

「HIPER[®]」による高圧ガスパイプラインの耐震設計

Seismic Design of High Pressure Gas Pipeline Applying “HIPER[®]”

矢野 達夫 YANO Tatsuo JFE エンジニアリング パイプライン本部 設計部 グループマネージャー
浅野 嘉章 ASANO Yoshiaki JFE エンジニアリング パイプライン本部 設計部長
鈴木 信久 SUZUKI Nobuhisa JFE テクノリサーチ ソリューション本部 シニアフェロー・工博

要旨

高圧ガスパイプラインの耐震設計では、2001年に性能設計が導入されている。性能設計の基本的コンセプトは、レベル1地震動に対しては無被害で継続操作が可能であること、レベル2地震動および側方流動や地盤沈下や断層変位などの地盤変状に対しては、変形しても漏えいしないことである。本論文では、側方流動および断層変位に対して、曲げ座屈開始ひずみを許容値とした耐震設計例を示し、JFEが独自に開発したラインパイプ「HIPER[®]」を適用することによってパイプラインの安全性を向上させることができることを示す。解析モデルは、外径609.6 mm、API 5L L450 (X65) のラインパイプとした。

Abstract:

Goal-setting design has been introduced into the seismic design of high pressure gas pipelines since 2001. Requirements for the design concept to ensure pipeline integrity to withstand small and medium earthquakes shall be securing normal operability, which means no damage shall occur and operation immediately after an earthquake can be resumed. As for large and huge earthquakes and permanent ground deformation induced by lateral spreading and surface faults, pressure integrity shall be taken into account to prevent leakage of pipeline containment. This paper explains examples of strain-based design applying “HIPER[®]” for the lateral spreading and fault movement defining the critical local buckling strain as allowable strain. The results show that JFE’s “HIPER[®]” will be effective to ensure pipeline integrity compared to conventional pipes. The API 5L line pipe with L450 (X65) grade (API: The American Petroleum Institute), outside diameter of 609.6 mm, was used for the case studies.

1. はじめに

長距離・高圧のガスパイプラインは、阪神大震災以降、さらに耐震性を高めるために、大規模地震による地盤震動と地盤変状（側方流動）を考慮して設計されるようになってきている。

現行のパイプラインの耐震設計^{1,2)}は、側方流動に対して「安全であることを確保する（変形しても漏洩しない）ことを前提とした性能設計」が行なわれている。

基準の流れは、上記以上の大変形である断層変位や、変形後の安全性を確保した（変形しても漏洩しない）パイプラインの再利用の有無など、現在規定されている検討項目以外の耐震安全性に関する項目は、パイプライン事業者およびガス事業者の責任における性能設計が前提になっている（表1）。

本報告では、パイプラインの性能設計における基本的な考え方と「HIPER[®]」を用いた耐震設計例を示す。

2. 高圧ガスパイプラインの耐震設計基準

2.1 ガス事業法における耐震検討

国内の高圧ガスパイプラインを対象とした法規は、「ガス事業法」、「電気事業法」、「高圧ガス保安法」、「鉱山保安法」がある。本報では、地震動に対する耐震設計をはじめ、液状化に対する基準も規定されているガス事業法について、耐震設計基準の基本的な考え方を示す。

「ガス事業法」では、「ガス工作物の技術上の基準を定める省令」が2000年に性能規定化され、ガス事業者の責任において安全性を確保することが前提になっている。ただし、基本的な事項については「ガス工作物技術基準解釈例」⁴⁾に従って設計するのが一般的であり、耐震設計については「高圧ガス導管耐震設計指針」¹⁾および「高圧ガス導管液状化耐震設計指針」²⁾に従って許容ひずみベースの設計が行なわれている。

