

内圧を受けるラインパイプの変形特性

三木千壽¹・小口憲武²・打田孝良³・立松秀和⁴・○井上健裕⁵・池田里恵⁶

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 幹線部 (現 大阪事業本部 設備営業部)
(〒550-0023 大阪市西区千代崎 3 丁目南 2 番 37 号)

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 新日本製鐵株式会社 鉄鋼研究所 (〒293-8511 富津市新富 20-1)

⁶工修 新日本製鐵株式会社 エナジー・エンジニアリング 事業部 (〒163-1020 東京都新宿区西新宿 3-7-1)

地震時の液状化による大規模な地盤変位に対するガス導管の耐震性を照査し、適切な設計に資するため、ラインパイプ(直管)の軸圧縮特性および曲げ特性について調査した。外径管厚比 D/t を変化させた X52-X65 の鋼管を試験体とし、内圧負荷の下で軸圧縮試験・曲げ試験を実施、合わせて FEM 解析を実施した。その結果、軸圧縮・曲げとも、変形性能は局部座屈で支配され、局部座屈部で座屈完成後の変形により引張り応力が生じ亀裂が発生した。さらに、この変形性能を、変形挙動の分析から定式化し簡易推定式を導出した。この簡易推定式は軸圧縮試験の結果を精度良く予測した。また曲げ試験結果に対し安全側の評価を与えた。

Key Words: line pipe, gas pipe-line, earth quake, liquefacted ground, seismic disaster, axial compression, buckling, ductile fracture, finite element analysis

1. 緒言

阪神大震災における鋼構造物の被害が多数報告され¹⁾、地震によって鋼構造物が大変形を伴う厳しい外力を受けることが明らかとなった。建築鋼構造物については、溶接協会にて大変形、繰返し負荷の下での安全性確保を目的として脆性破壊防止の観点からの検討方法が報告されている²⁾。

一方、地震時に液状化現象が起これば、液状化した地盤が大きく変位するため、地上・地下の構造物においてその破損が懸念される。実際、日本海中部地震において、液状化による埋設管の損傷事例が報告されている³⁾。

(社)日本ガス協会では、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。その中で、ラインパイプ(直管)の変形性能は、主要な課題の一つであった。

円筒鋼管の塑性変形挙動、座屈挙動については数多くの報告があるが、これらのほとんどは構造要素の柱材としての円筒鋼管であり、内圧が無い場合の研究である⁴⁾。

著者らは、ラインパイプの変形性能に関して実験的検討を行った結果、内圧負荷のもとでは局部座屈支配型の変形モードとなることを報告している⁵⁾。

本研究では、内圧負荷の下での変形性能について実験および FEM により検討した。また、これらの結果をもとに、直管の限界変形を推定する簡易式の定式化について検討した。

2. 鋼管の軸圧縮試験および曲げ試験

(1) 試験方法

内圧を負荷した鋼管に軸圧縮荷重及び曲げ荷重を作用させた際の変形挙動を、実験的に調査した。試験体の一覧を表-1, 2 に示す。

軸圧縮試験及び曲げ試験要領を、図-1～図-3 に示す。また、曲げ角度は測定位置を図-4 に示す。

(2) 試験結果

試験結果の一覧を表-3, 4 に示す。軸圧縮および曲げ試験とも内圧負荷のもとでは、局部座屈を伴う変形を示した。局部座屈は曲げ試験では 1 山のみであったが、軸圧縮試験では複数山生じた。

表-1 軸圧縮試験片一覧

記号	鋼種	管径 D, mm	肉厚 t, mm	D/t	試験長 L, mm	内圧
1	X65	318.5	7.9	40.3	800	0.4SMYS
2	X65	318.5	7.9	40.3	800	内圧無し
3	X65	508.0	8.7	58.4	1290	0.4SMYS
4	X65	318.5	11.1	28.7	800	0.4SMYS
5	X52	406.4	7.9	51.4	1020	0.4SMYS

