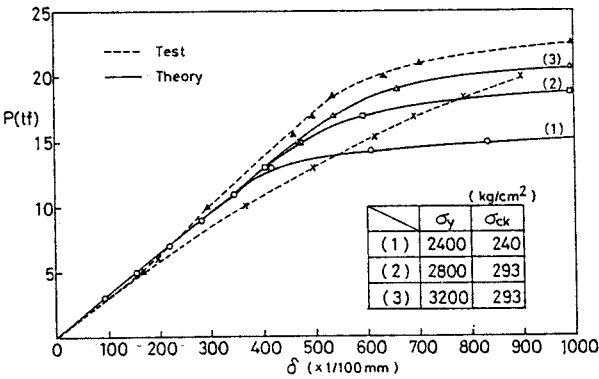


図 6 荷重点直下のたわみ挙動

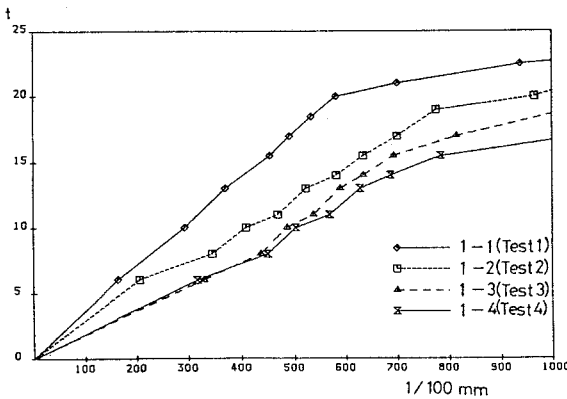


図 7 繰返荷重によるたわみの変化

$$\phi_i = -\frac{1}{\rho_i} = -\frac{d\theta_i}{dx} = -\frac{d^2w_i}{dx^2} \quad (2)$$

なる関係にあるので、上式を差分表示したのち、定和分変換を応用してたわみ曲線をただちに求めることができる。以上の方法による計算結果を実験結果とともに比較して示したのが図5、図6、図7、図8である。CDCs法の計算では、コンクリート、鋼管断面の1/4断面を224要素に分割して対称性を考慮して計算した。また長軸方向には σ_y と σ_{ek} の三つのケースについての計算結果を示している。この値は支間中央のたわみと荷重との関係を示している。図中破線は実験結果（No1のTest1, 1-1）を示している。両者はほぼ一致する結果が得られている。また図6にはTest1, Test2, Test3, Test4のそれぞれについての実験結果を示しており順にたわみが大きくなる状況が示されている。また図7には、支間中央下縁の長軸方向ひずみの実験結果を示しており、表1の0-1, 2-1, 2-2, 2-3に相当する値が示されている。この図からも耐荷力が減少する状況がわかる。また図8には図7に対応する位置のひずみをCDCs法により計算した場合（図5のCase(2), (3)に相当）の結果を示している。この図から降伏荷重 P_y が19.5 tfと得られ、ほぼ実験結果と一致するとともに、図7の結果と重ねるとほぼ一致する。

6. あとがき

以上、繰返し応力を受けるコンクリート充填鋼管の耐荷特性、変形特性に関する実験結果と理論解析結果を紹介した。以上の結果からコンクリート充填鋼管の応力分布は、鋼管とコンクリートの横断面方向の相互作用を考慮した解析結果を鋼管のみの場合の初等はり理論の値とを式(1)により平均化した値によりほぼ表すことができるとや定和分変換を応用したCDCs法の計算値によりコンクリート充填鋼管の応力と変形をほぼ表すことができる。実験結果の解析や理論計算法にまだ不十分な点が多いが今後の課題としたい。本研究の実験及び解析は沖本亨君（北見工大）の卒業研究の一部として行なったもの

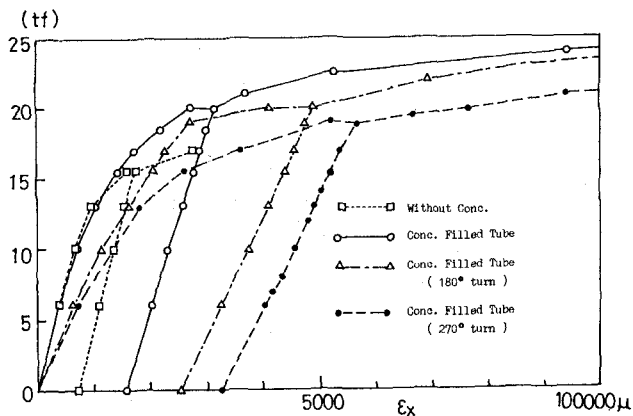


図8 鋼管下縁長軸方向ひずみ

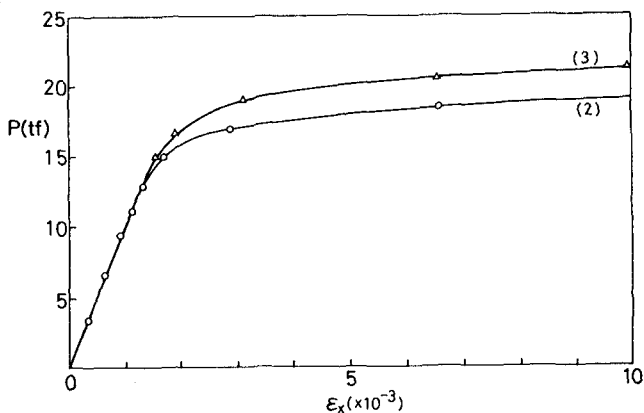


図9 CDCs法による解析結果

であり感謝致します。

参考文献

- 1) 前田：複合構造に関する研究の発展の歴史と動向，土木学会論文集，第344号／I-1，1984
- 2) 日本建築学会：鋼管コンクリート構造計算基準，同解説，1980
- 3) 中井，吉川：コンクリートを充填した鋼製橋脚の耐荷性に関する実験的研究，土木学会論文集，第344号／I-1，1984
- 4) 中井，吉川，中村，袴田，寺田：合成柱（充填方式）の圧縮，曲げ耐荷力および付着力に関する基礎実験，橋梁と基礎，1985，6
- 5) 大島，三上，能町：コンクリート充填鋼管の耐荷力の研究，土木学会北海道支部論文報告集，第41号，1985，2
- 6) T. V. Galambos 著，福元，西野訳：鋼構造部材と骨組 ー強度と設計ー，丸善，1970
- 7) 河井，吉川，石崎：合成柱（充填コンクリート方式）を有する構成橋脚の諸問題（上），（下），橋梁と基礎，1983，2，3
- 8) 土木学会構造工学委員会：鋼・コンクリート合成構造の現況，土木学会誌，1981，9