

鋼製曲管の面内曲げ変形特性

三木千壽¹・小口憲武²・打田孝良³・立松秀和⁴・吉川正樹⁵

¹正会員 工博 東京工業大学教授 大学院理工学研究科 (〒152-0033 東京都目黒区大岡山2-12-1)

²工修 東京ガス株式会社 導管部 (〒105-8527 東京都港区海岸1-5-20)

³工修 大阪ガス株式会社 大阪事業本部 (〒550-0023 大阪市西区千代崎3-南2-37)

⁴工修 東邦ガス株式会社 供給管理部 (〒456-8511 名古屋市熱田区桜田町19-18)

⁵工修 NKK エンジニアリング研究所 (〒210-0855 川崎市川崎区南渡田町1-1)

地震時の液状化による大規模な地盤変位に対する鋼製曲管の耐震性を照査し適切な設計に資するために、ガス導管に使用されている鋼製曲管の限界強度に及ぼす形状・寸法および材料の影響について実管実験と数値解析を併用して調査・研究を実施した。その結果、き裂の発生する限界ひずみは、材料によらず相当ひずみで30%以上であること、また、大変形領域でも数値解析が有効であることが明らかとなった。さらに、曲管の寸法・形状等のパラメータを変えた数値解析を行い限界曲げ角度の評価式を提案した。

Key Words: Steel Pipe bend, Buckling, Critical Strain, Failure Assessment, Finite Element Analysis

1. 緒 言

1995年に発生した兵庫県南部地震以降、様々な構造物に関する耐震設計の改訂が活発に行われてきた。(社)日本ガス協会でも地震時の液状化による大規模な地盤変位に対する埋設ガス導管の耐震設計指針策定に向けた研究を実施した¹⁾。その中で、地盤変位の吸収が期待される鋼製曲管の限界強度は調査研究の主要な課題の一つであった。しかしながら、既往の鋼製曲管に関する研究では、限界強度を取扱ったものは少なく、曲げによる最大モーメント点までを対象としている場合が多い^{2)・3)}。そこで、鋼製曲管を用いて大変形面内曲げ実験を実施し、限界曲げ角度に及ぼす曲管の形状・寸法および材料特性の影響を調査した。合わせて実験を模擬した数値解析を実施し、数値解析の有効性を評価した。また、限界曲げ角度の評価式を導くために、曲管の寸法・形状等のパラメータを変えた数値解析を行った。その結果、有益な知見が得られたので報告する。

2. 鋼製曲管の面内曲げ実験

(1) 供試体

図-1に試験体の形状を示す。試験体は被試験部となる曲管とそれに接続する直管から構成されている。試験体の材料はAPI（アメリカ石油協会）規格のX65、X52およびJIS規格のPT370を用いた。表-1に実験に用いた試験体の機械的性質を示す。試験体の外径は165mmから610mm、外径管厚比(=外径/管厚)は23から

60の範囲とした。APIグレードの曲管は高周波誘導加熱方式により、JISグレードの曲管は熱間マンドレル方式により製造されている。曲管の曲げ半径(曲率半径)は選択した製造方法により異なり、それぞれ管径の3倍もしくは1.5倍である。

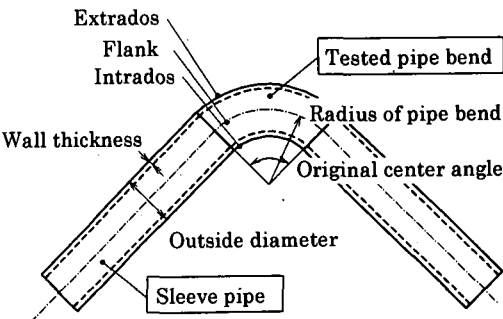


図-1 供試体の形状

表-1 試験体の規格強度

Material	σ_y (MPa)	σ_b (MPa)	El. (%)
API 5L X65	≥ 448	≥ 530	≥ 23
API 5L X52	≥ 358	≥ 455	≥ 26
JIS PT370	≥ 215	≥ 370	≥ 28