表-2 曲げ試験片一覧

記号	鋼種	管径 D, mm	肉厚 t, mm	D/t	試験長 L, mm	内圧
1	X65	318.5	7.9	40.3	10700	0.4SMYS
2	X65	318.5	7.9	40.3	10700	内圧無し
3	X65	318.5	11.1	28.7	10700	0.4SMYS
4	X52	406.4	7.9	51.4	10700	0.4SMYS
5	X65	508.0	8.7	58.4	10700	0.4SMYS

表-3 軸圧縮試験結果一覧

記号	最大荷重	最大荷重 時の変位	限界変位	備考
1	406tonf	11.1mm	566mm	局部座屈部で漏洩
2	411tonf	9.1mm	179mm	局部座屈部で漏洩
3	717tonf	7.3mm	416mm	局部座屈部で漏洩
4	534tonf	37mm	512mm	局部座屈部で漏洩
5	416tonf	25mm	534mm	局部座屈部で漏洩

表-4 曲げ試験結果一覧

記号	最大曲げ モーメント	最大曲げモーメント時 曲げ角度 $\omega A/\omega B$	限界曲げ角 度 $\omega A/\omega B$	備考
1	36 tonf・m	25°/28°	65°/68°	局部座屈部で漏洩
2	32 tonf・m	11°/13°	140°/141°	き裂無し
3	56tonf・m	50°/55°	99°/103°	局部座屈部で漏洩
4	53tonf・m	30°/36°	83°/90°	局部座屈部で漏洩
5	102tonf・m	9°/11°	44°/46°	局部座屈部で漏洩

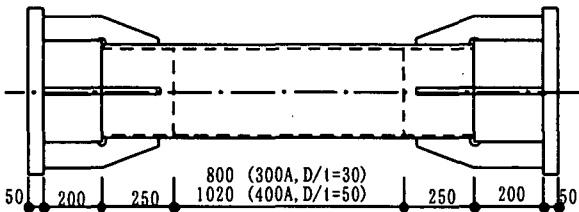


図-1 軸圧縮試験片

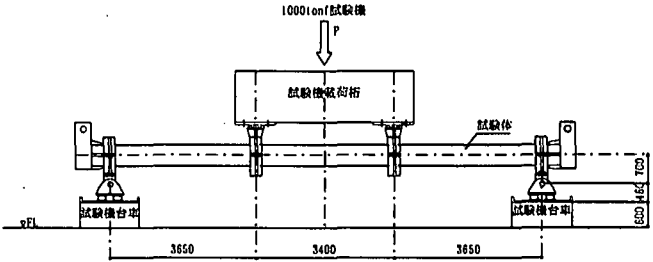


図-2 4点曲げ（曲げその1）試験

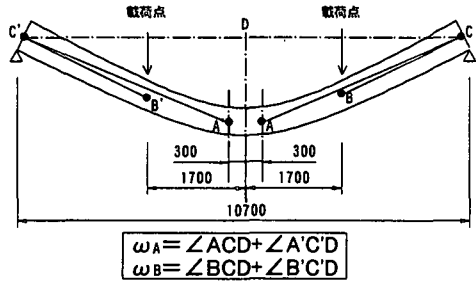


図-4 曲げ角度測定位置

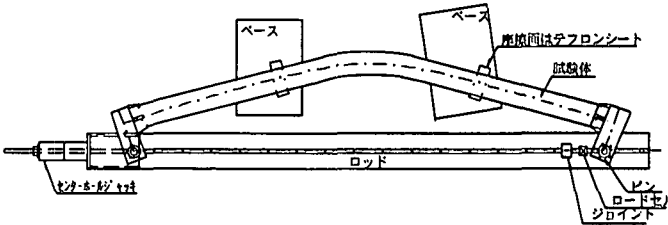


図-3 曲げ圧縮による内曲げ（曲げその2）試験



図-5 試験後の試験体写真

が生じ周方向に延性亀裂が生じ漏洩に至った。

軸圧縮試験での局部座屈開始時の管の平均歪を D/t で整理して図-6 に示す。図中には、加藤等の座屈歪の式⁹⁾も合わせてプロットした。加藤等の式は本報告の局部座屈開始歪をほぼ安全側に評価している。

