

断層による強制変位を受ける 埋設パイプラインの解析

清宮理¹・菊池俊則²

¹早稲田大学理工学部社会環境工学科教授（〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1）

E-mail:k9036@waseda.jp

²早稲田大学大学院理工学研究科建設工学専攻（〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1）

E-mail:toshi-k@suou.waseda.jp

活断層が多数存在する日本では、埋設パイプラインが断層を横切る可能性が極めて高い。断層を横切る埋設パイプラインを考えた場合、断層の強制変位量による埋設パイプラインの安全性が危惧される。本研究では、断層による変形を受ける埋設パイプラインの耐震性能を整理し、埋設パイプラインを一次元梁要素とした簡易的な有限要素法解析により、断層による強制変位を受ける埋設パイプラインの安全性評価を検討した。断層面の角度、断層面の表層地盤での存在の有無などを要因に検討を行った。

Key Words : active fault, buried pipeline, forced displacement, finite element method, fault plane

1. はじめに

長大な埋設パイプラインは土を介して地震の影響を直接受けることになる。地震動に対するパイプラインの耐震性については従来から多数の研究がなされている。地震動以外にも兵庫県南部地震における野島断層のように、断層のずれによるパイプラインの被害も起きている。活断層が多数存在する日本では、埋設パイプラインが図-1のように断層を横切る可能性は極めて高い。この断層の動きに対して埋設パイプラインの安全性が求められている。本研究では、直線状に埋設されたパイプラインの耐震性能を表示して、有限要素法により表層地盤を平面ひずみ要素で、パイプラインを梁と簡易なモデル化を行った。縦ずれ断層の断層変位を強制変位として計算モデルの下面に鉛直方向に与え、パイプの断面力とひずみ量について評価したので、この結果について報告する。

2. 断層変位

鉛直方向の最大変位量は（明治）三陸地震（1896/6/15）で Kantamori の想定したモデルにおける 626.40 cm で、最大値と最小値の求められる点の距離は 22km である。また、一例として新潟地震（1964/6/16）で安芸の想定したモデルにおける鉛直方向変位図を図-2 に示す。この断層での各パラメ

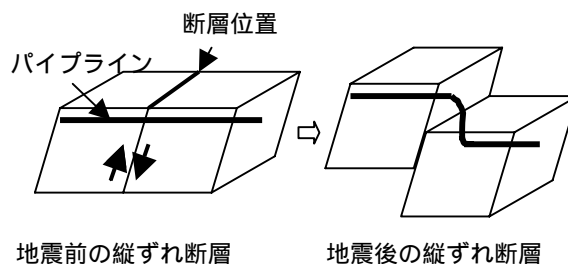


図-1 地震前後の縦ずれ断層とパイプラインの関係

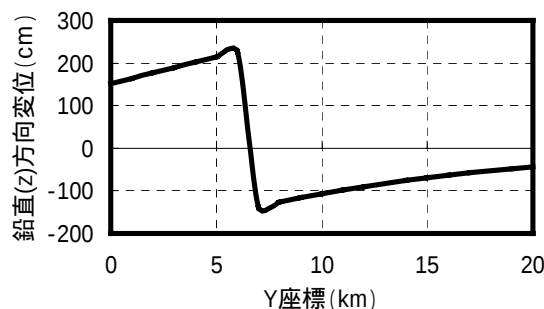


図-2 新潟地震で安芸の想定したモデルにおける鉛直方向変位図

ータを基に計算された海底地盤の最大変位差は鉛直方向に364cmで、最大値と最小値の求められる点の距離は1kmである。およそ3-4mの断層による鉛直変位を今回想定した。

表-1 各地震の影響に対する耐震性能要求

地震の影響	耐震性能要求
レベル 1 地震動および レベル 1 地震動に起因 する液状化、側方流動	通常操作が可能なこと
レベル 2 地震動および レベル 2 地震動に起因 する液状化、側方流動	漏洩しないこと
地表地震断層	漏洩しないこと