(2) 実験および解析方法

実管実験は図-2に示す曲げ実験装置を用いて面内の内曲げ・外曲げ実験を行った。内曲げ実験では曲管角度を小さくする方向の強制変位を、外曲げ実験はその逆方向の強制変位を負荷した。また、同一試験体で比較したところ内圧を作用させた状態の方がき裂発生時の限界曲げ角度が小さくなることが確認

されたため、一部の試験体を除き、規格最小降伏応力の40%の周方向応力に相当する内圧を負荷した。

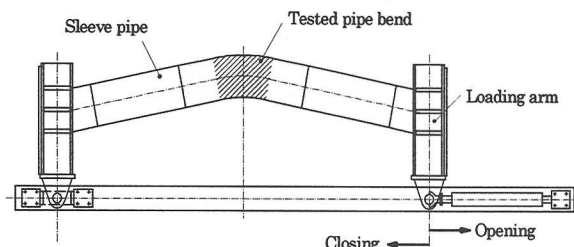


図-2 曲げ実験装置の概要

図-3に内曲げの負荷方法を模式的に示す。内曲げ実験では除荷時にのみき裂が発生したため、一方向負荷に加えて内圧と変位拘束力の除荷過程を一定間隔で導入した。外曲げ実験では一方向の負荷過程でき裂が発生するため、除荷過程は導入しなかった。

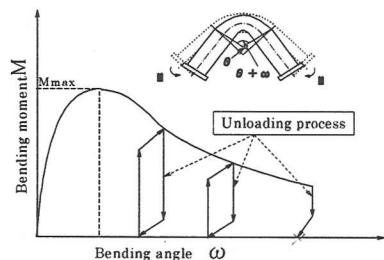


図-3 曲げ実験方法の概要(内曲げの場合)

なお、実験中は荷重、変位、曲げ角度、ひずみを連続的に計測した。また、管体には格子状にグリット線を引き、実験前後における線素の長さの変化からその区間の平均ひずみを測定した。管厚方向のひずみは管厚の変化から評価した。表-3に示す通り、材料、形状・寸法および強制変位負荷方向の異なる21体の実管実験を実施した。

合わせて、汎用解析コードADINA⁴⁾⁻⁵⁾を用いて弾塑性有限要素解析を実施した。表-2に解析条件を示す。また、同一の手法を用いて、実験条件以外の諸元を考慮した20ケースの解析を実施した。

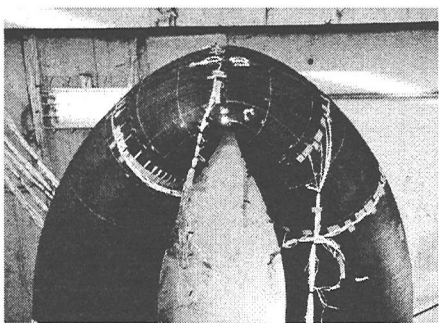
表-2 解析条件

Mesh	4-node shell element
Material property	elastic-plastic (Mises) Young's modulus $E=206\text{GPa}$ Poisson's ratio $\nu=0.3$ Yield strength $\sigma_y=490\sim532\text{MPa}$ Work-hardening ratio $H_0'=2.1\text{GPa}$
Geometrical B.C	constraint of node(sym, plane)
Mechanical B.C	prescribed displacement

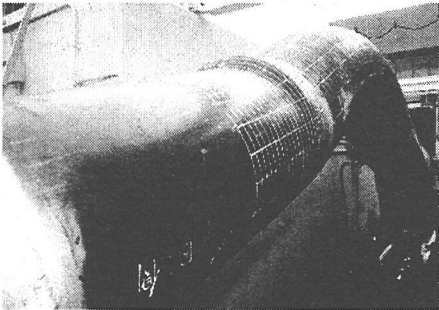
(3) 実験結果

写真-1に実験後の試験体の代表的な外観を示す。内曲げでは曲管中央部に著しい扁平が見られ、最大圧縮変形部で非貫通割れを生じた。一方、外曲げでは、一方向負荷過程で曲管/直管境界部近傍背側の

