

マイターベンドの大変位挙動特性

LARGE DEFORMATION BEHAVIOURS OF MITER BEND USED FOR WATER PIPELINES

小池 武¹⁾, 高橋一夫²⁾, 川口周作³⁾, 桐山和晃⁴⁾, 五百田 浩⁵⁾, 足立 明⁶⁾, 木津 武⁷⁾, 外山正幸⁸⁾
T.Koike, K.Takahashi, S.Kawaguchi, K.Kiriyama, H.Gohyakuda, A.Adachi, T.Kizu, M.Sotoyama

- 1) 川崎製鉄株式会社 (〒 263-0005 千葉市稲毛区長沼町 351)
- 2) 日本鋼管株式会社 (〒 230-8611 横浜市鶴見区末広町 2-1)
- 3) 新日本製鉄株式会社 (〒 100-8071 東京都千代田区大手町 2-6-3)
- 4) 新日本製鉄株式会社 (〒 100-8071 東京都千代田区大手町 2-6-3)
- 5) 住友金属工業株式会社 (〒 160-0003 東京都新宿区本塩町 8-2)
- 6) 川崎製鉄株式会社 (〒 111-0051 東京都台東区蔵前 2-17-4)
- 7) 三菱重工業株式会社 (〒 231-8715 横浜市中区錦町 12)
- 8) 日立造船株式会社 (〒 100-8121 東京都千代田区一ツ橋 1-1-1)

The purpose of this study is to determine limit loads for pipe elbows subjected to in-plane bending. Bending tests were conducted in the closing and opening modes for full-scale miter bends which are often used for water pipelines. Load-deflection curves were obtained, and from these curves buckling onset or plastic collapse were determined. The experimental results were compared with those of the nonlinear finite element analysis code (MARC) with its special shell element. Practical formula are obtained to predict the critical strain and bending angle for buckling onset or instability loads.

Key words: miter bend, seismic design, buckling, strain, bending angle

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震では、震度7の激震被害地帯を生成し、海岸部付近には大規模な液状化被害をもたらした結果、都市内の道路橋、港湾施設、各種建築物だけでなくライフラインにも大きな被害を発生し、火災などの二次災害と多くの人命を失う結果になった。当該地震は、内陸部の活断層を震源とする地震が近代都市を襲った場合に、いかに甚大な被害をもたらすかを改めて認識させるものであり、この経験を踏まえて土木学会¹⁾では耐震設計に関する第一次、第二次提言が発表され、それに引き続いて道路橋示方書²⁾の改訂が行われた。

水道施設耐震工法指針³⁾も、上述の提言を踏まえ、さらに道路橋示方書との整合性を図って、1997年にその改訂版が発行された。そこでは、従来の地震動(レベル1)に加えてより大きな地震動(レベル2)を設定し、また地盤の液状化や側方流動に関する規定を新たに設定することになった。

レベル2地震動により発生する地盤ひずみが、0.1%~1%の範囲の大きなひずみ発生を予測させることから、埋設管はすべりを伴った伸び変形を示し、結果的に地盤と埋設管の間に無視できない相対変位を生成することになる。直管に隣接する曲管が、この相対変位を吸収することになることから、レベル2地震動の耐震検討では曲管の地震時変形挙動を考慮した耐震設計が要請されることになる。従来、ガス導管⁴⁾で標準的に使用されるスムーズベンドに関する大変位挙動の研究が多く行われてきたが、一方水道管路で多用されるマイターベンド(多節で構成される曲管)に関する研究事例はほとんど見受けられない。そこで、本研究では水道鋼管の曲管部の地震時曲げ性能を確認する目的で実験的研究とFEM解析による数値検討を実施したので、その結果を報告するものである。

研究方針として、マイターベンドの変位挙動が既往の知見が豊富なスムーズベンドの知見^{5), 6)}からどの程度類推可能かを見極める観点から、各種の検討を行なった。

2. 水道鋼管異形管の大変位挙動実験

2. 1 実験概要

使用した試験体は、管径400A、管厚6mm、曲率半径1.25Dの寸法を持つマイターバンドと呼ばれる節構造の曲管で、その曲がり角度は90度である。曲管には袖部に直管が連結されており、その長さは管端拘束の影響が出ないように少なくとも管径の3倍以上の長さを確保するようにした。曲管および袖管の詳細寸法をTable 1に示す。

試験体は二体であり、一体は内曲げ試験用であり、他一体は外曲げ試験用である。载荷は、Fig.-1に示す载荷装置を用いて変位制御で行なった。また、内圧は漏洩を確認するため0.02MPaとした。

試験体は、Fig.-2に示す形状であり、管ひずみは図中の断面1～2における周方向、軸方向のひずみを計測した。一方、曲管に発生するたわみ角度は、マイターバンド部を構成する曲管角度の角度変化により計測した。

曲管中央部（Fig.-2のNo.1断面）の形状変化を計測するにあたっては、同図中に示すように外側を背、内側を腹、左右側を脇と表現することにした。

今回実験に使用したマイターバンドの曲率半径Rは、ANSI B31.8の算定表を用いて $R=1.225D$ と算定された。

試験体材料の応力ひずみ曲線は、管材から試験片を軸方向に切り出し、JIS-Z-2241の引張試験を実施してFig.-3の曲線を求めた。同図より、当該管材の降伏応力は 350N/mm^2 であった。

