

I-284 開口を有する鋼管の曲げ試験および数値解析

新日本製鐵㈱ 建材開発技術部 正員 ○ 田崎 和之
 国鉄 米子鉄道管理局工務部長 正員 谷口 紀久
 国鉄 下関工事事務所土木課 正員 伊南 哲也
 国鉄 構造物設計事務所（鋼構造）正員 西牧 世博

1. まえがき

線路下横断構造物の施工法の一つに大径の鋼管矢板を水平に圧入推進するパイプビーム工法がある。この工法では、普通、鋼管矢板下面と横断構造物本体となるボックスカルバート上床版との空間で、コンクリート打設作業を行うが、この空間が狭く作業に制限を受ける場合、鋼管底部に孔を開け孔部からカルバート上床版のコンクリート打設、締固めを行うことにより、狭い空間での施工を可能にすることができる。しかし鋼管の孔部に曲げ圧縮が作用した場合、孔部の応力集中による座屈の懸念がある。そこで実物大モデルの曲げ試験およびFEM解析を実施し、孔部の座屈挙動を調査したので、ここに報告する。

2. 試験方法

2-1 試験体 本試験に使用した試験体一覧を表-1に示す。試験体はSKK41のスパイラル鋼管を各1体ずつとした。No.3の試験体には開口部の応力集中を避けるため図-1に示すようなドーナツ型の補強プレートを孔部に溶接した。

2-2 載荷試験 曲げ試験は図-2に示すように対称2点載荷による単純曲げ試験とし、載荷は3～5 tf (29.4～49.0 kN) の荷重段階を原則とした。測定項目は歪と変位の二種類とした。変位測定は荷重-変位の関係より、梁としての全体挙動に着目し、鋼管の終局および降伏耐力の把握を主目的として実施した。試験体No.3の変位測定箇所を図-3を例に示す。歪測定は開口部近傍の歪、応力度分布を把握し、開口部近傍の応力集中係数を求めるために実施した。

3. 試験結果

スパン中央の最下端の変位（鉛直たわみ）に関する荷重-変位曲線を図-4に示す。図中 $P_y^{(1)}$ は、変位が非線形となる荷重（梁としての降伏荷重）である。 P_{max} は載荷最大荷重、また δ_{max} は P_{max} 時の鉛直たわみ量（mm）を示す。本試験より次の事項が確認された。

- ① 圧縮側開口試験体は無開口試験体に比べ、極限耐力は20%、梁としての降伏耐力は40%減少し、また、引張側開口試験体と比べると、極限耐力は10%低いが、梁としての降伏耐力は50%高い。
- ② 開口部にドーナツ型の補強をすると、圧縮側開口試験体の降伏耐力の増加は約40%となり、応力集中係数は3.4から2.2に軽減される。
- ③ 開口部近傍は小さい荷重段階で局部的に降伏点に達するが、梁としての全体挙動では線形状態が続き、梁としての降伏点は極限

表-1 試験体一覧

NO.	杭仕様	試験体内容
1	$\phi 711.2 \times t19 \times 10m$	開口無し
2	$\phi 711.2 \times t19 \times 10m$	曲げ圧縮側に $\phi 200$ の開口
3	$\phi 711.2 \times t19 \times 10m$	曲げ圧縮側に $\phi 200$ の開口と補強
4	$\phi 914.4 \times t19 \times 10m$	曲げ圧縮側に $\phi 200$ の開口
5	$\phi 914.4 \times t19 \times 10m$	曲げ引張側に $\phi 200$ の開口

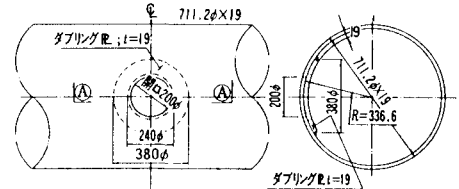


図-1 開口部補強図

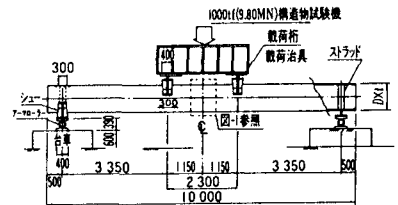


図-2 曲げ試験概要

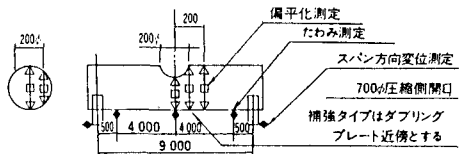


図-3 変位測定箇所

耐力の1/3 ～1/2 である。

④開口部の応力集中係数は圧縮側開口で3.3 ～3.5，引張側開口で3.6 であった。

4. 応力集中に関する数値解析

開口部近傍の応力状態および応力集中係数を比較するためFEMによる弾性応力解析を行った。使用要素は板・薄肉シェル要素であり，解析は1/4モデルで行った。この結果，開口部近傍の応力度に関して，両者は比較的良好一致しており，応力集中係数がFEMによって推定できることが確認された。そこで開口径を200mmとし，鋼管径，板厚を変化させ，圧縮側に開口部を有する鋼管の応力集中係数に関するFEM数値解析を行った。モデルは，開口径200mmは一定とし，鋼管の板厚中心直径が400mm，701.7mm，904.9mmの3種類で，各鋼管径に対して，鋼管板厚は5mm，10mm，19mmの3種類である。数値解析により求めた応力集中係数と各パラメーター値を表-2に示す。この結果より次の事項が確認された。