直管に屈服を生じた後、その断面腹側の引張領域に貫通割れを生じた。



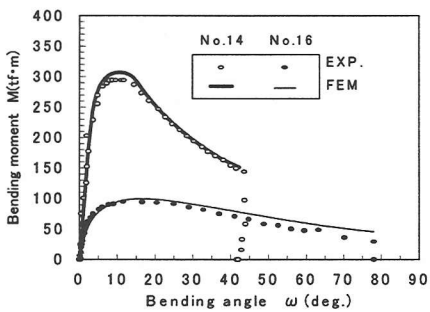
(a) 内曲げ



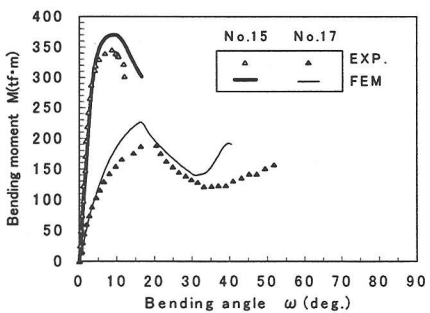
(b) 外曲げ

写真-1 実験後の供試体外観

図-4に、実験および数値解析による曲げモーメントと曲げ角度の代表的関係を示す。内曲げ、外曲げとも実験と数値解析は良く一致している。図-5に代表的な最大ひずみの履歴を示す。内曲げでは30%ひずみまで、外曲げでは10%ひずみまで、数値解析と実験結果は良く一致している。実験結果の一覧を表-3に示す。なお、き裂が発生した曲げ角度を限界曲げ角度と定義した。



(a) 内曲げ

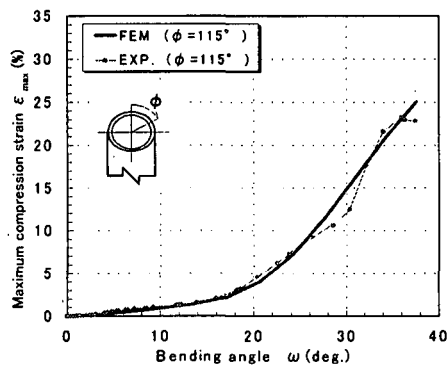


(b) 外曲げ

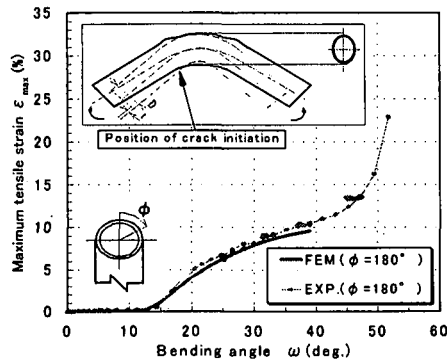
図-4 曲げモーメントと曲げ角度の関係

表-3 実験結果の一覧

No.	Material	Outside diameter D, mm	D / t	Center angle θ , deg.	Bending mode	Critical bending angle, deg.	Critical strain %	Remarks
1	X65	610.0	40	90	Closing	90	40	no crack
2	X65	610.0	40	90	Closing	90	>30	surface crack
3	X65	610.0	40	90	Opening	40	>30	thickness-through crack
4	X65	610.0	40	90	Opening	30	>30	thickness-through crack
5	X65	610.0	40	90	Closing	52	32	surface crack
6	X65	610.0	40	22.5	Closing	41	34	surface crack
7	X65	610.0	40	11.25	Closing	43	37	surface crack
8	X65	610.0	40	22.5	Opening	8.8	40	thickness-through crack
9	X65	610.0	40	11.25	Opening	7.6	36	thickness-through crack
10	PT370	165.2	23	90	Closing	>74	>29	no crack
11	PT370	165.2	23	22.5	Closing	77	58	surface crack
12	PT370	165.2	23	90	Opening	>81	>18	no crack
13	PT370	165.2	23	22.5	Opening	>79	>20	no crack
14	X65	610.0	40	45	Closing	43	34	surface crack
15	X65	610.0	40	45	Opening	16	36	thickness-through crack
16	X52	610.0	59	90	Closing	>79	>42	no crack
17	X52	610.0	59	90	Opening	52	33	thickness-through crack
18	X52	406.4	51	90	Closing	>71	>35	no crack
19	X52	406.4	51	90	Opening	56	31	thickness-through crack
20	X52	406.4	51	22.5	Closing	66	43	surface crack
21	X52	406.4	51	22.5	Opening	>71	>17	no crack



