

I-A276 凍土環境下におけるパイプラインの設計条件に関する検討

京都大学大学院 学生員 福島 宏明 京都大学工学研究科 正会員 小野 紘一
 京都大学工学研究科 正会員 杉浦 邦征 京都大学大学院 学生員 大島 義信

はじめに

北極圏などの地域に存在する不連続な永久凍土地帯内にパイプラインを埋設する際、大きな問題となるのは凍土の不連続な沈下、上昇である。地盤の凍結による隆起(凍上)、融解による沈下を繰り返す不安定な領域を横断するパイプラインには、安定して凍結している部分を支点とした変形モードが生じる。このように繰り返し曲げ変形を受けるパイプには局部座屈が生じる可能性がある。

そこで本研究では、内圧と曲げを受ける薄肉円筒管のFEM解析によって座屈性状を把握し、不連続な永久凍土に埋設されたパイプラインを簡単な線状構造物としてモデル化し、安全なパイプライン建設のためのその構造諸元について検討した。

FEM解析による円筒の座屈性状の検討

一般に薄肉直管の崩壊は、軸圧縮を受ける円筒同様、通常小さなダイヤモンドパターンが生じる円筒の座屈によって起る。一方、管壁が厚い場合、断面が楕円化するとともに降伏が生じ、円筒にはリング状の座屈が発生する。ここでは、汎用有限要素解析コードABAQUSを用いた弾塑性有限変位解析によりガス送圧による内圧と周辺地盤からうける曲げの相互作用を考慮した座屈性状を明らかにする。

解析モデルとしては、パイプに一樣な曲げと内圧のみが作用すると考え、直径の2倍の長さの薄肉円筒管を対象とした。この解析モデルの形状を図1(a)に示す。この直管に対して図1(b)のように管の対称性から円周方向の半分に対して、4節点シェル要素を用いて離散化した。また、鋼材の応力-ひずみ関係はバイリニアであると仮定した。解析に用いた鋼管の諸元を表1にまとめて示す。最初の载荷ステップで一樣な内圧(7.35N/mm²)を与え、つづいて部材端間の相対回転角を制御して曲げモーメントを加えた。ここでは、曲げ変形として、前述の部材端の相対回転角を部材長さで除した平均曲率を用いた。また比較検討のため内圧を加えないケースも対象とした。

解析結果を図2に示す。これは平均曲率-曲げモーメントの関係を示したもので、それぞれ内圧を考慮しない場合の降伏値で除して無次元化している。この図から内圧が作用する場合、曲げのみを受けるパイプが降伏する6割程度の曲げモーメントによってパイプが降伏していることがわかる。一方、最大耐力点以降も比較的耐力の低下は穏やかである。これに反して、内圧が作用しない場合は、鋼材の降伏後に最大耐力点に達し、局部座屈が顕著化するにもなって耐力が急激に低下しているのがわかる。以上より、内圧の作用により座屈にともなう耐力低下は、低減される。しかし、曲げ耐力の低下が著しいことに注意すべきである。

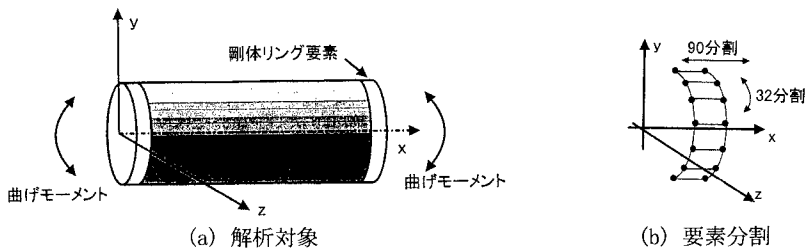


図1 円筒シェルの解析モデル

キーワード パイプライン、座屈、凍土

連絡先(〒606-8501 京都市左京区吉田本町 TEL:075-753-4790 FAX:075-753-4791)

