

断層による強制変位を受ける 海底パイプラインの安全性評価

東 宏城¹, 清宮 理²

¹学生会員 工修 早稲田大学大学院理工学研究科建設工学専攻 (〒169-8555 新宿区大久保3-4-1)

²フェロー 工博 早稲田大学教授 理工学部土木工学科 (〒169-8555 新宿区大久保3-4-1)

Now, there is a plan to make a submarine pipeline for the transportation of natural gas to Japan.

Some active faults exist in continental around Japanese islands, so it is possible that submarine pipelines cross these faults. It is necessary for submarine pipeline to be safe to fault movement during earthquakes. Therefore sectional force due to loads displacement is investigated on the assumption that submarine pipelines were a beam on the sea bed. At the result, pipeline across reverse fault reaches to rupture, but pipeline across strike fault doesn't reach to rupture, and sectional force of submarine pipeline depends on strength of the ambient soil condition and internal gas pressure.

Key Words : submarine pipeline, fault, material nonlinear, forced displacement, finite element method

1. はじめに

現在、東日本周辺で天然ガス輸送用の海底パイプラインが計画されている。これら日本近海の大陸棚にはいくつかの活断層が存在し、海底パイプラインが、これら断層を横切り敷設される可能性が高い。近年トルコ・台湾等の地震では、断層を横切る構造物の安全性が指摘されている。そこで、海底パイプラインにおいても、逆断層や横ずれ断層で地震時に生ずる地盤の段差に対する安全性評価の必要性¹⁾を考える。本研究では、海底地盤上に静置された断層を横切る海底パイプラインを想定し、海底パイプラインの耐震性を材料非線型性を考慮した有限要素法により検討した。海底パイプラインを弾性支床上の梁と仮定し、逆断層と横ずれ断層の断層変位を強制変位として海底パイプラインの断面力を評価したのでこの結果について報告する。

2. 断層

(1) 断層分布

図-1に今回計算の対象とする海底パイプラインの計画地域における活断層の分布図の概略を示す。日本周囲に海底パイプラインを敷設しようとする活断層が多く

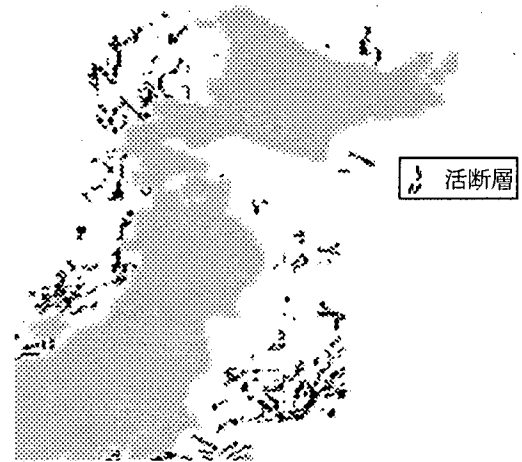
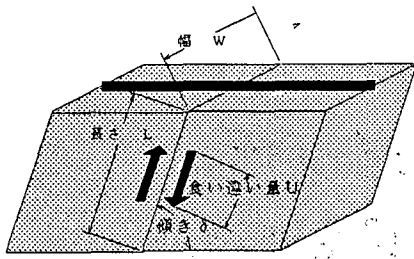


図-1 東日本周辺の活断層の状況

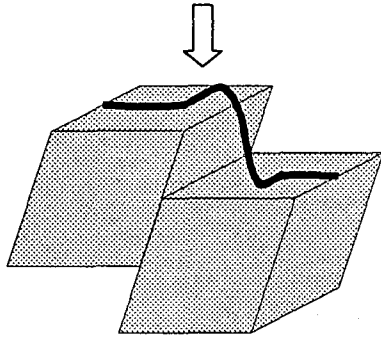
存在し、海底パイプラインが活断層を横切り敷設される可能性が高い。また、日本周囲に存在する活断層の多くは、低角逆断層である。