(a) 内曲げ



(b) 外曲げ

図-5 最大ひずみと曲げ角度の関係

4. 考 察

(1) 鋼製曲管の限界ひずみ

内曲げは曲管中央断面の圧縮部に、外曲げは曲管端部の曲管/直管境界近傍腹側の直管部に最大ひずみが発生し、その箇所に割れが見られた。割れ発生部の限界ひずみの値は、表-3に示す通りである。図-6に、き裂が発生した試験体の限界ひずみを示す。材料によらず、内曲げおよび外曲げとも、30%を越えるひずみが発生していることがわかった。

なお、ひずみは、管厚方向のひずみも考慮した相当ひずみで整理した。

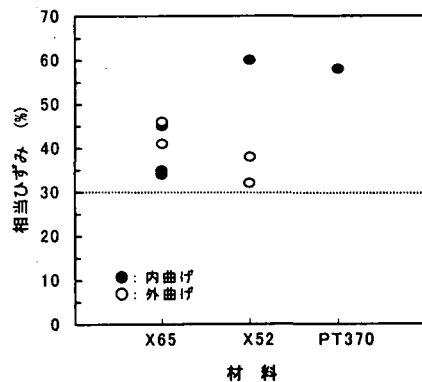


図-6 限界ひずみ

(2) 限界強度に及ぼす形状・寸法の影響

鋼製曲管の限界ひずみが材料によらず30%以上であることと、数値解析の有効性が確認されたことを受けて曲管の形状・寸法から鋼製曲管の限界曲げ角度評価式の導出を試みた。

数値解析の結果から、内曲げでは相当ひずみ30%、外曲げでは相当ひずみ10%のひずみが発生した段階の曲げ角度を数値解析上の限界曲げ角度と定義し、限界曲げ角度に関する重回帰分析を実施した。変数となる曲管パラメータは、導管の外径D(cm)、公称管厚t(cm)、曲率半径R(cm)、曲管角度φ(度)および材料強度比ηとした。ηは大変形域における平均的な加工硬化係数であり、割れ発生部近傍に大きな引張り塑性領域を生じる外曲げにのみ考慮した。

得られた内曲げの限界角度評価式を式(1)に、外曲げを式(2)および式(3)に示す。

なお、式(1)中の ω_{sc} は、直管曲げの評価式との連続性を考慮し導入した項である⁶⁾。また、実験限界

等を考慮して各式とも最大値を71度に設定した。

限界内曲げ角度：

$$\omega_{bsc} = 0.9 \cdot \frac{\sqrt{D/t} \cdot \sqrt{\phi}}{R/D} + \omega_{sc} \quad (1a)$$

ただし、

$$\omega_{sc} = \left[\frac{44t}{100D} \left(8k - \frac{2k^2}{3} \right) + \frac{3.44}{\sqrt{2} \cdot \sqrt{D/t}} \left(1 + \frac{\epsilon_f}{2} \right) \right] \cdot \frac{180}{\pi}$$

$k=1$, $\epsilon_f=0.35$ である。

限界外曲げ角度：

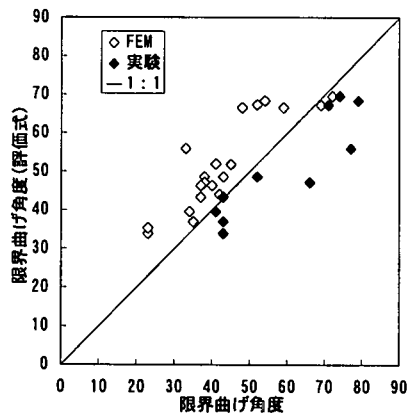
$$\omega_{boc} = 2.24 \cdot \frac{\phi}{\sqrt{D/t} \cdot (R/D)^{0.25} \cdot \eta} \quad (\phi \geq 22.5) \quad (2)$$

$$\omega_{boc} = 2.24 \cdot \frac{22.5}{\sqrt{D/t} \cdot (R/D)^{0.25} \cdot \eta} \quad (\phi < 22.5) \quad (3)$$