3章におけるFEMを用いた数値解析では、Fig.-3の応力ひずみ特性値を管材の材料特性として採用した。

Table-1 試験体の寸法

	曲管	直管（袖管）
規格	JIS-G-3451 (F29)	JIS-G-3443 (STW400)
曲管角度	90°	-----
管径・管厚	400A x 6t	400A x 6t
実寸法	$\phi 406.4\text{mm} \times 6.14\text{mm}$	$\phi 406.4\text{mm} \times 6.14\text{mm}$
試験体番号	形状	試験区分
No.1	90°	内曲げ試験
No.2	90°	外曲げ試験

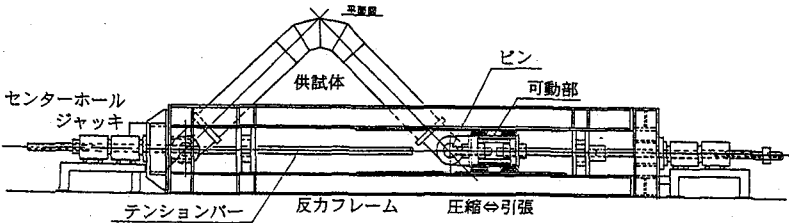


Fig.-1 実験装置

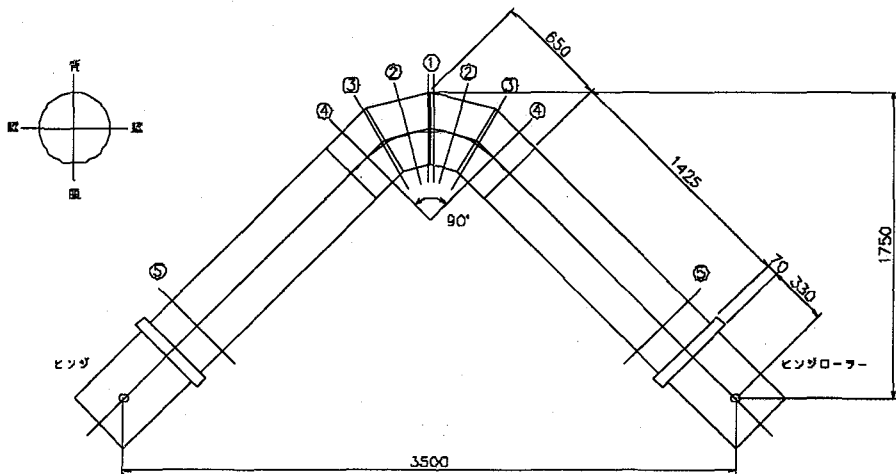


Fig.-2 試験体寸法とひずみゲージ添付位置

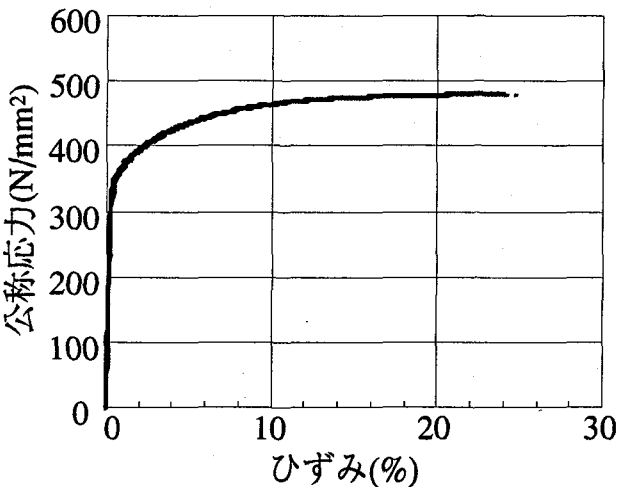


Fig.-3 管素材の公称応力 - ひずみ曲線

2. 2 実験結果

Fig.-4は、内曲げ、外曲げモードに対する曲管たわみ角と曲げモーメントの関係を示したものである。

内曲げモードでは、最大値は A_i で示す位置で発生し、その後変位载荷を継続し B_i 点で実験を停止した。最大モーメントは $65\text{kN}\cdot\text{m}$ であり、その時の曲管たわみ角は約 7.5 度となった。

最大点通過後の内曲げ曲管は、たわみ角の増加にもなって単調にモーメントを低下させる傾向のあることが判る。これは、载荷中の曲管断面が曲げ角度の増加に伴って一様に楕円化傾向を示すことに対応している。

一方、外曲げモードでは、 A_o 付近で曲線勾配が低下し、最初の最大モーメント点は B_o 点で発生するが、その後のたわみ角の増加に伴って、曲げモーメントは大きく変動し、最終的にたわみ角 40 度付近で曲管座屈による断面変形が過度となる特徴を示した。実験は、曲管端部が実験装置の最大変位に達した時点で終了したが、その段階でも漏洩は認められなかった。