(2) 断層変位の計算

図-2に想定される海底パイプラインと断層の状況を示す。海底パイプラインは海底地盤上に静置される。今回検討の対象とした逆断層の地震は、1964年新潟地震で安芸²⁾の想定した長さ $L=100\text{km}$ 、幅 $B=20\text{km}$ 、食い違



逆断層と断層パラメータ



地震後の逆断層と海底パイプライン

図-2 海底パイプラインと断層の状況

い量 $U=400\text{cm}$, 傾き $\delta=70^\circ$ の断層面を想定した。この断層での各パラメ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 380cm であった。この値は、現在確認されている東日本での最大値を設定した。なお、 Σ 面を横切る段差 $U_i(\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3)$ による地盤内の変位 $\Delta U_i(X_1, X_2, X_3)$ は、次式で計算できる。³⁾

$$U_i = \frac{1}{F} \iint_{\Sigma} \Delta u_j \left[\lambda \delta_{jk} \frac{\partial u_i^n}{\partial \xi_k} + \mu \left(\frac{\partial u_i^j}{\partial \xi_k} + \frac{\partial u_i^k}{\partial \xi_j} \right) \right] \nu_k d\Sigma \quad (1)$$

ここに、 δ_{jk} : クロネッカーデルタ
 λ, μ : ラーメの定数
 ν_k : $d\Sigma$ 面法線の cosine 方向

3. 解析モデル

今回使用する海底パイプラインの解析モデルを図-3に示す。計算モデルでの海底パイプラインの長さは 500m とし、中央部分に断層が存在する。海底パイプラインは節点数 501 , 要素数 500 の1次元梁要素で置換し、各節点には地盤バネを鉛直方向、水平方向、軸方向に取付けた。今回解析した際の解析パラメータを表-1に示す。海底パイプライン(鋼材の外径), 内部圧力, 地盤硬さ(標準貫入試験での N 値), 強制変位方向(断層の種類)を解析パラメータとした。

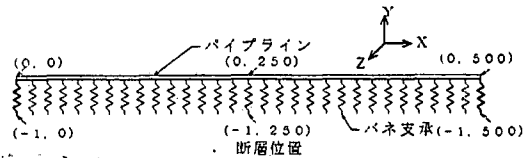


図-3 解析モデル図

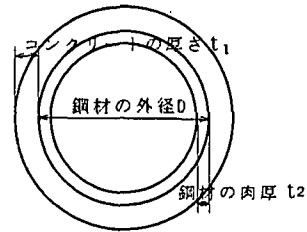


図-4 海底パイプライン断面の形状

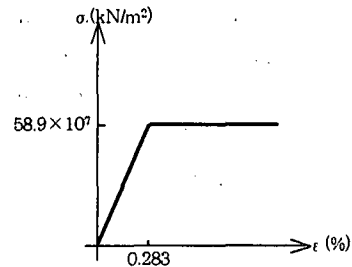


図-5 海底パイプラインの非線形性

表-1 解析パラメータ

鋼材の外径D (肉厚t ₂)	内圧	N値	断層
101.6cm (1.91cm)	無視	1	逆断層
		10	
76.2cm (1.91cm)	考慮	40	横ずれ断層

表-2 鋼材の破壊基準

鋼材の外径D	降伏モーメント	塑性モーメント	許容ひずみ
101.6cm	$8.6 \times 10^3 \text{kN}\cdot\text{m}$	$1.2 \times 10^4 \text{kN}\cdot\text{m}$	レベル1: 1%
76.2cm	$4.6 \times 10^3 \text{kN}\cdot\text{m}$	$6.2 \times 10^3 \text{kN}\cdot\text{m}$	レベル2: 3%