結果的に、内圧の作用を考慮せず算出したパイプ構造の降伏条件は、大きく危険側であり、不連続凍土に埋設されたパイプラインの安全性を考える時には、内圧のレベルに十分な配慮をする必要があると言える。

簡易モデルによる凍土中のパイプラインの安全性評価

前述の円筒の座屈解析により得られた曲げ耐力から、凍土埋設中のパイプラインの凍上、融解沈下による破壊限界長について検討する。不安定領域を横断するパイプラインは安定して凍結している地盤を支点とした変形モードを有するので、図 3 に示すような単純なモデルを設定した。このモデルにおいて、凍上では凍上力が上向きの等分布荷重として、融解沈下の場合は自重と土被り上載圧が下向きの等分布荷重として加わると理想化した。ともに両端において最大の曲げが生じ、曲げ耐力に達すると、両端は塑性ヒンジ化し次に中央点において最大の曲げを生じ、曲げ耐力に達すると、変形に対する抵抗はなくなり塑性破壊を起こすと仮定した。ただし、両端を支えている凍結土壌がせん断力に耐えられずせん断破壊を起こすと、両固定端は凍土側にずれ込み、その間は凍土のせん断耐力によって支えられるものとした。凍上時の塑性破壊に必要な凍上力と不安定領域を横断するパイプラインの長さの関係と、パイプラインが地表面から 3 m の深さで埋設されている場合の融解沈下により破壊が起きる時の不安定領域を横断するパイプの長さを計算した結果を、図 4、表 2 に示す。この計算結果から不連続凍土中に埋設されたパイプラインは十分に降伏する可能性があることがわかる。また、その破壊の危険性は不安定領域を横断するパイプラインの長さが大きくなるとその危険性が急激に増大している。

結論

弾塑性有限変位解析によるパイプの座屈性状の検討から、内圧を考慮した場合、鋼材が早く降伏することにより、局部座屈による耐力低下は著しくない。内圧が局部座屈の顕著化を食い止めることに少なからぬ貢献をしていると考えられる。その一方で、曲げ耐力の低下が著しい。したがって、不連続凍土中に埋設するパイプラインの設計には、内圧レベルと降伏曲げ耐力の関係を十分考慮する必要がある、その危険性は不安定領域を横断するパイプラインが長くなると急激に増大する。

表 1 パイプラインの諸元

ヤング率 $\times 10^5$ (N/mm ²)	2.06
鋼管の密度 $\times 10^{-6}$ (N/mm ³)	7.7
降伏値 $\times 10^2$ (N/mm ²)	2.35
口径 (mm)	1400
肉厚 (mm)	16
断面2次モーメント $\times 10^{10}$ (mm ⁴)	1.67
断面積 $\times 10^4$ (mm ²)	6.95

表 2 計算結果（融解沈下問題）

不安定領域を横断するパイプラインの長さ (m)	端点におけるせん断力 $\times 10^4$ (N)
10	24.66
20	49.31
40	98.63
100	246.57

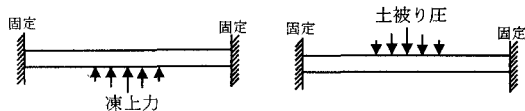


図 3 簡易モデル

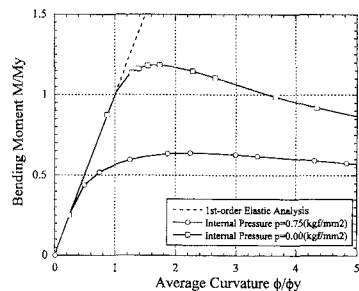


図 2 解析結果

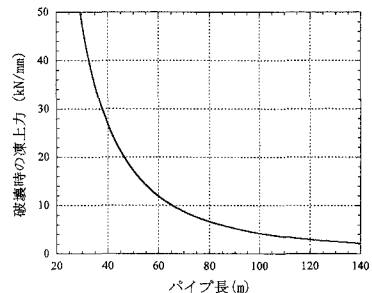


図 4 計算結果（凍上問題）