表-2 耐震性能要求の定義

耐震性能要求	定義
通常操作が可能なこと	パイプラインの変形が起ころも、修理なしに通常操作が継続可能なこと。
漏洩がないこと	パイプラインに変形が起ころも、パイプラインからのガス漏洩を起こさないこと。

3. 耐震性能

(1) 耐震設計の基本的な考え方

埋設パイプラインにおいては設計対象サイトにおいて地震危険度解析ならびに地質・地盤調査を行い、そのサイトにおいて想定される地震の影響に対して定められた耐震性能を満足させることを基本とし地震動の振動の影響、周辺地盤の液状化などによる大変形、断層変位を検討対象とする。耐震設計における地震の影響として地震動による影響（振幅、見かけの波長など）、地震動によって誘起される液状化、液状化に伴う側方流動ならびに地表地震断層のような地盤変状を考慮する。各地震の影響に対する耐震性能要求の適用を表-1に示す。耐震性能要求の定義を表-2に示す。

(2) 地震動の影響

設計対象サイトにおいて設定された基盤の地震動（レベル1、レベル2）から地盤状況を考慮して、適切な方法によりパイプライン設置面における地震動強さを推定する。

パイプラインの敷設予定ルートに沿った断層の確認は地表面の断層調査や音波探査などで実施しパイプラインの敷設ルートと地震地表断層が交差する場合には、断層の影響を設計に考慮する。断層面が地表に現れている場合はこの断層が活断層かどうか確認し、正断層、逆断層などを区別し過去の履歴などから断層の鉛直及び水平変位量を地震規模や断層面の大きさなどから推定する。断層面が地表に出ている時はその位置の特定、規模など推定し易いが断層の存在する地盤上に表層地盤が存在する時は断層の評価が大変難しい。下方の洪積地盤などに断層が存在していても調査が困難な上に、断層が生じた時表層地盤がどのような挙動を示すか現在知見が少ない。

表-3 照査基準の考え方

照査基準	使用限界照査 (通常操作が可能なこと)	終局限界照査 (漏洩しないこと)
圧縮変形	$\varepsilon_{ca}=0.8 \varepsilon_{bc}$	$\varepsilon_{ca}=\varepsilon_{bc}$
曲げ変形	$\varepsilon_{ba}=0.8 \varepsilon_{bb}$	$\varepsilon_{ba}=\varepsilon_{bb}$
引張変形	$\varepsilon_{ta}=1 \sim 2\%$	$\varepsilon_{ta}=3 \sim 4\%$

表-4 照査基準

照査基準	使用限界照査 (通常操作が可能なこと)	終局限界照査 (漏洩しないこと)
圧縮変形	局部座屈なし	局部座屈の発生限界
曲げ変形	局部座屈なし	局部座屈の発生限界
引張変形	現地溶接継手に過大な変形が発生しないこと	現地溶接継手が破断しないこと

今回の検討ではこの下方での断層が表層地盤内にも伝播すると仮定すなわち断層面が表層地盤内にも生成される場合とはっきりと断層面が生成されない場合の2種類の状況を想定した。このような状況でパイプラインの耐震性能照査で、「使用限界照査（通常操作が可能なこと）」、「終局限界照査（漏洩しないこと）」の二段階の照査を行う。埋設パイプラインの照査基準を表-3、表-4に示す。照査基準では使用限界と終局限界を設定する。使用限界では地震発生後に被害調査点検を行い、操業がわずかな修理後で再開されることが出来る断層変位を想定する。終局限界では地震後にパイプが座屈を生じて破損したり溶接部が破断しないことを照査する。たとえパイプラインが大変形を起こして使用に耐えなくなったとしても石油類、ガスなどが大量に漏洩しないことを照査する。パイプが破断するかはパイプに生じるひずみ量で判定する。このひずみ量の設定は材質に依存するが使用限界照査で1—2%程度を終局限界照査で3 - 4%程度を設定する。変形したパイプラインの修理は地震後行うものとする。

