

(27) コンクリート充填鋼管（防水堤）の 曲げ耐荷力特性

北見工業大学 大島 俊之
同 三上 修一
日本大学 能町 純雄
同 木田 哲量

1. まえがき

本研究は複合構造（Hybrid Structure）としてのコンクリート充填鋼管の構造特性の検討および終局耐力に至るまでの弾塑性挙動の解析を目的としている。

近年この種の合成構造はコンクリート被覆鋼部材などを含めて研究が活発になってきているが、これらの最近の研究成果などについては文献^{1)・2)}等に詳述されている。また最近では鋼橋脚として都市部の桁下空間をできるだけ広く取る要請から、下部工のためにコンクリート充填鋼管が適用された例が報告されている。³⁾

これとは別に図1のような防水堤がオホーツク海沿岸の興部町沙留沖に昭和55年度より設置されており、本研究ではこの沿岸海洋構造物としてのコンクリート充填鋼管構造の水圧や波力による構造特性と終局耐荷力の解析を目的として開始したものである（この場合充填コンクリートは自重の増加を主目的としている）。しかし上記の橋脚としての挙動と関連が深いので、以後特に区別せず一種の構造体として取り扱うこととする。

さて一般にコンクリートと鋼材の合成断面部材の許容断面力の計算方法としては次の二つが考えられる。¹⁾

(1) 累加強度方式—許容断面力は独立に計算した鋼断面部分とコン

クリート部分の許容断面力の和とするもの。ただしこの方式ではひずみの適合条件の満足が保証されない。

(2) 鉄筋コンクリート方式—許容断面力は鋼断面部分をコンクリート断面の鉄筋断面とみなして、鉄筋コンクリート部材と同じ方式で算定するもの。

しかしコンクリート充填鋼管の場合にはコンクリートと鋼管の付着の程度や鋼管壁によるコンクリートの拘束効果など解明すべき点が非常に多い。したがって本研究では模型実験と理論解析の両面からこれらの挙動の解明を目指して検討を進めている。本報告ではこれらの内、主として曲げ強度に関する模型実験の概要

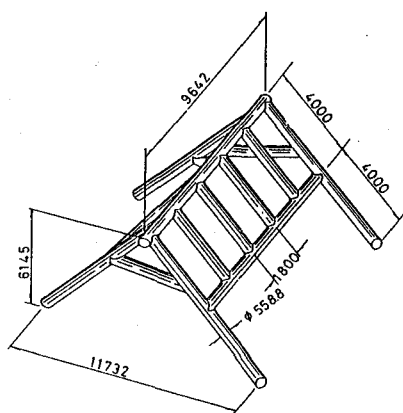


図1 防水堤概略図（試験堤）

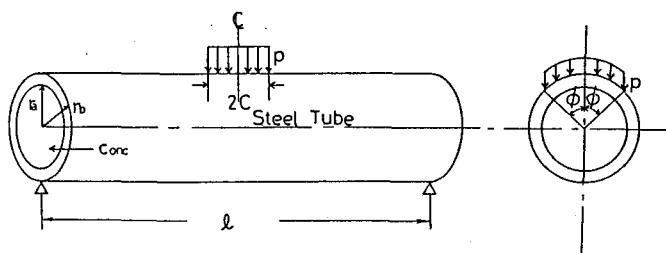


図2 コンクリート充填鋼管

と三次元三角形プリズム要素法による弾性挙動の解析結果について述べる。

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。本報告では文献⁵⁾に引き続き、その後の実験と解析を含めて報告する。

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3参照)。

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、長期載荷挙動と衝撃性載荷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用時時の氷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

実験供試体は表1のような寸法を有し、設計基準強度

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3 氷海域構造物の設計

表1 供試体寸法等

	記号	外径 (mm)	板厚 (mm)	断面慣 性 I^* (cm ⁴)	断面二次 モーメント I^* (cm ⁴)	支間長 (cm)	鋼管 材質	降伏点 (kgf/cm ²)
コンクリート 充填鋼管	1	216	6	68.0	2923	200	SS41	2400
	2							
	3							
鋼管のみ	0			39.58	2184			

※ 鋼とコンクリートの弾性係数比 E_s/E_c を $n=21/1.83=11.5$ として計算した

表2 実験項目

項目		Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	σ (kgf/cm ²)	E _c (GPa)
供試体							
Conc.-filled Pipe	1	1-1	1-2	1-3	1-4	293	17.1 (12.3)
	2	2-1	2-2	2-3	2-4	306	21.1 (10.0)
	3	3-1	3-2	3-3	3-4	255	16.8 (12.5)
Steel-Pipe	0	0-1					
平均値	n = E _s /E _c					285	18.3 (11.5)