(1) 海底パイプライン

図-4に海底パイプライン断面の形状を示す。鋼材の周りのコンクリート部分の厚さ t_1 は 15cm とし、このコンクリートはひび割れが既に入っているものとして強度は考慮せず重量のみを考慮した。コンクリートの水中単位体積重量は 12.8kN/m^3 とした。図-5に海底パイプラインの材料の非線形性を示す。海底パイプラインの鋼材の材質は、API5LX80で、ヤング率 $2.1 \times 10^8 \text{kN/m}^2$, 降伏応力 $58.9 \times 10^7 \text{kN/m}^2$ とした。鋼材の外径 D は 101.6cm と 76.2cm で肉厚は各々 1.91cm とした。表-2に海底パイプラインの破壊基準値を示す。鋼材の外径 $D=101.6\text{cm}$ の降伏モーメントは $8.6 \times 10^3 \text{kN}\cdot\text{m}$, 塑性モーメントは

1.2×10⁴ kN・mである。また、レベル1地震動に対する許容ひずみは1%、レベル2地震動に対する許容ひずみは暫定的に3%とした。⁴⁾

(2) 内部圧力

海底パイプラインの鋼材の内部には天然ガスが流れ、鋼材に内部圧力が加わる。内圧に対する許容応力度の規格下限降伏応力に対する比率(設計係数)を0.4として、内部圧力を考慮したモデルと考慮しないモデルを考えた。

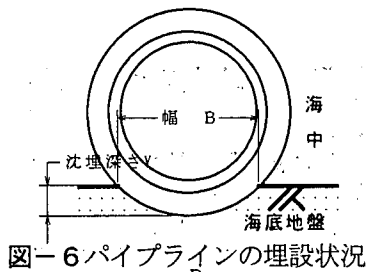
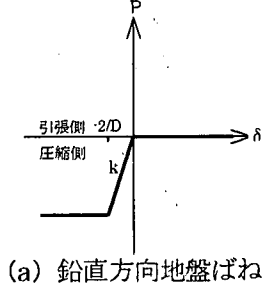
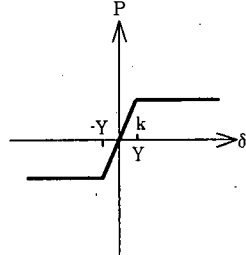


図-6 パイプラインの埋設状況



(a) 鉛直方向地盤ばね



(b) 水平方向地盤ばね・軸方向地盤ばね

図-7 地盤の非線形性

(3) 地盤

地盤のヤング率は、標準貫入試験のN値より $E=2.8N$ N/mm²(道示の式)より求めた。次に、図-6に示すように海底パイプラインの地盤への喰い込み量(地盤との接触幅)を考慮して、鉛直方向地盤ばねを求めた。鉛直方向地盤ばねの地盤の非線形性を図-7(a)に示す。海底パイプラインと地盤が圧縮状態のときの降伏力は、海底パイプラインが海底パイプラインの半径だけ地盤に沈み込んだときの値を用い、また、引張状態ではばねが存在しないものとした。同様に、水平方向地盤ばねと軸方向地盤ばねの地盤の非線形性を図-7(b)に示す。水平方向地盤ばねは、鉛直方向地盤ばねの1/3の大きさとし、降伏力は海底パイプラインの地盤への埋設深さ時の値を用いた。以上の条件で、海底地盤のN値を1から40までの範囲で考えた。