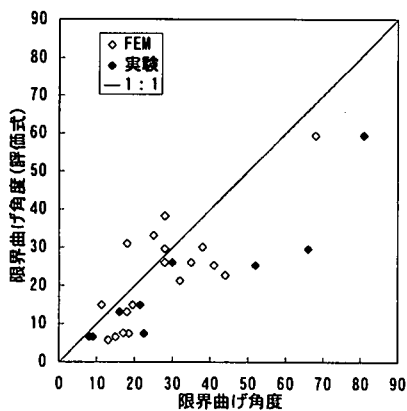
ただし、 η は材料毎に下記の値をとる。

材料 (API 5L)	η	材料 (JIS G)	η
X42	0.77	STPG 370	0.64
X46	0.81	STPG 410	0.66
X52	0.87	STPT 370	0.64
X56	0.87	STPT 410	0.66
X60	0.88	STPT 480	0.63
X65	0.93	STPY 400	0.62

図-7に今回の実験に用いた全ての試験体の限界曲げ角度と評価式との対応を示す。評価式はき裂が発生した全ての実験結果を安全側に評価している。



(a) 内曲げ



(b) 外曲げ

図-7 実験の限界曲げ角度と評価式との対応

5. 結 言

鋼製曲管を用いた面内曲げ実験および数値解析を実施した結果、以下の知見が得られた。

- (1) 内曲げは、一方向負荷過程における曲管中央断面の最大圧縮変形部に除荷過程で非貫通割れを生じた。
- (2) 外曲げは、一方向負荷過程で曲管／直管境界部近傍背側の直管に屈服を生じた後、その断面腹側の引張領域に貫通割れを生じた。
- (3) 限界ひずみは、材料、形状・寸法、負荷方向によらず、30%以上であることが明らかとなった。
- (4) 数値解析は、内曲げで軸方向圧縮ひずみ30%まで、外曲げで軸方向引張ひずみ10%まで実験と良く一致し、大変形域まで有効であることが明らかとなった。
- (5) 限界曲げ角度に関する重回帰分析を行い、限界曲げ角度を簡便に評価できる式を導いた。

謝辞： 本研究は、経済産業省資源エネルギー庁委託事業「ガス導管液状化対策調査事業」として社団法人日本ガス協会が受託して実施した調査研究の一部である。特に、武蔵工業大学 増田教授、東京大学 吉成助教授をはじめ第3小委員会の委員各位には活発なご議論を頂いた。ここに関係者に謝意を表明する。

参考文献

- 1) Miki, C., Kobayashi, T., Oguchi, N., Uchida, T., Suganuma, A., Katoh, A., Deformation and fracture properties of steel pipe bend with internal pressure subjected to in-plane bending, 12th World conference on earthquake engineering, 2000.
- 2) Kussmaul, K., Diem, H.K., Uhlmann, D. and Kobes, E.: Pipe bend behaviour at load levels beyond design, Transactions of the 13th international conference on structural mechanics in reactor technology, August, pp.187-198, 1995.
- 3) Gresnigt, A.M. and van Foeken, R.J.: Strength and deformation capacity of bends in pipeline, International journal of offshore and polar engineering, Vol.5, No.4, December, pp.294-307, 1995.
- 4) Bathe, K.J.: Finite Element Procedures, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1996.
- 5) 太田孝二, 中川知和, 中村聖三, 水谷慎吾, 小林洋一, 野中哲也: 鋼製橋脚の耐震設計に対する構造解析ソフトウェアの適用性, 橋梁と基礎, No.12, pp.33-39, 1997.
- 6) 三木千壽, 小口憲武, 打田孝良, 立松秀和, 井上健裕, 池田里恵: 内圧を受けるラインパイプの変形特性, 土木学会第26回地震工学研究発表会, 2001