2.2 許容値設定の考え方と課題

耐震設計基準では、検討項目によって許容値が異なる。

表 1 耐震基準の変遷

Table 1 History of seismic design codes

Year	Design codes	Checking items	Critical parameters for design
1974	Petroleum Pipeline Design Codes (Draft) ³⁾	Ground motion	Allowable stress
1995	(The 1995 Kobe Earthquake)		
2000	Seismic Design Codes for High Pressure Pipelines	Ground motion Level-2	Allowable strain
2001	Seismic Design Guidelines Considering Lateral Spreading	Lateral spreading ground settlement	Allowable bending angle
2011	(The 2011 Tohoku Offshore Earthquake)		
2012 and after	Company's own design codes	Large deformation fault movement	Specific parameters

表 2 高圧ガス導管の許容ひずみと許容変形量

Table 2 Allowable strain and allowable deformation of high-pressure gas pipelines

Ground displacement		Deformation mode	Seismic integrity	Allowable strain
Temporary ground deformation	Ground motion Level-1	Cyclic axial deformation ($N=50$)	Normal operability	Straight: 1% or $35t/D$ Bend: 1%
	Ground motion Level-2	Cyclic axial deformation ($N=3-5$)		
Permanent ground deformation	Lateral spreading	Bending deformation (Irreversible)	Pressure integrity	Straight: 30% Bend: Opening: 10% Closing: 30%

これは、それぞれの検討項目によって、パイプラインへ与える荷重の大きさや頻度が異なるためである。

(1) 許容応力設計法 (弾性設計)

降伏点 (σ_y) を安全率 2 で除した値を主荷重の許容値とし、その他の従荷重に関しては、頻度などの違いによって種々の割増率を乗じて許容値を設定している。

(2) 許容ひずみ設計法 (塑性設計)

表 2 に示すとおり、地震で発生する種々の変位の変形モード、頻度などを考慮し、許容ひずみの値を設定している。

上記のうち、ガス耐震レベル 2 以上の変形に対する許容値の考え方は、「パイプラインは変形しても漏洩しない」ことを基準としており、変形が生じた後のパイプラインの継続操業を可能としたものとはなっていない。

また、図 1 に示すように、現行基準以外に、地盤の大変形には断層変位がある。パイプラインは、線状構造物であるため、断層と交差する可能性も否定できない。このような場合、パイプラインの耐震安全性をさらに高めるためには、断層変位に対する性能設計も必要になってくるであろう。

3. 性能設計による耐震設計例

3.1 変形性能に優れたラインパイプ「HIPER[®]」

従来は、変形性能を (1) 式のように管厚と管径の関数で表していたため、変形性能を向上させるためには、管厚を厚くする必要があった^{5,6)}。

$$\epsilon_{\text{per}} = 35 \frac{t}{D} \quad (\%) \quad \dots\dots\dots (1)$$

D : 管径, t : 管厚

一方、(2) 式は変形性能を材料のひずみ硬化特性の関数で表しているため、管厚一定のまま材料特性を改良することによって変形性能を向上させることができる。「HIPER[®]」は、この特性を向上することで変形性能を高めている。

$$\epsilon_{\text{per}} = \frac{4}{3} \sqrt{n} \left(\frac{t}{D} \right) - \frac{\sigma_0}{2E} (1+n) \quad \dots\dots\dots (2)$$

E : ヤング率, n : ひずみ硬化指数, σ_0 : 降伏応力

3.2 曲げ座屈開始ひずみと解析手法

この節では、表 3 に示す 3 種類のスペックのパイプを用

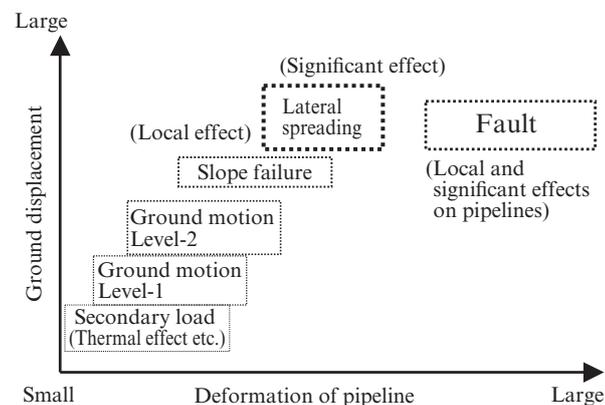


図 1 地盤変位とパイプラインの変形

Fig. 1 Ground deformation and corresponding

表3 解析に用いるパイプの仕様

Table 3 Pipe dimensions used for finite element analysis

Parameters	Conv. (1)	Conv. (2)	“HIPER [®] ”
Pipe grade	API 5L L450 (65)		
Pipe diameter (mm)	609.6		
Wall thickness (mm)	14.3	20.6	14.3
Yield ratio	0.93		0.85
Stress ratio, $\sigma_{2.0}/\sigma_{1.0}$	1.01		1.03