(4) 強制変位

強制変位量を地盤ばね端部に与えた。縦ずれ断層は鉛直方向の強制変位量を4mまで、横ずれ断層は水平方向の強制変位量を8mまで段階的に与えた。

4. 解析結果と考察

(1) 逆断層の解析結果

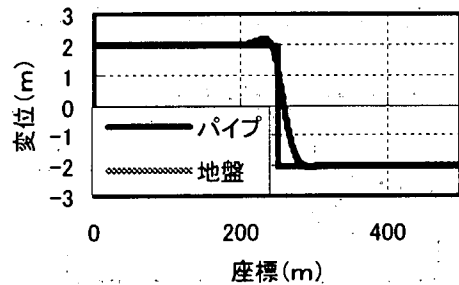


図-8 逆断層の変位分布図

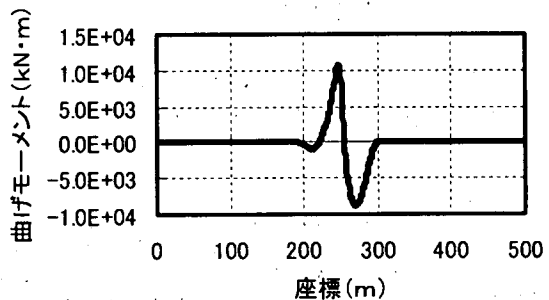
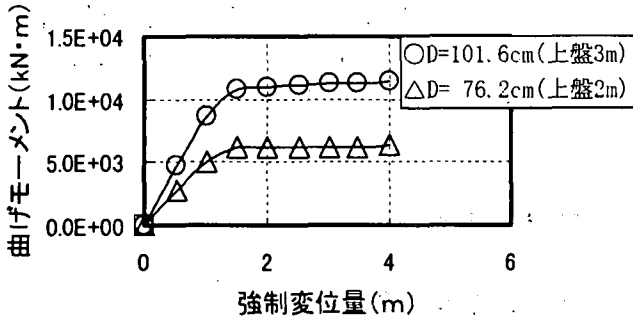


図-9 逆断層の曲げモーメント分布図

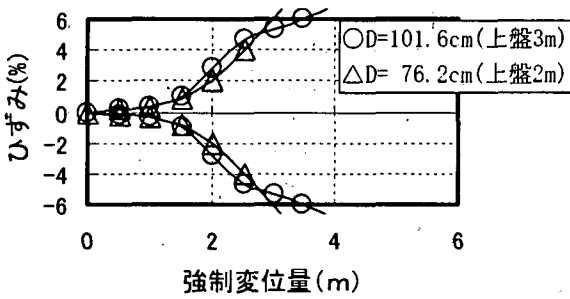
図-8に鋼材の外径 $D=101.6$ cm、内圧を無視し、 N 値=1で鉛直方向に強制変位を4m与えたときのパイプラインの鉛直方向の変位図を示す。パイプラインは断層位置より上盤側に30m位の範囲で海底地盤から離れて水中に浮いた状態となった。逆に下盤側では海底地盤中に喰い込む状態になった。このとき、パイプラインに計算された曲げモーメントの分布を図-9に示す。最大曲げモーメントが断層から上盤側4mの位置に計算され、断層から上盤・下盤両方向共に50mも離れると曲げモーメントはほとんど計算されなかった。

a) 鋼材外径の影響

内圧を無視し、 N 値=10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との関係を図-10(a)に、最大軸ひずみと強制変位量との関係を図-10(b)に示す。鋼材外径を小さくすると、最大曲げモーメントと最大軸ひずみの計算される場所が海底面での断層位置に近づいた。この時、鋼材外径 $D=101.6$ cmの方が、鋼材外径 $D=76.2$ cm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。しかし、軸ひ

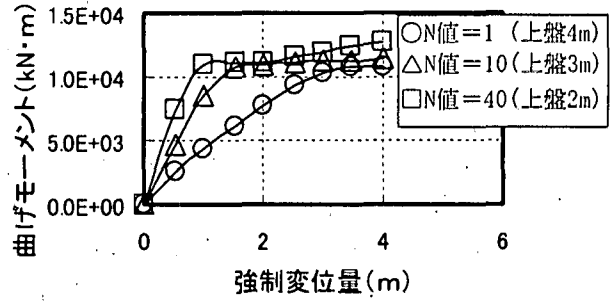


(a)最大曲げモーメントと強制変位量の関係

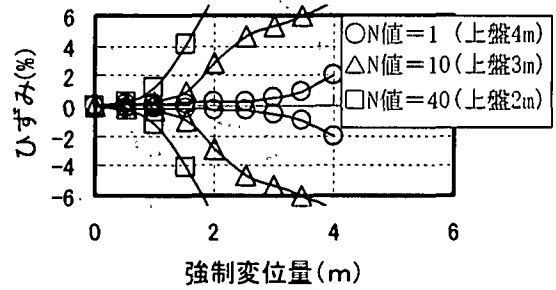


(b)最大軸ひずみと強制変位量の関係

図-10 鋼材外径の影響 (内圧無視・N値=10・逆断層)