①図-5,6に示すように，弾性域において，局部座屈が生じないと仮定すれば，圧縮側開口部近傍の応力集中係数と無次元パラメーター D/t ， d/t は，ある一定の相関関係がある。つまり，板厚が一定で開口率 β が同じであれば鋼管径が大きくなるほど応力集中係数は大きくなる。また，開口径，開口率が同じであれば，板厚が増すほど，応力集中係数は小さくなる。

②図-7に示すように，本解析で算出した無次元パラメーター ρ と応力集中係数は非常に高い相関があり，弾性域で局部座屈を生じない範囲であれば，一般的に応力集中係数の推定は可能である。

③本試験で弾性域内で局部座屈を生じなかったのは次の範囲であり，この時の応力集中係数は3.3 ～3.5 である。
 $\beta=0.07\sim0.09$ ， $D/t=35\sim50$ ， $\rho=1.0\sim1.3$ ， $D/d=0.08\sim0.10$

ここに， β ：開口率（ $d/\pi D$ ）， D/t ：管径と板厚の比

ρ ：管径・板厚と開口径の比（ $r/\sqrt{R_1 \cdot t}$ ）

D/d ：管径とスパンの比

5. あとがき

本試験はパイプビーム工法による工事に開口を有する鋼管矢板を採用するため，国鉄と新日本製鐵㈱で共同試験を行ったものである。結果として，十分な耐力を確認でき，本工法による他サイズの可能性も把握できた。本報告が一般の開口部を有する鋼管の設計にも参考となれば幸いである。

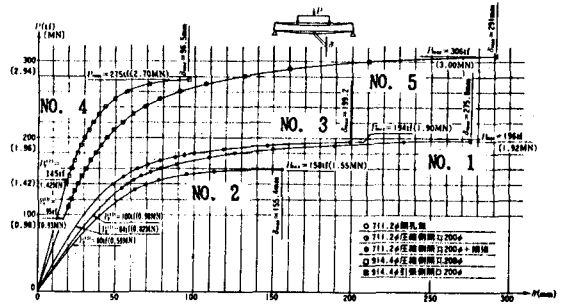


図-4 荷重-変位曲線

表-2 応力集中係数（鋼管外面）と各パラメーター値

D (mm)	$\beta = \frac{d}{\pi D}$	D/t	解析モデル No.	t (mm)	応力集中係数	D/t	d/t	R/at	$\rho = \frac{r}{\sqrt{R_1 \cdot t}}$
400φ	0.159	0.044	1	5	5.83	80.00	40.00	33.75	3.16
			2	10	4.96	40.00	20.00	17.08	2.24
			3	19	4.17	21.05	10.53	9.19	1.62
701.7φ	0.091	0.078	4	5	5.07	140.30	40.00	58.89	2.39
			5	10	4.25	70.17	20.00	29.66	1.69
			6	19	3.54	36.93	10.53	15.80	1.22
904.9φ	0.070	0.105	7	5	4.66	180.10	40.00	75.83	2.10
			8	10	4.12	90.49	20.00	38.12	1.49
			9	19	3.50	47.63	10.53	20.26	1.08

注) D ：鋼管の板厚中心径

t ：鋼管板厚

d ：開口径

R ：鋼管の中心から外縁までの距離

$\alpha = \alpha_1 - \alpha_2 / \alpha_1$

α_1 ：曲げにより鋼管に圧縮が生じる側の合成応力

α_2 ：曲げにより鋼管に引張が生じる側の合成応力

ただし，いずれも符号は圧縮側を負とする

$r = d/2$

$R_1 = D/2$

t ：スパン

β ：開口率

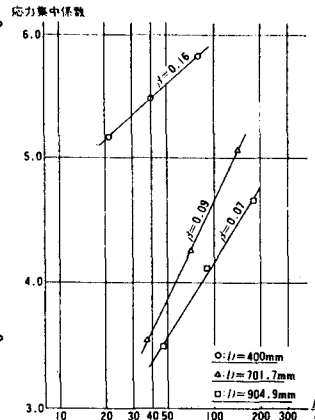


図-5 応力集中係数とパラメータ D/t の関係

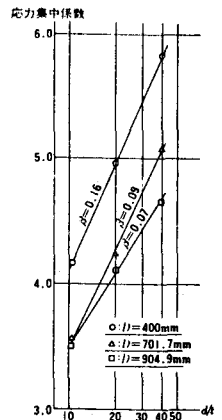


図-6 応力集中係数とパラメータ d/t の関係

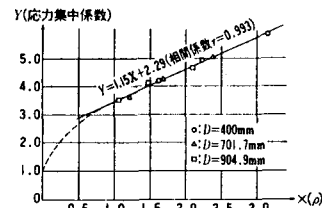


図-7 応力集中係数とパラメータ ρ の関係