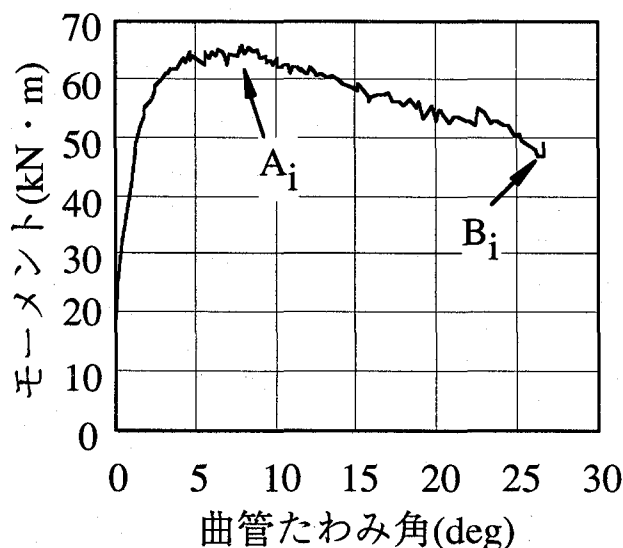
以上の内曲げ、外曲げの変形状況から判断すると、曲管の座屈開始は内曲げでは A_i 点、外曲げでは A_o 点で発生しているものと予想される。一方、 B_o 点は曲管部の全面的な座屈発生点であり、構造的には終局状態に対応するものと思われる。また、当該曲管の管径、管厚を持つ直管の降伏モーメント M_y 、全塑性モーメント M_p を求めると、それぞれ $M_y=266\text{kN}\cdot\text{m}$ 、 $M_p=344\text{kN}\cdot\text{m}$ となることから、内曲げ時最大モーメント(A_i 点)のモーメントは約 $0.24M_y$ あるいは $0.19M_p$ となり、外曲げ時の A_o 点のモーメントは、約

$0.68M_y$ あるいは $0.52M_p$ であった。一方、 B_o 点のモーメントは約 $1.35M_y$ あるいは約 $1.05M_p$ であることから、外曲げモードの場合は局部座屈開始(A_o 点)後も円形断面性能を保持しつつ B_o 点で管断面が全塑性状態に達した後に全体的な座屈が急速に進展することを伺わせる。

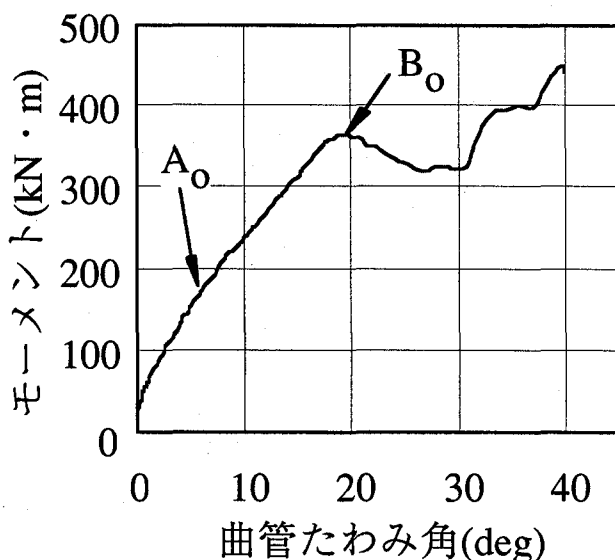
Fig.-5,6,7は、曲管の全体的な変形状況と中央断面形状の扁平化状況を写真およびひずみ計測、解析結果により示したものである。

Fig.-5の内曲げモードの写真は B_i 点に相当する曲げ角度 25.7 度、 108ch (Fig.-8にひずみゲージ貼付位置を示す)の局部ひずみ 10% の時の変形状況を示している。内曲げモードでは、座屈開始状態の A_i 点では周方向ひずみ分布に乱れはなく断面全体が脇-脇方向に長円化し楕円形状になることがFig.-6の周方向ひずみ-曲管たわみ角曲線およびFig.-7断面形状図からわかる。

外曲げモードの写真は、 B_o 点に相当する曲げ角度 19.6 度、 59ch (Fig.-8にひずみゲージ貼付位置を示す)の局所ひずみ 10% の時の変形状況を示している。この段階では、座屈は軸方向の曲げを伴って発生しているのが判る。そして、断面形状も背-腹方向に長円化する傾向が伺える。外曲げモードの場合は、内曲げモードに比較すると、Fig.-6に示すように、特にたわみ角 10 度付近でピークを迎えた後 20 度に亘って周方向ひずみが低下している。これは外曲げモードでは、座屈開始点 A_o までは、内曲げモードと同様に周方向ひずみが支配的であるが、それ以降は周方向ひずみよりも軸方向ひずみが支配的になってゆくことを示唆しているものと思われる。