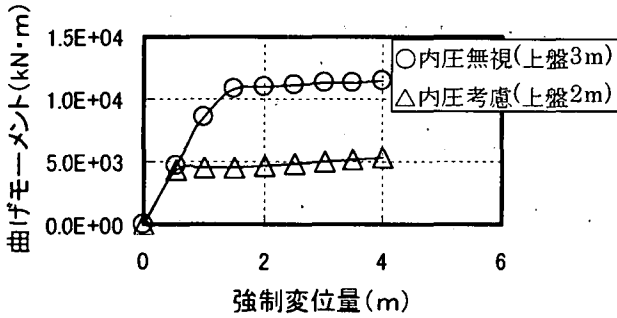


(a)最大曲げモーメントと強制変位量の関係

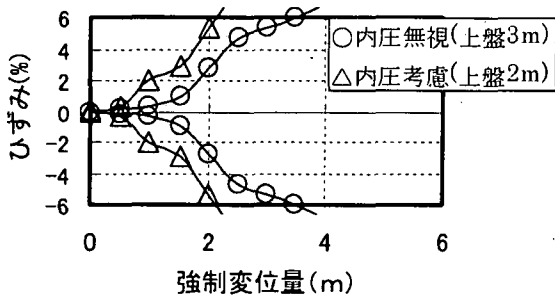


(b)最大軸ひずみと強制変位量の関係

図-12 地盤硬さの影響 (D=101.6cm・内圧無視・逆断層)



(a)最大曲げモーメントと強制変位量の関係



(b)最大軸ひずみと強制変位量の関係

図-11 内圧の影響 (D=101.6cm・N値=10・逆断層)

b) 内圧の影響

鋼材外径 $D=101.6\text{cm}$ 、 N 値=10 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-11(a)に、最大軸ひずみと強制変位量の関係を図-11(b)に示す。内圧を考慮すると、最大曲げモーメントと最大軸ひずみの計算される場所が海底面での断層に近づいた。内圧を考慮すると強制変位量 1m で曲げモーメントが最大値に近づき、内圧を無視すると強制変位量が 2m で塑性モーメントに近づいた。また、軸ひずみが 3% になる時の強制変位量は内圧無視のとき 2.04m、内圧考慮のとき 1.58m で、内圧が軸ひずみに与える影響は大きかった。

c) 地盤硬さの影響

鋼材の口径 101.6cm 、内圧を無視し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-12(a)に、最大軸ひずみと強制変位量の関係を図-12(b)に示す。地盤硬さが硬くなると、最大曲げモーメントと最大軸ひずみの計算される場所が海底面での断層位置に近づいた。この時、地盤硬さが硬くなると塑性モーメントに達するまでの強制変位量が小さくなった。また、軸ひずみが 3% になる時の強制変位量は N 値=40 のとき 1.35m、 N 値=10 のとき 2.04m とき、 N 値=1 のとき 4m 以上で、地盤の硬さが軸ひずみに与える影響は大きかった。

ひずみが 3% になるまでの強制変位量は鋼材外径 $D=101.6\text{cm}$ と鋼材外径 $D=76.2\text{cm}$ ではほとんど変わらず、鋼材外径が軸ひずみに与える影響は少なかった。