4. 解析モデル

解析モデルを図-3に示す。表層地盤の厚さが20mで水平な成層とする。幅は101mに設定する。表層地盤の深さ2mのところに長さ101mのパイプラインが埋設されていると想定する。表層地盤の断層の状況については不明な点が多いが、今回、直線的な断層面が表層地盤に生じると仮定し、かつその方向を変化させた。また、すべり面の性状についても不明な点が多いが、今回ある一定幅のすべり層を設けた。すべり層は計算モデルの中央に設定する。表層地盤内での断層の幅を1mとし、水平

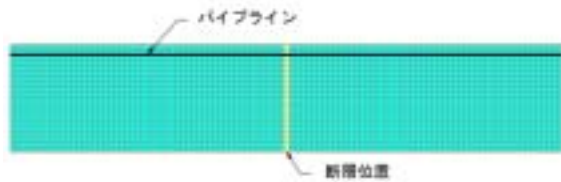


図-3 解析モデル

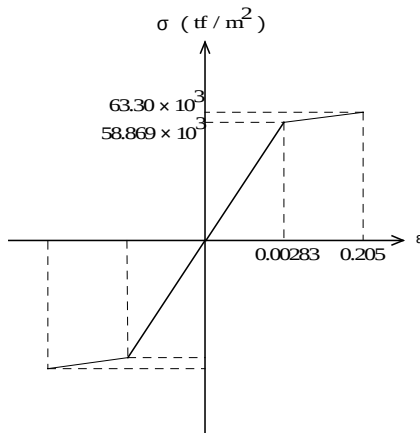


図-4 埋設パイプラインの非線形性

面に対する断層の角度を 45° 、 63.3° 、 90° の3種類のモデルを作成した。さらに、断層面の無いモデルを作成した。パイプラインは節点数102、要素数101の2次元梁要素で置換した。パイプラインは口径101.6 cm、肉厚1.91 cmである。材質は、API 5L X80で、ヤング率 2.1×10^8 kN/m²、ポアソン比0.3、降伏応力 58.9×10^4 kN/m²とし、材料非線形性を考慮した。したがってパイプの降伏曲げモーメントは8614 kN・mで、塑性曲げモーメントは11179 kN・mとなる。また、ひずみが3%のときの応力は 59.5×10^4 kN/m²で、曲げモーメントは8699 kN・mと設定した。

表層地盤は比較的軟弱な砂質土で構成されており、土質定数としてヤング率 1.0×10^4 kN/m²、ポアソン比0.3、密度 2.0×10 kN/m³とし、弾性体として扱った。断層位置に比較的軟弱な層をいれ、その層のヤング率を 1.0×10^3 kN/m³にした。今回パイプラインと地盤は共通節点としすべりの影響は考慮しなかった。当然考慮すべきであるが、ばね要素の取り付け方、定数値の設定など十分モデルができなかったので安全側の設定として今回の計算モデルを作成した。以上のような条件で、断層をはさんで基礎面の一方を固定、もう一方を鉛直方向上方に強制変位を一樣に与えた。逆断層を想定した入力方法でパイプには圧縮力が卓越する事から座屈の検討が出来る。正断層ではパイプに引張力が卓越する。

5. 解析結果と考察

(1) 断層面の傾きによる影響

曲げモーメントの分布を図-5に示す。断層面の傾き $\delta = 90^\circ$ の時、最大曲げモーメントが上盤側2 mの位置に計算され、断層から上盤・下盤両方