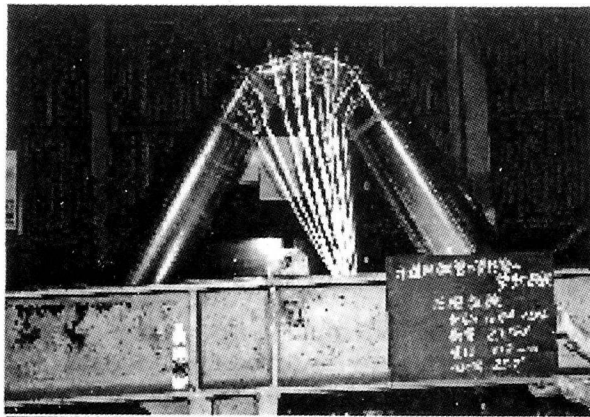


(1) 内曲げモード

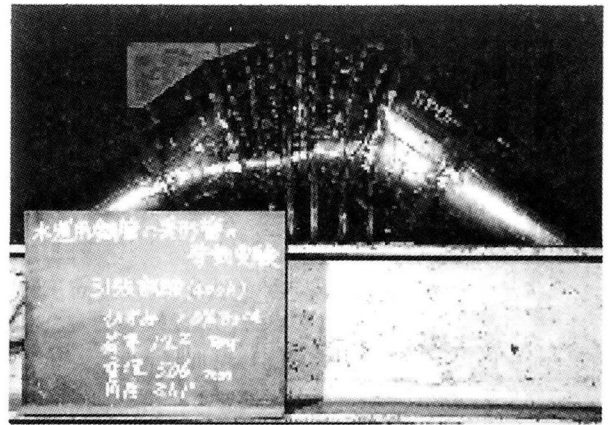


(2) 外曲げモード

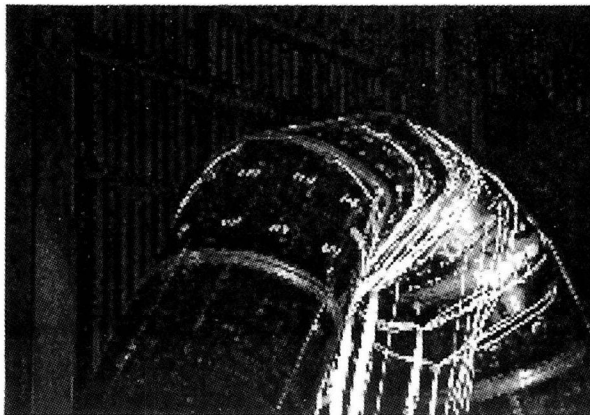
Fig.-4 曲げモーメントと曲管たわみ角の実験結果



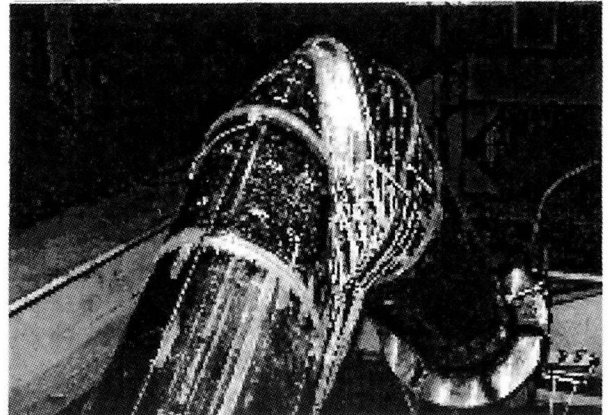
(1) 内曲げモード全体図



(2) 外曲げモード全体図

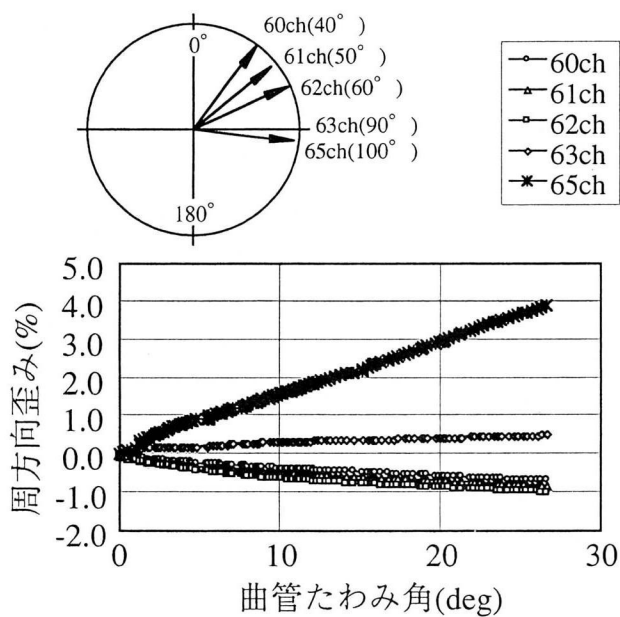


(3) 内曲げモード断面扁平化状況

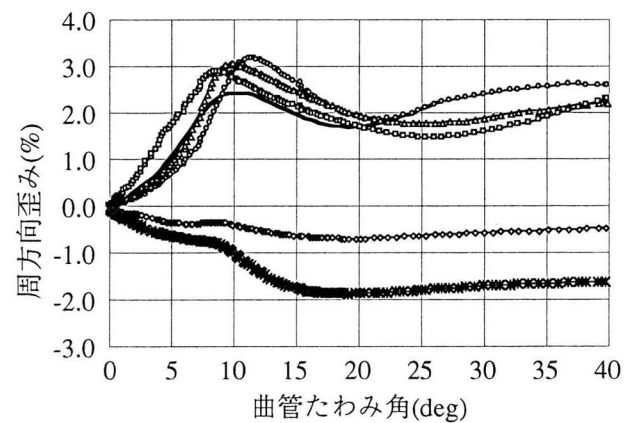


(4) 外曲げモード断面座屈発生状況

Fig.-5 変形状況と中央断面形状

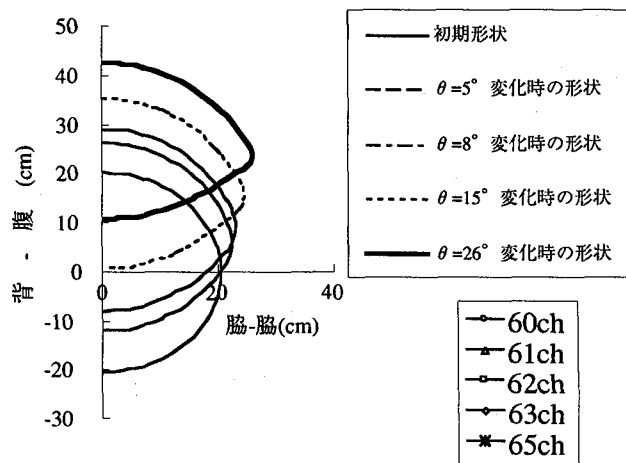


(1) 内曲げモード

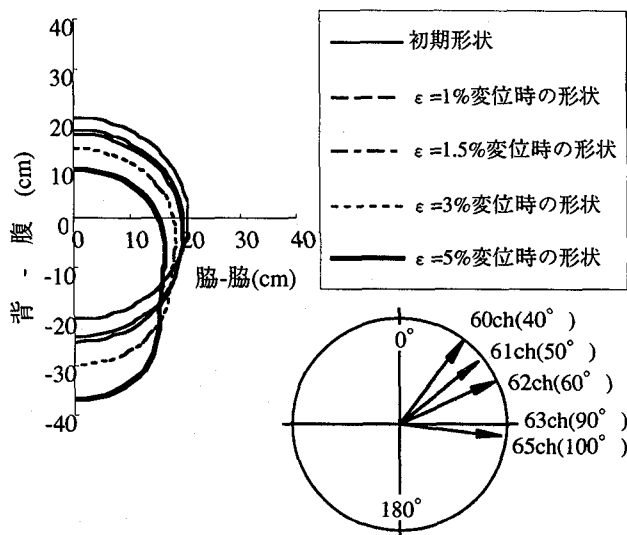


(2) 外曲げモード

Fig.-6 曲管たわみ角と曲管内周方向ひずみの関係



(1) 内曲げモード

