

ベローズ型伸縮可撓管の履歴復元力特性に関する実験的研究

九州大学工学部 学生会員○山内 邦博
九州大学大学院 学生会員 栗木 茂幸

九州大学大学院 フェロー 大塚 久哲
新日本製鐵株式会社 正会員 竹内 貴司
九州大学工学部 山崎 智彦

1. はじめに

伸縮可撓管は本来水管橋等の温度伸縮を吸収する目的で取り付けられており、地震等による大変形時の挙動に関する研究は少ない。しかしながら、水管橋に設置する伸縮可撓管は常時および地震時に生じる変位量に対して安全な構造としなければならない¹⁾。そこで本研究では、伸縮可撓管の基礎的な性能および大変形時における挙動を把握するための実験を行った。

2. 実験方法

本実験に使用したのはベローズ型伸縮可撓管(ベローズ部:ステンレス製)であり、例として山数が6山の断面図を図-1に、ベローズ部の断面図を図-2に、供試体の諸元について表-1に示す。実験は供試体について3ケース(3山、6山、9山)、载荷方向について2ケース(管軸方向、管軸直角方向)、計6ケース行った。いずれも変位制御での交番载荷で、ジャッキのストロークの限界(±150mm)もしくは供試体に大破壊が生じるまで载荷した。

3. ベローズの設計式

ベローズの設計式には様々なものがあるが、広く設計に用いられているM. W. Kellogg社の設計式²⁾を以下に示す。

$$\text{管軸方向反力 } F_{BX} = f_B e_X, \quad e_X = \frac{X}{n} \quad (1)$$

$$\text{管軸直角方向反力 } F_{BY} = \frac{f_B D_m e_Y}{2L}, \quad e_Y = \frac{3D_m Y}{Bn} \quad (2)$$

$$f_B = \frac{4ED_m t^3 \lambda}{3b^{0.5} H^{2.5} 2n} \quad (3)$$

ここで F_{BX} と F_{BY} はそれぞれベローズが管軸方向変位、管軸直角方向変位を吸収した時に生じる反力である。 e_X と e_Y はそれぞれベローズ全体が管軸方向に X だけ変位したとき、管軸直角方向に Y だけ変位したときのベローズの単位山あたりの等価伸縮量で、 f_B はベローズの単位山を1mm伸縮するのに要する力である。その他のベローズに関する変数は、 E :ヤング係数(193kN/mm²)、 t :肉厚、 λ :層数、 B :ピッチ、 b :ピッチの1/2、 H :山高、 n :山数、 L :ベローズ長さ、 D_m :平均径(= $D_b + t + H$)であり、本実験に用いたベローズは $\lambda = 1$ である。ただし、Kellogg式から求まるのは初期剛性のみである。

4. 実験結果および考察

4-1 管軸方向载荷実験

図-3, 4, 5にそれぞれ3LG, 6LG, 9LGの荷重-変位関係を示す(ただし、以降に示す荷重-変位曲線は全て引張側を正とする)。荷重-変位特性曲線は引張側と圧縮側とで非対称である。3LGでは変位が-60mm、6LGでは-120mmで荷重の急激な増加が確認された。これはどちらの場合にも変位がベローズ長さのおよそ半分程度の時に生じていることから、圧縮時に隣接するベローズが接触することによって生じた現象であると考えられる。また、9LGにおいて同じ現象が生じるには-180mm程度の変位が必要であると考えられ、本実験において確認するには至らなかった。

初期剛性(+側降伏点と一側降伏点を結んだ直線の傾き)はKellogg式で

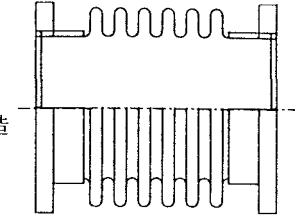


図-1 ベローズ型伸縮可撓管の断面図(6山)

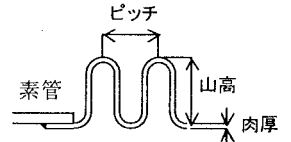


図-2 ベローズ部の断面図

表-1 供試体諸元

供試体	口径 D _b (mm)	平均径 D _m (mm)	山数 n	ピッチ B (mm)	ベローズ 長さ L (mm)	肉厚 t (mm)	山高 H (mm)
3LG, 3TR	300	347	3	40	120	2.0	45
6LG, 6TR	300	347	6	40	240	2.0	45
9LG, 9TR	300	347	9	40	360	2.0	45

注) LG, TRはそれぞれ管軸、

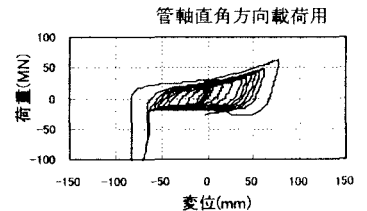


図-3 3LG荷重-変位関係

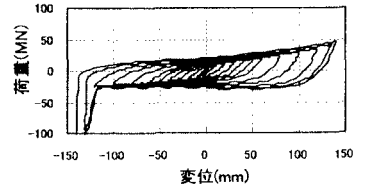


図-4 6LG荷重-変位関係

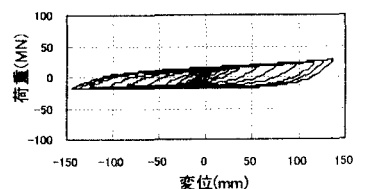


図-5 9LG荷重-変位関係

求めた値 (F_{BX}/X) よりも大きな値となった。また、降伏荷重、剛性低下率(降伏後の剛性を初期剛性で除した値)はともに山数に関わらず+側、-側ともほぼ一定値をとった(表-2参照)。