試験体にあらかじめ 50mm ピッチで引いたケガキ線を元に座屈波長を測定した。実験で測定された座屈波長を Timoshenko の式⁷⁾, Bijlaard の式⁸⁾と比較して図-7 に示す。図には Sobel⁹⁾の結果もプロットした。図から、座屈波長は Timoshenko の式で記述できることがわかる。

3. 変形性能の簡易推定

(1) 軸圧縮限界歪簡易推定式

安全側の推定とするために、座屈 1 山分だけを考えることとする。座屈波長を入とすれば、座屈後座

図-5 に試験後の試験体写真の例を示す。試験体は、局部座屈完成後、座屈山部が倒れ込み、引張り応力

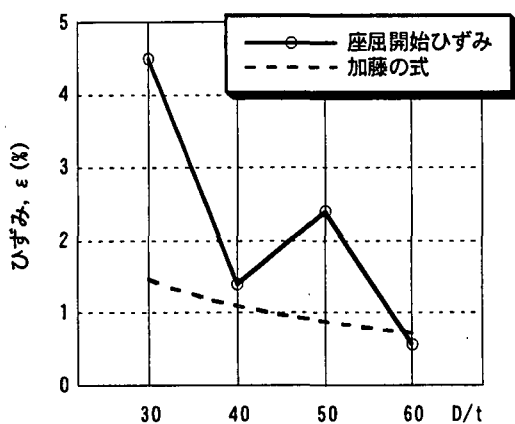


図-6 軸圧縮試験座屈歪

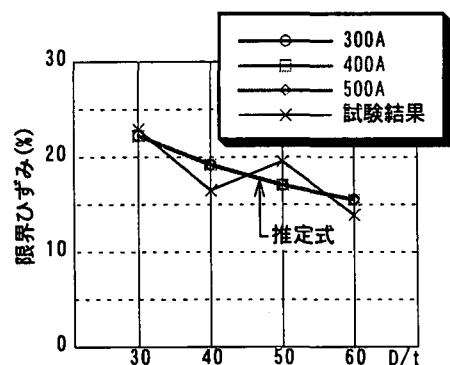


図-8 直管簡易推定式による推定

屈 1 山が完成して管内面同士が接触するまでに、局部座屈部は $\lambda \cdot 2t$ 変形することになり、従って座屈一山完成までのひずみ ε は座屈ひずみ ε_B を用いて次式の通り表される。

$$\varepsilon = \varepsilon_B + \frac{(\lambda - 2t)}{L_0}$$

座屈完成後の倒れ込みにより $2t$ 変形した後、その引張り側のひずみが破断伸びに達したときき裂が貫通すると仮定する。座屈ひずみに加藤の式を、座屈波長に Timoshenko の式を用い、破断伸びを EL として、次の簡易推定式が得られる。

$$\varepsilon_i = \frac{44t}{100D} + \frac{2 \cdot 1.72}{\sqrt{2}} \cdot \frac{t}{L_0} \cdot \sqrt{D/t} \cdot (1 + \frac{EL}{2})$$

実験結果と本推定式を図-9 に比較した。図中の実験結果は、座屈一山完成時の歪に最終山での倒れ込みき裂貫通のひずみを加えたものである。また、推定式では $L_0 = 2.5D$ 、 EL は 35% として計算した。図より本推定式は実験結果と良く一致している。