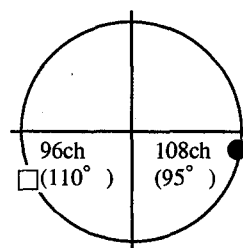


(2) 外曲げモード

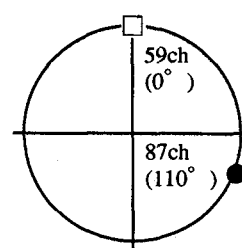
Fig.-7 曲管断面の変形状

Fig.-8は、内曲げ、外曲げモードの曲管曲げ変形特性について、その変化点における曲管ひずみの状況を観察したものである。すなわち、Fig.-4内に示す特性点 A_i, A_o, B_i, B_o をこの図内にプロットする。同図によると、内曲げモードの B_i 点は曲管内の周方向ひずみ(108ch)が急激に増加する点と対応しており、 A_o 点は87chの周方向ひずみが初めて減少する点と対応しており、さらに B_o 点は59chの軸方向ひずみがピーク値を与える点であることがわかる。Fig.-5の外曲げモードの写真を見ると、管頂部の59ch付近で軸方向座屈進展の様子を示しており、Fig.-8の結果と整合している。すなわち、上記3点は、曲管の曲げひずみ関係図で特徴あ

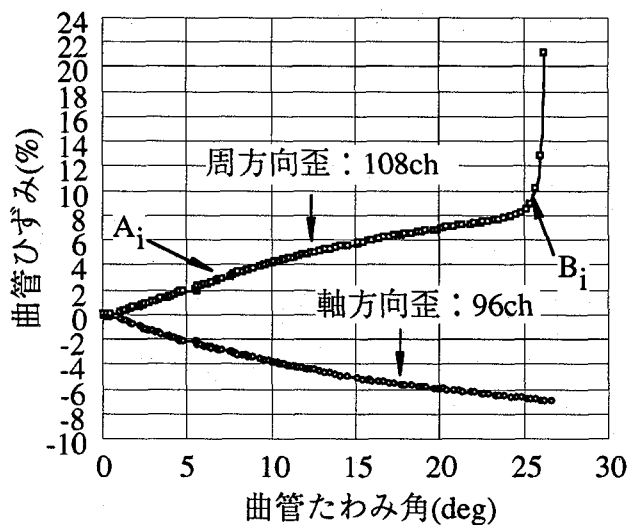
る変化を示す位置と対応していることがわかった。一方、 A_i 点に関しては上記のような特徴点不明であった。