Conv. (Conventional linepipe): 一般管を示す。管厚の違いにより2種類を用意。

表4 基準許容値

Table 4 Critical compressive strain for the pipelines

	Conv. (1)	Conv. (2)	“HIPER [®] ”
Critical compressive strain, ϵ_{cr}	0.87%	1.06%	1.46%

いて、液状化による側方流動と断層変位に対する許容値と簡易解析手法を用いた設計例を示す。

設計するうえでの基準となる許容値は、「被害がなく、修理することなく継続操作が可能である。」という耐震性能を有することをベースとし、曲げ座屈開始ひずみとする。

曲げ座屈開始ひずみは、シェル要素によるFEM(有限要素法)解析で求めるのが一般的である。表4にシェル要素によるFEM解析を行ない、設定した許容値(ϵ_{cr})を示す。

許容値は、曲げ座屈開始時のピークひずみの位置を中心として2Dの位置の平均ひずみ(ϵ_{cr})とする⁷⁾。あらかじめ、シェル要素解析により、直管の曲げ座屈特性を把握し、 ϵ_{cr} を設定することにより、パイプラインの変形解析をビーム要素で行なうこととする。

図2(1)~(3)に各パイプが曲げ座屈開始ひずみに達した時の3種類のパイプの変形状況を示す。「HIPER[®]」は、材料特性に優れるため、一般管(Conv.)に比べ、ひずみの局所への集中が少ないことが分かる。

3.2 液状化による側方流動解析例

本節では、本論で示した3種類のパイプの液状化による側方流動に対する耐震特性を検証する。

図3に解析モデルを示す。パイプはビーム要素とし、地盤は、液状化指針における地盤バネを用いた。

図4に、側方流動幅を20, 40, 60, 80 mとし、側方流動最大変位を5 mまで流動させた解析結果を示す。解析結果より、側方流動幅・側方流動変位の大きさにより、パイプラインの変形モードは大きく異なる。Conv. (1), Conv. (2)ともに、側方流動幅が40 mでは、2~3 m、側方流動幅が60 mでは4.5 m程度の側方流動で、 ϵ_{cr} に達して、曲げ局部座屈が開始することが分かる。