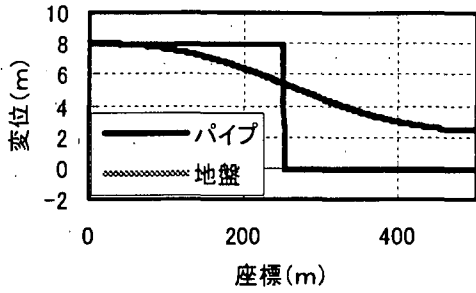


図-13 横ずれ断層の変位分布図

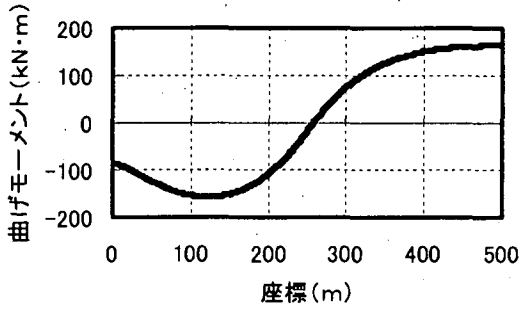


図-14 横ずれ断層の曲げモーメント分布図

(2) 横ずれ断層の解析結果

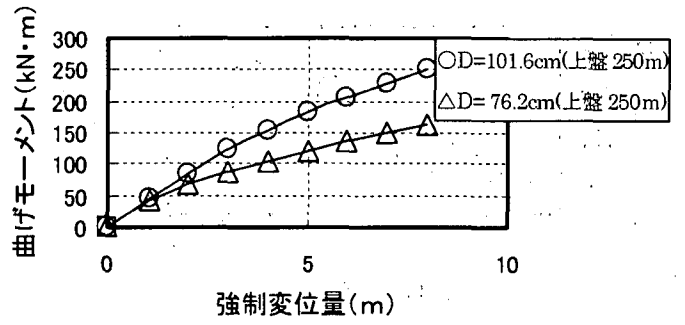
図-13に鋼材の口径 $D=101.6\text{ cm}$ 、内圧を無視し、 N 値=1で水平方向に強制変位8mを与えたときのパイプラインの水平方向の変位図を示す。パイプラインは、500mの区間全体でずれ動いている。このときパイプラインに計算された曲げモーメントの分布図を図-14に示す。最大曲げモーメントが断層位置より250m離れた部分で計算された。

a) 鋼材外径の影響

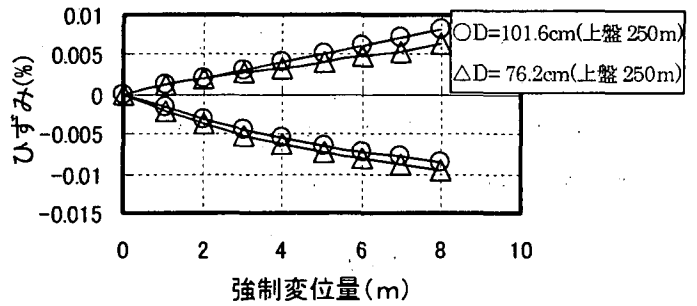
内圧を無視し、 N 値=10で水方向に強制変位を与えた時のパイプラインの最大曲げモーメントと強制変位量の関係を図-15(a)に、最大軸ひずみと強制変位量の関係を図-15(b)に示す。鋼材外径 $D=101.6\text{ cm}$ の方が、鋼材外径 $D=76.2\text{ cm}$ よりも同じ強制変位量で大きな曲げモーメントが計算された。しかし、軸ひずみの値は鋼材外径 $D=101.6\text{ cm}$ と鋼材外径 $D=76.2\text{ cm}$ ではほとんど変わらず、鋼材外径が軸ひずみに与える影響は少なかった。強制変位が8mになるまでの最大曲げモーメントは、最大で降伏モーメントの1/30以下の値で、最大軸ひずみは最大で0.009%と許容ひずみには至らなかった。

b) 内圧の影響

鋼材外径 $D=101.6\text{ cm}$ 、 N 値=10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-16(a)に、最大軸ひずみと強制変位量の関係を図-16(b)に示す。曲げモーメント図はまったく同じになった。これは、内圧の考慮の有無に関わらず、海底パイプラインの変形が線形範囲内であるためである。また、軸ひずみは、内圧を考慮したモデルは内