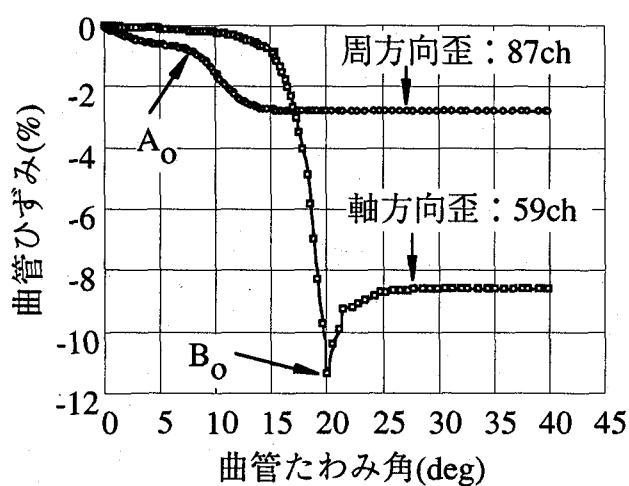
(1) 内曲げモード



(2) 外曲げモード



(1) 内曲げモード



(2) 外曲げモード

Fig.-8 曲管ひずみとたわみ角の関係

3. FEM 解析結果と実験結果との比較

FEM 解析コードは、MARC k-6.2 を採用した。Fig.-9 に解析モデルを示す。要素モデルは、4 点節点厚肉

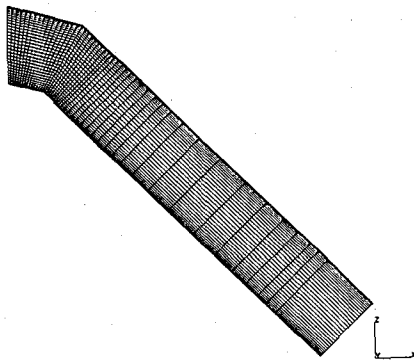
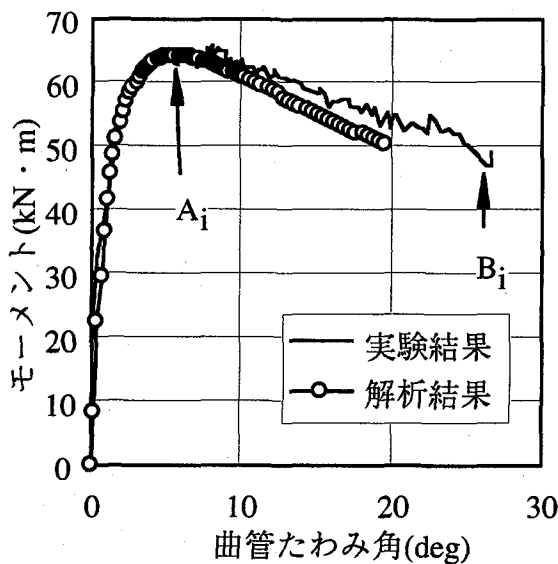
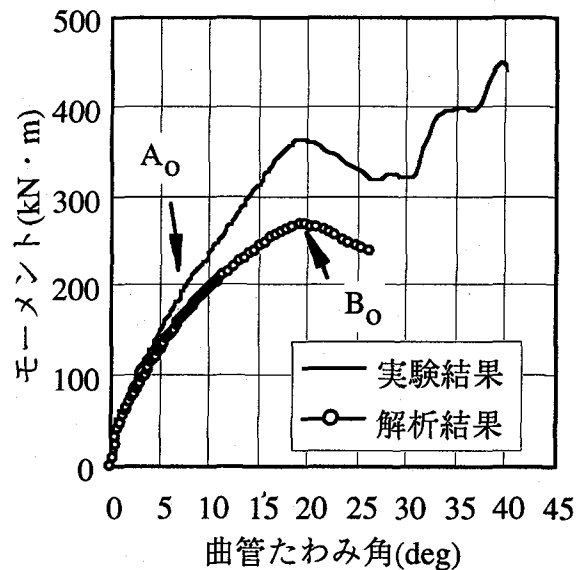