$\sigma_{ck}=240\text{kgf/cm}^2$ 、粗骨材最大粒径 25mm、スランプ10cm、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2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本、鋼管のみの供試体1本を用意した。供試体番号と試験項目を表2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No1とNo2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载荷した状況を示している。また個々の実験項目について4回の負荷と除荷の繰り返し载荷を行い、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。荷重載荷装置は長軸方向に $2C=20\text{cm}$ 、円周方向に $2\psi=90^\circ$ 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、荷重は支間中央に载荷している。($2C/\ell=0.1$)

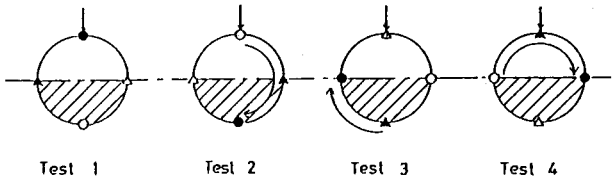


図4 供試体の回転状況

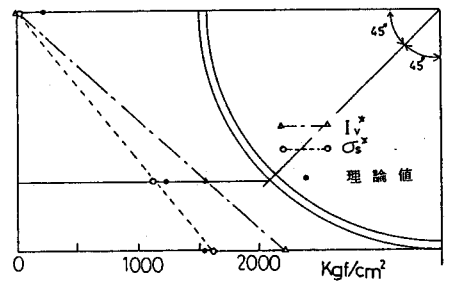


図5 応力分布の比較 ($\ell/2$)

4. 繰り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3に示した。表4はNo. 1の供試体についてTest 1、Test 2、Test 3、Test 4と実験を繰り返したとき、支間中央 $\ell/2$ (载荷点直下)の中央面より下側の応力分布3箇所と5 $\ell/8$ の中央面およびその上下2箇所ずつの合計5箇所による応力分布を表にしたもので、荷重が10tfと13tfの二つの場合についての結果を示して。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Baushinger効果がみられる。つぎにTest 3, Test 4に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

表3 支間中央下縁の応力分布の比較

	Conc.-filled Pipe					Steel-Pipe	
	(1) Iv Ac/2有効	(2) Iv Ac有効	(3) FPM σ_s (Case I)	(4) σ_s	(5) 実験値	(6) 初等弾理論 σ_s	(7) 実験値
0	2	0	7	4	235	0	835
$\pi/4$	1573	1307	543	1146	1257	1749	2012
$\pi/2$	2223	1848	765	1619	1549	2473	1717
Iv (cm^4)	2431	2923				2184	

表4 繰返応力による鋼管応力分布の変化

Test		10 t f					13 t f				
		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	146	-42	5
	$\pi/4$	1257	1033	756	1033	1146	1812	1790	1145	2202	1490
	$\pi/2$	1549	1264	1680	2644	1619	2269	2140	2675	1687	2105
5 $\ell/8$	$-\pi/2$	-974	-889	-1053	-1200	1208	-1299	-1314	-1430	-1687	1570
	$-\pi/4$	-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

ひび割れが入ることになり、支間中央の下縁応力の値は 10tf の場合ですでに降伏点近くに達している。図5および表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梁理論にとる値である。(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。この解析では初等梁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ったが、この場合は Case I の場合より鋼管の応力は 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り部（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^p と(6)の鋼管のみのものの初等理論値 σ_s^0 を平均化した