3種類のパイプは、許容値の値が異なるため、各パイプによる発生ひずみを ϵ_{cr} で無次元化して比較した結果を図5に

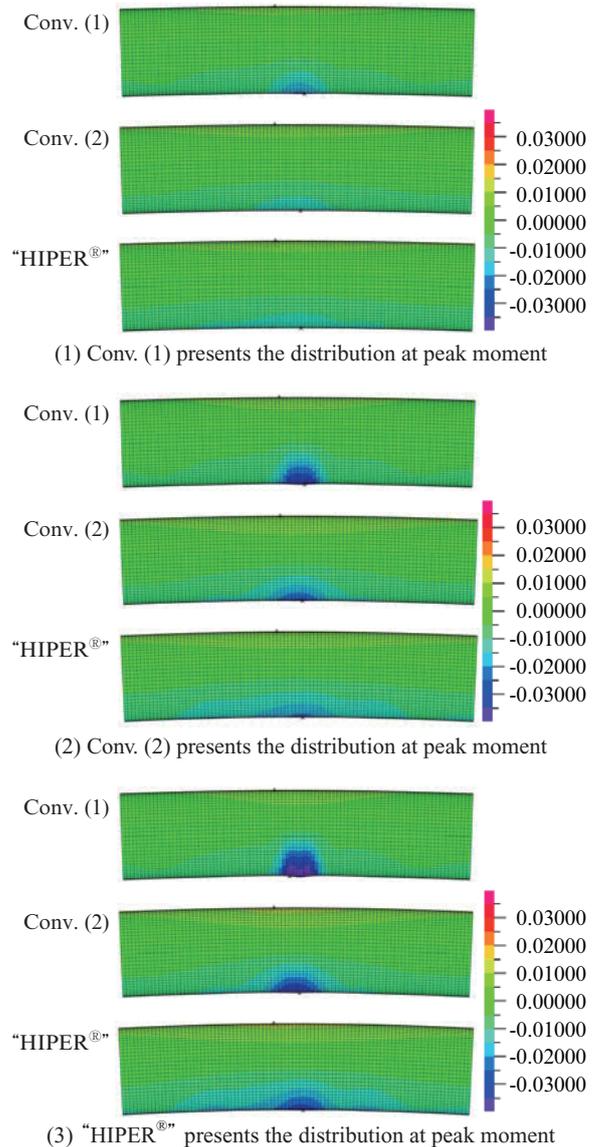


図2 パイプの変形状況

Fig. 2 Longitudinal strain distributions

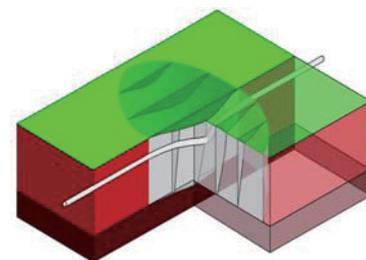


図3 側方流動解析モデル

Fig. 3 Analytical model of a pipeline across a lateral spreading zone

示す。本解析に用いた側方流動の解析条件では、管厚をConv. (1)より1.44倍厚くしたスペックであるConv. (2)に関しても、Conv. (1)と同様、40 m, 60 mで ϵ_{cr} を超えており、適用できるのは、Conv. (1)と管厚が同じ「HIPER[®]」のみとなることが分かる。

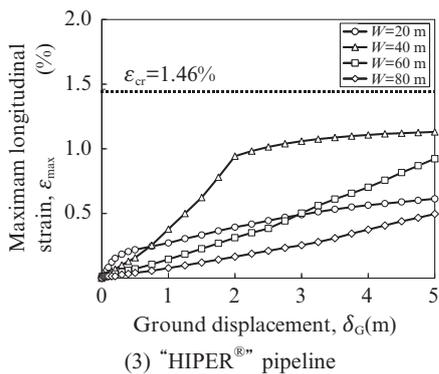
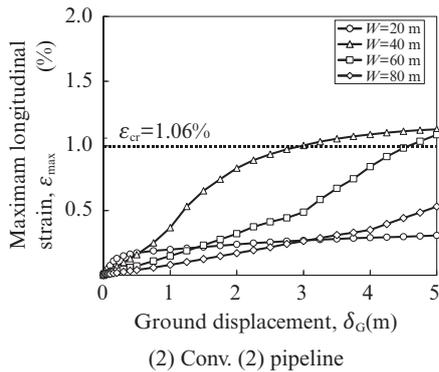
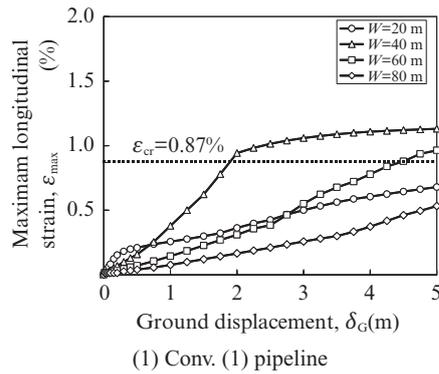


図4 側方流動解析結果

Fig. 4 Maximum longitudinal compressive strain

3.3 断層変位に対する解析例

本節では、本論で示した3種類のパイプの液状化による断層変位に対する耐震特性を検証する。

断層変位に対しては、図6に示す横ずれ断層に対する3種類のパイプの変形解析を行なった。3.2節と同様、パイプはビーム要素、地盤はバネ要素としたが、バネ特性は、高圧ガス導管耐震設計指針に規定されている特性を採用した。