Fig.-9 解析モデル

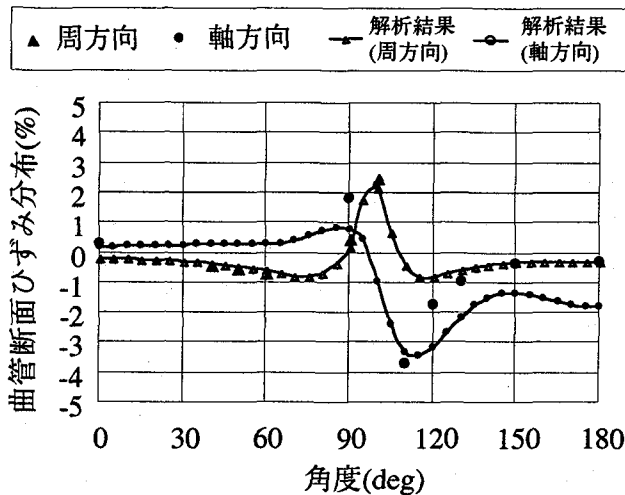


(1) 内曲げモード

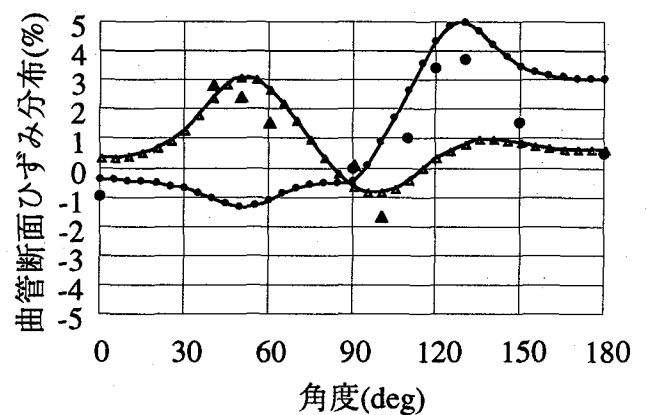


(2) 外曲げモード

Fig.-10 曲げモーメントと曲管たわみ角に関する実験値とFEM解析の比較



(1) 内曲げモード



(2) 外曲げモード

Fig.-11 中央断面のひずみ分布

シェル要素とした。管材の応力ひずみ関係は、Fig.-3 の関係を採用した。

Fig.-10 は、実験結果と解析結果を比較したものである。内曲げモードでは、曲管たわみ角および曲げモーメントの双方がよく一致することが確認できた。一方、外曲げモードでは、曲管たわみ角は両者ともよい対応を示しているが、曲げモーメントの大きさが実験結果の方が2割程度大きい値を示している。これは、実験における全体座屈発生時の曲管断面の複雑な変形状をFEM解析で十分正確に追跡できないことによる影響と推定される。

Fig.-11 は、曲げ角度10度における曲管中央断面のひずみ分布を示したものである。実験結果と解析結果は、局所的にはずれている所もあるが、大局的にはよい対応を示していると言えよう。

4. マイターバンド限界変形能力の簡易推定

Shalaby&Younan^{7), 8)} は、スムーズバンドに関する内曲げモードおよび外曲げモードにおける曲げモーメントと曲げ角度の関係とそれに影響を与える内圧の効果をFEMコードABAQUSを用いて数値計算的な検討を加えている。その結果によれば、内曲げモードの座屈開始点曲げモーメント M_{max} (Fig.-4の A_1 点)は、Table-2のパイプファクター h と全塑性モーメント M_p を用いたSpence&Findlayの算定式 $M_{max}=0.8h^{0.6}M_p$ がよい推定値を与えることを指摘している。

今回、マイターバンドに対して曲管のたわみ性解析の手法¹⁰⁾を適用して、内曲げおよび外曲げモードに対する限界状態におけるたわみ角を推定する簡易式をTable-2のように誘導した。すなわち、マイターバンドの弾塑性状態におけるたわみ角度および曲管ひずみは、弾性状態の曲管を対象とするたわみ性解析手法を直接適用して求めることができない。そこで、Fig.-4の曲げモーメント・たわみ角度の弾塑性特性を参考にマイターバンドの弾塑性状態を代表する割線弾性係数を導入して等価線形的なたわみ係数 n および応力集中係数 i を用いることで、弾塑性状態のたわみ角度および曲管ひずみを算定する簡易推定式を誘導した。ここで、同表中の ψ は、曲管の角度(radian)である。

Table-2では、以下に述べる限界状態での内曲げおよび外曲げモードに対応するたわみ角度、曲管ひずみ算定式を与えている。すなわち、内曲げモードは A_1 点のたわみ角、曲管ひずみ算定式を示し、外曲げモード

Table-2 簡易推定式一覧

項目	記号	内曲げモード	外曲げモード
降伏モーメント	M_y	$\frac{\pi}{4} \sigma_y \frac{(a^4 - b^4)}{a}$ $a = \frac{D}{2}, \quad b = \frac{(D - 2t)}{2}$	
全塑性モーメント	M_p	$\frac{4}{3} \sigma_y (a^3 - b^3)$	
パイプファクター	h	$\frac{Rt}{r^2}, \quad r = \frac{a+b}{2}$	
たわみ係数	n	$n_i = \frac{1.52}{h^{5/6}}$	$n_o = C \cdot \frac{1.52}{h^{5/6}}$
応力集中係数	i	$i_i = \frac{1.80}{h^{2/3}}$	$i_o = C \cdot \frac{1.80}{h^{2/3}}$
最大モーメント	M_{max}	$0.8 h^{0.6} M_p$	M_p
たわみ角	θ	$\psi n_i \frac{M_p R}{EI}$	$\psi n_o \frac{M_p R}{EI}$
曲管ひずみ	ϵ	$i_i \frac{M_p D}{EI} \frac{D}{2}$	$i_o \frac{M_p D}{EI} \frac{D}{2}$