$$\sigma_s^* = 0.5 (\sigma_s^p + \sigma_s^0) \quad (1)$$

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。

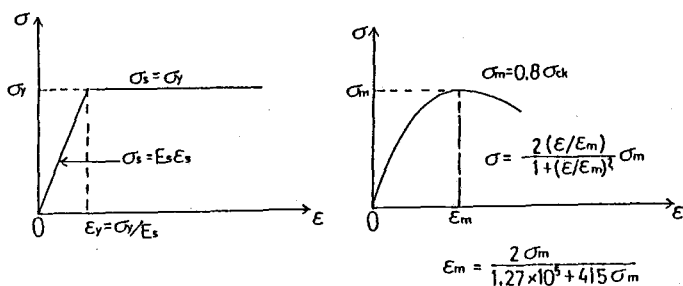


図6 鋼管とコンクリートの応力-ひずみ関係

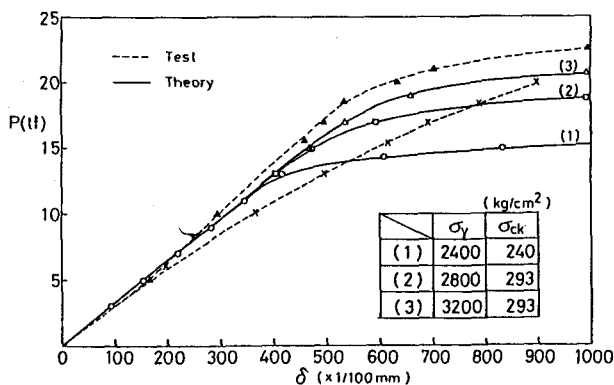


図7 荷重点直下のたわみ挙動

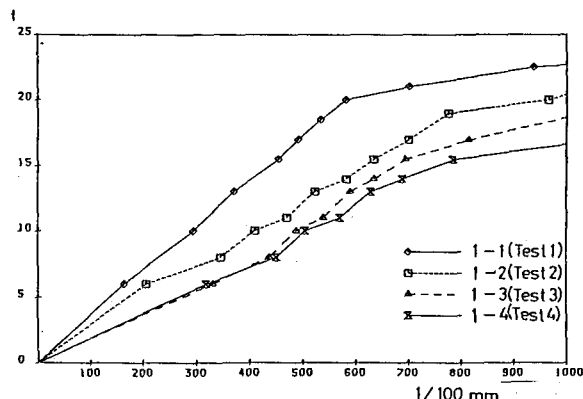


図8 繰り返し荷重によるたわみの変化

5. 定和分変換⁹⁾を応用したCDCs解析⁶⁾

CDCs (Column Deflection Curves) 法は材料の応力歪み曲線をもとに軸方向圧縮力、曲げモーメントから梁の曲率を求め、スパン方向のいくつかの分割点の断面でつりあい条件 $M_{\text{外力}} = M_{\text{内力}}$ 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

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

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出来る。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7、図8、図9、図10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_{ck} の三つのケースについての計算結果を示している。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えられている。また図7にはTest 1、Test 2、Test 3、Test 4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9には図8に対応する位置のひずみをCDCs法により計算した場合 (図7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19.5tfと得られ、ほぼ実験結果と一致するとともに、図8の結果と重ねるとほぼ一致する。

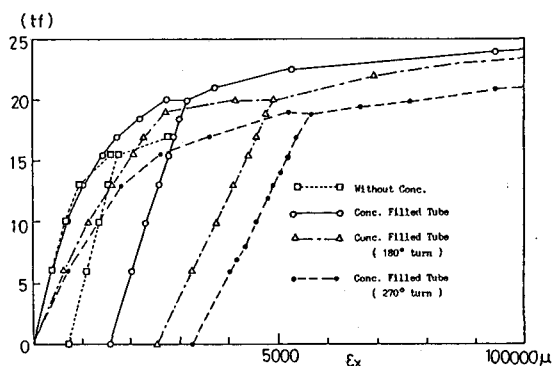


図9 鋼管下縁長軸方向ひずみ

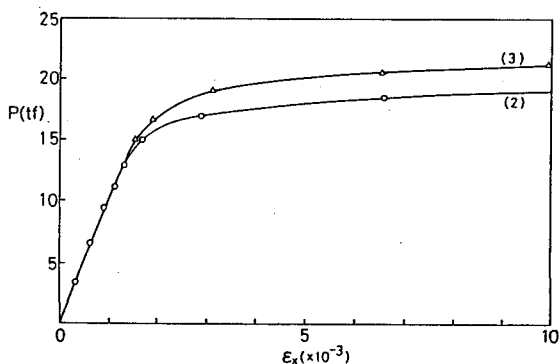


図10 CDCs法による解析結果

6. あとがき

以上、繰り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こ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ことを示した。実験結果の解析や理論計算法には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（現旭川市役所勤務）の卒業研究の一部として行ったものであり、また資料を提供して頂いた北海道網走支庁水産課の方々にも感謝いたします。

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/1-1、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/1-1、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. 2
- 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、福本、西野訳：鋼構造部材と骨組－強度と設計－、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
- 9) 大島、能町：有限プリズム法による繊維強化複合材の縦波動伝播速度の研究、土木学会論文報告集、第297号、1980. 5