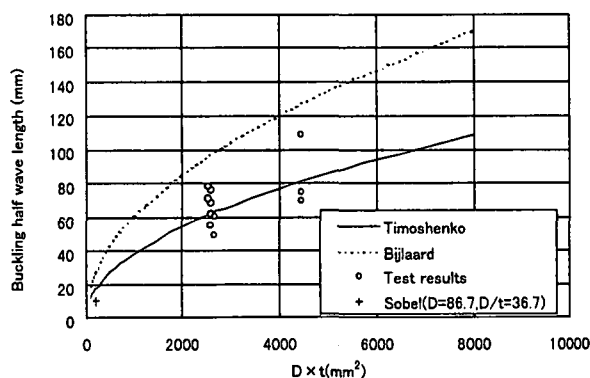


図-7 軸圧縮試験の座屈波長

(2) 限界曲げ角度簡易推定式

曲げ試験の場合には、4 点曲げでは内スパン内で一様モーメント状態であるが、圧縮曲げではモーメントが分布するため、歪分布はモーメントに応じて勾配を持つと思われる。

曲げ試験片の歪分布を FEM 解析結果により調査した。解析は汎用 FEM コード MARC K6.2 を用い、対称性を考慮してシェル要素による 1/4 モデルを作成して解析した⁵⁾。

FEM 解析結果より、曲げ試験の最大曲げモーメント時の曲げ腹側の軸ひずみの軸方向分布を、軸方向の位置を管径 D で規格化して、また歪を軸圧縮試験での座屈開始ひずみで規格化して図-10 に示す。No.5 試験体のデータは 4 点曲げ時に最大曲げモーメントを示したため、軸ひずみ分布は曲げの内側支点内で一定であるが、その他の試験体では、ひずみはほぼ線形に分布している。このひずみ分布を図-11 の様に直線近似して簡易推定式を求める。

この歪による曲げ角度は、中立軸が保持され断面の扁平がないとし、曲げ角度の定義をある断面での法線の変化量と定義すれば、次式を得る。

$$\omega_l = 2 \cdot \int \varepsilon(x) dx / D$$

ただし、積分は塑性域に対して行うものとする。

座屈の倒れ込みとその後のき裂貫通が引張側歪が破断伸びとなった時点で生じると仮定して、座屈山の形成に関しては曲げ外側の歪を無視すると、座屈波長を λ 、破断伸びを EL として次式を得る。

$$\omega_l = (2 \cdot \int \varepsilon(x) dx + \lambda \cdot (1 + EL/2)) / D$$

軸圧縮の場合と同様、座屈歪に加藤の式、座屈波長に Timoshenko の式を用い、中央から kD の位置まで積分すると、次式を得る。

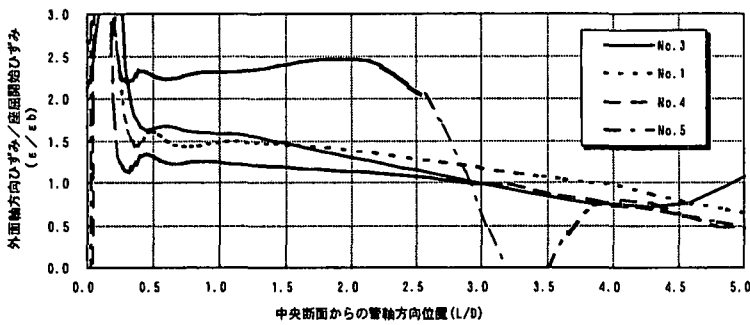


図-9 規格化した曲げ試験片の歪分布 (FEM 解析結果)