Table-3 実験値と簡易推定結果の比較

(1) 局部座屈開始時

		実験結果	簡易式
曲管たわみ角	内曲げ	7°	6.3°
	外曲げ	7.5°	6.3°
曲管部最大ひずみ	内曲げ	3%	2.2%
	外曲げ	1%	2.2%

(2) 終局限界状態

		実験結果	簡易式
曲管たわみ角	内曲げ	26°	27°
	外曲げ	20°	19.0°
曲管部最大ひずみ	内曲げ	10%	10%
	外曲げ	11.5%	6.5%

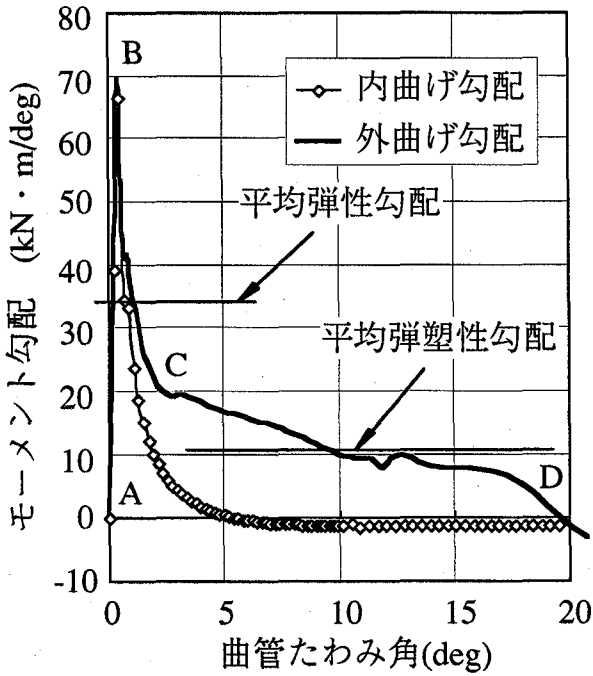


Fig.-12 外曲げモードでの曲げ剛性低減

は B_0 点のたわみ角、曲管ひずみ算定式を示している。

したがって、外曲げモード最大モーメントは、2.2節の考察より全塑性モーメントで近似することにした。さらに、外曲げモードのたわみ係数、応力集中係数を算定する際に係数 C を挿入しているが、これは外曲げモードの A_0 点以降でFig.-4の勾配が弾性状態の1/3程度に低下することから $C=1/3$ と定めたものである。Fig.-12は、Fig.-4の勾配の変化を検討したものであり、区間AB(弾性状態)と区間CD(局部座屈後の代表区間)の平均勾配がそれぞれ35, 11となることから、概略 $C=1/3$ と設定する根拠とした。

また、 A_0 点の曲管たわみ角は弾性状態を考慮して、 A_1 点の値と同一とした。一方、 B_1 点の曲管最大ひずみはFig.-8より10%と先験的に与え、それに対応するたわみ角を算定した。

Table-3は、内曲げ・外曲げの実験値と簡易推定値を比較したものである。曲管たわみ角に関しては、簡易式がよい推定値を与えているのが確認できる。

5. まとめ

- 1) マイターベンドの内曲げ、外曲げモードにおける座屈開始状態、終局状態の変形状特性を実験的・数値解析的に明らかにした。
- 2) マイターベンドの終局状態は、内曲げモードでは管断面の扁平化が進むだけであるが、外曲げモードでは軸方向座屈が発生する。
- 3) 座屈開始状態の曲管たわみ角は内曲げ、外曲げモードともに約7度程度。終局状態での最大局所ひずみは10%、たわみ角は26度(内曲げ)、20度(外曲げ)であった。
- 4) 曲管のたわみ特性を示す応力集中係数、たわみ係数と鋼管の全塑性モーメントを用いて、マイターベンドの局部座屈開始ひずみおよび終局状態到達時ひずみを推定する簡易式を提案した。そして、提案した簡易推定式は、座屈開始状態、終局状態に対応した曲管たわみ角のよい推定値を与えることが判明した。

謝辞

本研究は、日本水道鋼管協会設計委員会の埋設管耐震設計小委員会活動の一環として実施したものである。実験実施のための資金的援助を戴いた委員所属各社に対し深甚の謝意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会(1996): 土木学会耐震基準等に関する提言集, (社) 土木学会.
- 2) 日本道路協会(1996): 道路橋示方書・同解説 V耐震設計編, (社) 日本道路協会.
- 3) 日本水道協会 (1997): 水道施設耐震工法指針, (社) 日本水道協会.
- 4) 日本ガス協会 (1982): ガス導管耐震設計指針, (社) 日本ガス協会.
- 5) 吉崎浩司, 細川直行, 安藤広和, 小口憲武, 曾我部潔, 濱田政則 (1997): 地盤の大変位に対する曲管配管の変形特性, 土木学会論文集, No.626/I-48, pp.173-184.
- 6) Yoshizaki, K. and N.Oguchi(1996): Estimation of the deformation behaviour of elbows for an earthquake-resistant design, 11WCEE, Paper No.1783, Mexico.
- 7) Shalaby, M.A. and M.Y.A.Younan(1999): Limit loads for pipe elbows with internal pressure under in-plane closing bending moments, ASME, Journal of Pressure Vessel Technology, Vol.120, pp.35-42.
- 8) Shalaby, M.A. and M.Y.A.Younan(1999): Limit loads for pipe elbows subjected to in-plane opening bending moments and internal pressure, ASME, Journal of Pressure Vessel Technology, Vol.121, pp.17-23.
- 9) Spence, J. and G.E.Findlay(1973): Limit loads for pipe bends under in-plane bending, Proceedings, 2nd international Conference on Pressure Vessel Technology, Vol.I-28, pp.393-399.
- 10) 小池 武, 今井俊雄(1998): 強震地震動に対する地中埋設管路の変位挙動解析, 構造工学論文集, Vol.44A, pp.1647-1658.

(受付日 1999年9月17日)