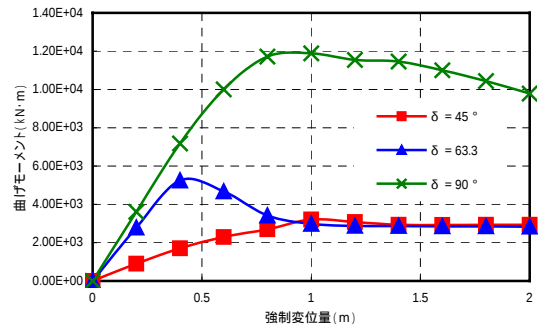


図-5 縦ずれ断層の曲げモーメント分布図

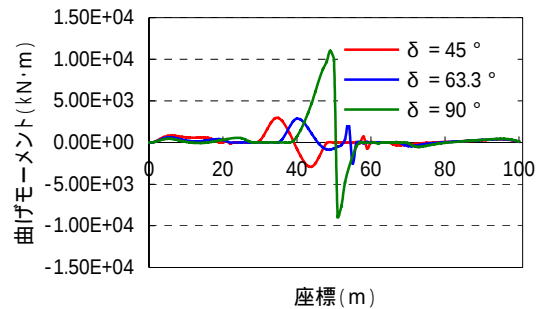


図-6 最大曲げモーメントと強制変位量の関係
断層面の傾きによる影響

(断層面幅1 m)

向共に10m離れると曲げモーメントはほとんど計算されなかった。断層面の傾き $\delta = 63.3^\circ$ と断層面の傾き $\delta = 45^\circ$ 断層面付近で比較的規則的な曲げモーメント分布が計算され、断層から上盤・下盤両方向共に20m離れると曲げモーメントはほとんど計算されなかった。断層面の傾きを大きくすると、最大曲げモーメントの計算される場所が断層位置に近づいた。

断層面幅1 mで鉛直方向に強制変位を与えた時のパイプラインの最大曲げモーメントと強制変位量の関係を図-6に示す。断層面の傾き $\delta = 90^\circ$ の方が断層面の傾き $\delta = 63.3^\circ$ 、及び断層面の傾き $\delta = 45^\circ$ のときは曲げモーメントが約3000 kN・m付近で横ばいになった。パイプ周囲の断層面の要素がかなりつぶれたように変形しており計算誤差が大きかつ不安定な状況にあるといえる。断層面の傾き $\delta = 90^\circ$ の時、強制変位量が0.5 mで許容ひずみの基準値を超えた。断層の傾き $\delta = 45^\circ$ 、 63.3° の時は許容ひずみの範囲内であった。

表層地盤の変位図を断層面の傾き $\delta = 45^\circ$ の時図-7に、断層面の傾き $\delta = 63.3^\circ$ の時図-8に、断層面の傾き $\delta = 90^\circ$ の時図-9にそれぞれ示す。傾きがゆるくなるにつれて、表層地盤への影響範囲が広がりパイプライン周辺の地盤の変形勾配が小さくなる傾向があった。