解析結果を図7に示す。

パイプが許容値に達する断層変位が、Conv. (1)は1.75 m, Conv. (2)が2.62 m, 「HIPER[®]」が4.60 mという結果になった。これらの結果より、適用する場所の断層変位が4 m以下であれば、「HIPER[®]」適用、断層変位が3 m以下であれば、「HIPER[®]」とConv. (2)が適用できることが分かる。

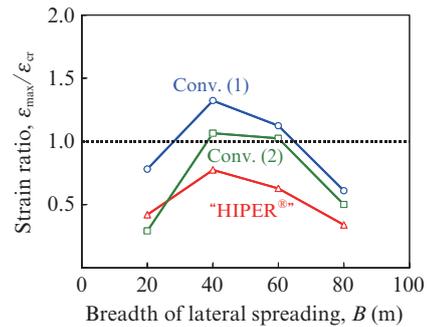


図5 側方流動解析結果 (まとめ)

Fig. 5 Comparison of pipeline integrity in the lateral spreading zone

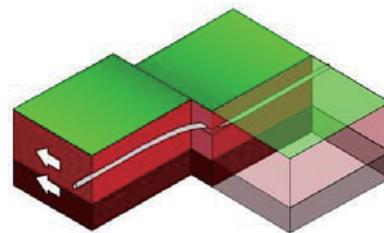


図6 断層変位解析モデル

Fig. 6 Analytical model of a pipeline crossing a fault line

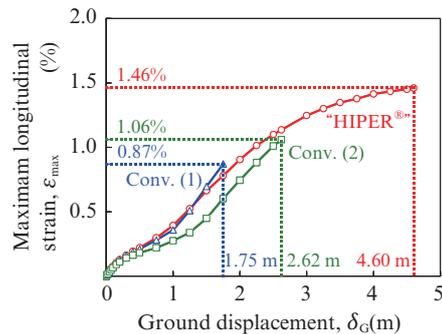


図7 断層変位解析結果

Fig. 7 Maximum longitudinal compressive strain of the three pipelines

このように、材料規格が同一であれば、「HIPER[®]」を適用することによって、管厚を増加させることなく、耐震性能を向上させることができることが分かる。

4. おわりに

今後、さらなるパイプラインの耐震性・安全性を考慮するためには、塑性設計の重要度が増していくと考えられる。本論では、塑性設計においては、今までのように、降伏点の値による許容値の設定だけではなく、材料の特性などを考慮した設計をすることで、より耐震性能を向上させることが可能であることを示した。

本論では、変形に適した許容値の提案と、それに伴う簡

易な解析設計手法を、同規格の3種類のパイプについて解析例とともに示した。

今後、各事業者で個別に性能設計を実施し、耐震性能を向上させる必要があるなか、「HIPER®」のように、管厚を増さずに、材料特性を考慮することによって、耐震化が図れることを解析例とともに示した。

参考文献

- 1) 日本ガス協会. 高圧ガス導管耐震設計指針. JGA指-206-03. 2004.
- 2) 日本ガス協会. 高圧ガス導管液状化耐震設計指針. JGA指-207-01. 2001.
- 3) 日本道路協会. 石油パイプライン技術基準(案). 1974.
- 4) 日本ガス協会. ガス工作物技術基準解釈例の解説4次改訂版.
- 5) 鈴木信久. パイプライン「技術トピック編」パイプライン工学講座. 高強度大口径パイプラインの性能設計と安全性. 溶接学会誌. 2001,

vol. 80, no. 3.

- 6) 鈴木信久, 伊木聡, 正村克身. 高強度パイプラインの安全性. JFE技報. 2007-08, no. 17, p. 14-19.
- 7) 鈴木信久, 近藤丈, 嶋村純二. 高強度ラインパイプの変形性能. JFE技報. 2007-08, no. 17, p. 31-36.



矢野 達夫



浅野 嘉章



鈴木 信久