表-2 管軸方向荷重実験結果

供試体	引張側 降伏変位 (mm)	圧縮側 降伏変位 (mm)	引張側 降伏荷重 (MN)	圧縮側 降伏荷重 (MN)	初期剛性 (N/mm)	引張側 剛性 低下率	圧縮側 剛性 低下率	Kellog式 理論値 (N/mm)
3LG	1.74	-5.97	5.39	-14.41	2567.6	0.201	0.088	1965.9
6LG	5.95	-11.19	6.76	-14.41	1231.1	0.185	0.084	982.9
9LG	8.93	-18.08	6.37	-14.01	755.3	0.180	0.087	655.6

4-2 管軸直角方向荷重実験

図-6, 7, 8にそれぞれ3TR, 6TR, 9TRの荷重-変位関係を示す。いずれも純せん断試験であり、変位は管軸の中立軸からのずれを示しているの、ほぼ左右対称になっている。3TRの場合、変位が引張側のおよそ90mmから荷重が200MNのまま上がらなくなり、その後ペローズ部に局部座屈が発生した。6TR, 9TRの場合はジャッキのストロークの限界まで荷重したが、3TRの場合のような局部座屈が発生するには至らなかった。

初期剛性は、9TRについてはかなりの精度でKellog式 (F_{BY}/Y) と一致したが、6TRと3TR、特に3TRについてはKellog式で求めた値とはかなり異なる値となった。また、剛性低下率(第1降伏点に対して)については山数による大きな差は無いものの、初期剛性は3TRだけかなり大きな値となった(表-3参照)。これらの違いは写真1, 2に見られるように、ペローズの山数に起因した変形状態の違いによるものと考えられる。

表-3 管軸直角方向荷重実験結果

供試体	+側 降伏変位 (mm)	-側 降伏変位 (mm)	+側 降伏荷重 (MN)	-側 降伏荷重 (MN)	初期剛性 (N/mm)	+側 剛性 低下率	-側 剛性 低下率	Kellog式 理論値 (N/mm)
3TR	3.18	-3.27	37.24	-24.50	9572.1	0.308	0.306	24763.6
6TR	4.98	-5.25	9.80	-9.80	1915.9	0.275	0.245	3100.7
9TR	9.33	-9.81	7.84	-7.84	819.2	0.283	0.248	918.3

4-3 ペローズの復元力特性

実験結果から管軸方向、管軸直角方向それぞれの履歴は、図-9, 10に示すような最大点指向バイリニア(非対称)、最大点指向トリリニア(対称)型の復元力特性でモデル化できるようである。除荷後の戻り勾配は初期勾配に比べ、管軸方向の圧縮側では変位が大きくなるほど緩勾配に、それ以外では変位が大きくなるほど急勾配になる。

降伏荷重、剛性低下率、トリリニアにおける2折れの開始点等に関する推定式は、さらに供試体数を増やし、実験結果を蓄積した上で誘導する予定である。

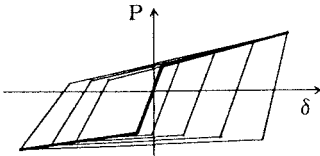


図-9 管軸方向
履歴復元力モデル

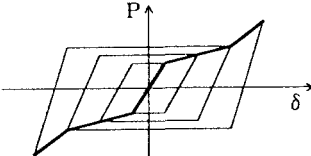


図-10 管軸直角方向
履歴復元力モデル

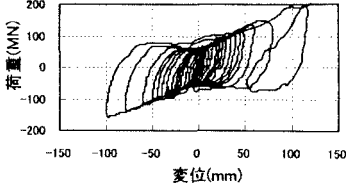


図-6 3TR荷重-変位関係

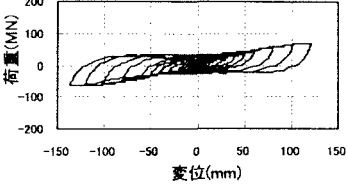


図-7 6TR荷重-変位関係

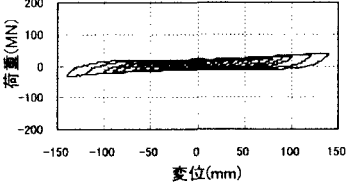


図-8 9TR荷重-変位関係

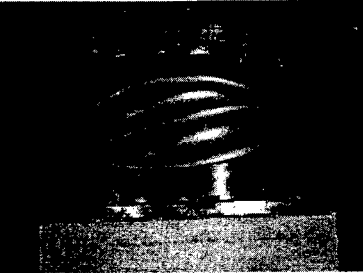


写真1: せん断方向に
30mm変位した3TR

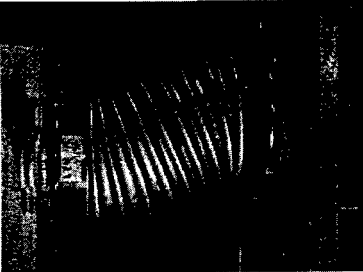


写真2: せん断方向に
120mm変位した9TR

<謝辞>本実験の実施にあたり、(株)オクダソカベの谷清治氏ならびに九州大学大学院助手の矢暮亘氏には多大な協力を頂いた。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献 1) 日本水道鋼管協会: WSP水管橋設計基準(改定4版)、1999.6.24改定、p.65
2) (株)オクダソカベ: Bellows Type Expansion Joints、p.p.11~13