(2) 断層面の有無による影響

断層面の傾き $\delta = 90^\circ$ と断層面の無い場合の鉛

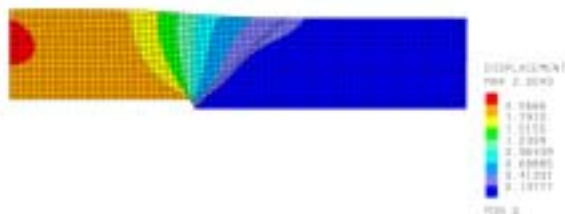


図-7 断層面の傾き $\delta = 45^\circ$ の表層地盤変位図

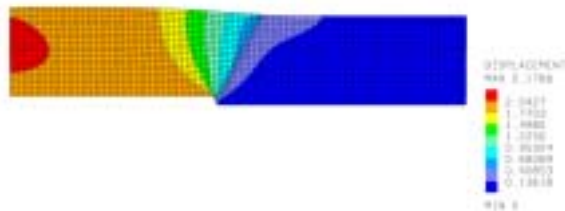


図-8 断層面の傾き $\delta = 63.3^\circ$ の表層地盤変位図

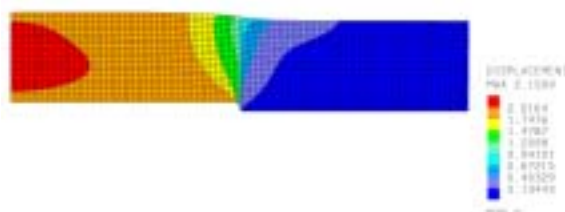


図-9 断層面の傾き $\delta = 90^\circ$ の表層地盤変位図

直方向に強制変位を与えた時のパイプラインの最大曲げモーメントと強制変位量の関係を図-10 に示す。断層面ありの方が、断層面なしの時よりも同じ強制変位量で大きな曲げモーメントが計算された。その差は大きかった。断層面がない時、2 mの強制変位を与えても許容ひずみに達することはなかった。断層面なしの時の表層地盤の変位図を図-11 に示す。断層面がない時は断層面があるときに比べて、地盤に対する影響範囲が広がることがわかった。軟弱な表層地盤でははっきりした断層面が生成されない事も想定されこの時には埋設パイプラインに与える影響は小さい事が推定される。

6. 結論

今回想定したパイプラインは、断層面があり、かつその傾きが $\delta = 90^\circ$ の時、0.5 mの強制変位量により終局限界状態の許容ひずみ基準に達した。断層の角度が緩やかな時と明白な断層面を持たないときは2 mの強制変位を与えても許容ひずみに達することはなかった。また、断面力は上盤側の断層近くで最大となった。その際、パイプラインの曲げモーメントの大きさは断層面の傾きによる影響が大きかった。今回簡単な数値計算から得られた結果を元に行っているが、表層地盤内断層の状況が埋設パイプラインの断面力やひずみ量に

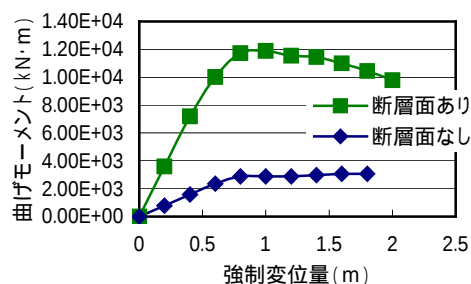


図-10 最大曲げモーメントと強制変位量の関係・断層面の有無による影響

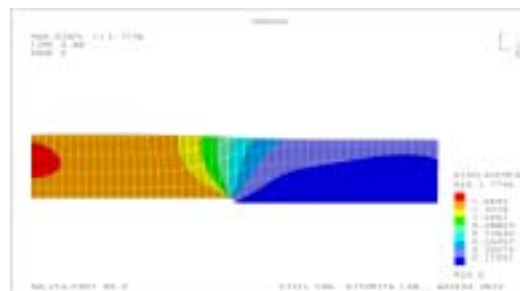


図-11 断層面なし・表層地盤の変位図
断層面の有無の影響

大きく影響すると考えられるので今後更なる検討が必要である。

あとがき

今回埋設パイプラインの断層移動に対する設計に必要な基本的な断面力の簡易計算を有限要素法に行った。断層のモデル化、周囲地盤の非線形性挙動、パイプと周辺地盤との摩擦の影響、パイプの局部座屈などの非線形的挙動など今回十分にモデル化できていない。これらの項目を今後さらに検討していく必要がある。

参考文献

- 1) 東 宏城, 清宮 理: 断層を横切る海底パイプラインの耐震性の検討, 第二回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム, 2001, 3, pp.147-152
- 2) 佐藤 良輔: 日本の地震断層パラメーター・ハンドブック, 鹿島出版会, 1989
- 3) Yoshimitu Okada: Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space, Bulletin of the seismological society of America, Vol.75, No4, pp.1135-1154, Aug. 1985
- 4) ガス工作物等技術基準調査委員会: 高圧ガス導管耐震設計指針, 社団法人 日本ガス協会, pp.49, 2000
- 5) 市橋正行, 菊池俊則, 清宮理: 断層変位が海底パイプラインに及ぼす影響, 第3回DIANA国際会議論文集, 2002.10, pp.11-22

(2003.9.13受付)