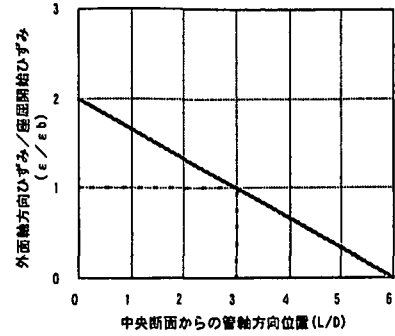


図-10 歪分布の直線近似

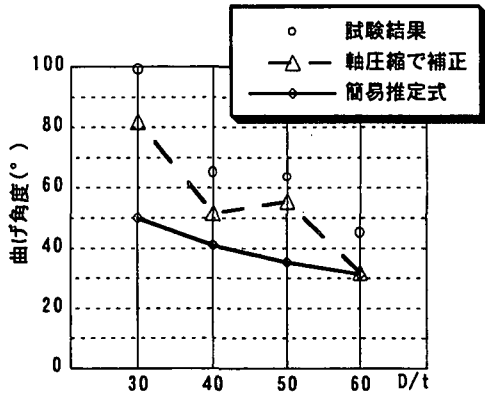


図-11 曲げ角度の簡易推定式推定結果

$$\omega_l = \frac{44t}{100D} \cdot 4 \cdot \left(-\frac{k^2}{6} + 2k \right) + \frac{2 \cdot 1.72}{\sqrt{2D/t}} \cdot \left(1 + \frac{EL}{2} \right)$$

ただし、局部座屈部では不均一に変形しているため座屈部周辺を除き、図-11 に仮定したひずみが6Dの位置で0になることから、 $1.0 < k \leq 6.0$ とする。

この式を試験結果と比較して図-12 にしめす。簡易推定式は安全側ではあるが、限界曲げ角度を過小評価している。図中、座屈ひずみに加藤の式でなく、軸圧縮での実測値を用いた結果を比較した。この軸圧縮で実測値を用いた結果は $10^\circ \sim 30^\circ$ 程度過小評価しているものの、かなり誤差は小さくなる。

この誤差の原因として、定式化に際し無視した弾性変形の影響が $2^\circ \sim 5^\circ$ 程度あると考えられる。また実験では断面が $5\% \sim 10\%$ 扁平化しており、これによる誤差は $5^\circ \sim 10^\circ$ に対応する。これらの影響が重畳したものと考えられる。

4. 結論

ガス配管の液状化時の応答を調査するため直管の軸圧縮試験および曲げ試験を行い変形性能の簡易推定式を定式化した。この簡易推定式は軸圧縮試験結果を精度良く推定した。また曲げ試験結果については $10^\circ \sim 30^\circ$ の誤差を含むものの安全

側の推定を与える。

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) 土木学会：阪神大震災災害調査報告
- 2) 日本溶接協会：動的繰返し大変形を受ける溶接構造物の脆性破壊性能評価方法，WES-TR2808，2000
- 3) 西尾宣明：1983年日本海中部地震における地盤液状化に起因するパイプライン破壊過程の考察，J. Struct. Mech. Earthquake Eng., JSCE, No.556/I-38, pp.11s-21s, 1997
- 4) 例えば、三木千壽，Jorge MUELLER，佐々木哲也：断面変化部を有する円形断面鋼製橋脚の耐震性能の検討，土木学会論文集，No.605/I-45, pp.117-127, 1998
- 5) Chitoshi Miki, Noritake Oguchi, Takayoshi Uchida, Atsushi Suganuma, Takehiro Inoue: Deformation and Fracture Properties of Straight Steel Pipe with Internal Pressure under Uniaxial Compressive and Bending Load, 12th World Conference on Earthquake Engineering, 2000
- 6) 加藤勉，秋山宏，鈴木弘之：軸圧縮を受ける鋼管の組成局部座屈耐力，日本建築学会論文集，第204号，pp.9-17, 1973
- 7) チモシェンコ・ギアー共著：弾性安定の理論<下>，ブレイン図書出版，pp.435-439, 1974
- 8) Bijlaard, P.P.: Theory and Tests on the Plastic stability of Plates and Shells, Journal of the Aerospace Sciences, Vol.16, pp. 529-541, 1949
- 9) Sobel, L.H. and Newman, S.Z.: Journal of Pressure Vessel Technology, Transactions of the ASME, Vol.102, 1980