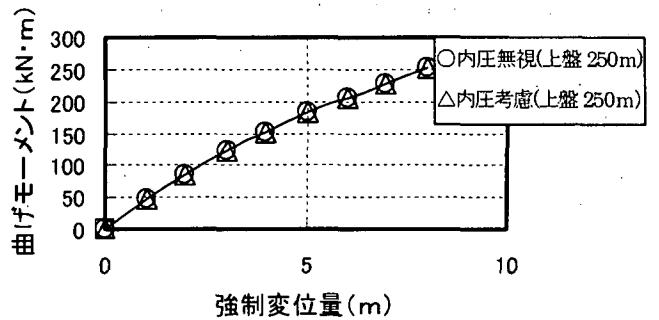


(a)最大曲げモーメントと強制変位量の関係

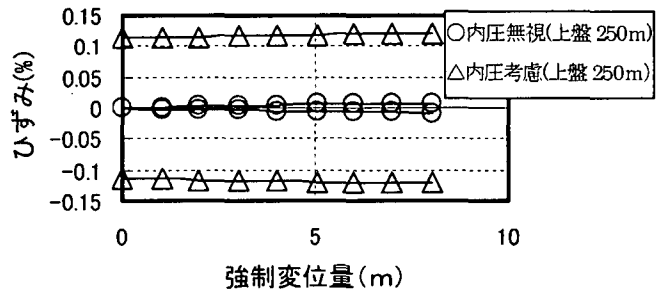


(b)最大軸ひずみと強制変位量の関係

図-15 鋼材外径の影響 (内圧無視・ N 値=10・横ずれ断層)



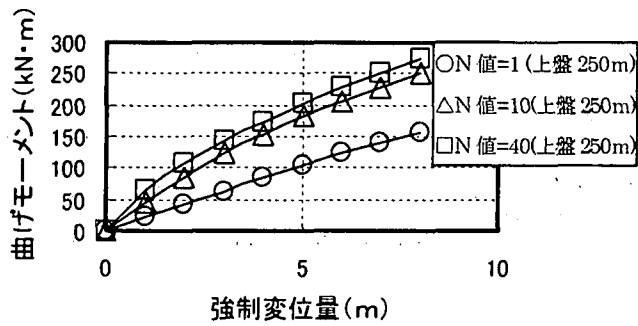
(a)最大曲げモーメントと強制変位量の関係



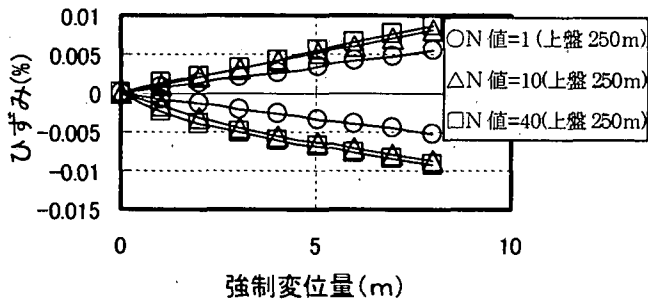
(b)最大軸ひずみと強制変位量の関係

図-16 内圧の影響 ($D=101.6\text{ cm}$ ・ N 値=10・横ずれ断層)

圧を考慮しないモデルに比べ、内圧の影響分だけ軸ひずみが大きくなった。強制変位が8mになるまでの最大曲げモーメントは、最大で降伏モーメントの1/30以下の値



(a)最大曲げモーメントと強制変位量の関係



(b)最大軸ひずみと強制変位量の関係

図-17 地盤硬さの影響(内圧無視・D=101.6 cm・横ずれ断層)

で、最大軸ひずみは内圧を考慮した時で 0.14%と許容ひずみには至らなかった。

c) 地盤硬さの影響

鋼材の口径 101.6 cm, 内圧を無視し, 水平方向に強制変位を与えたとき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-17(a)に, 最大軸ひずみと強制変位量の関係を図-17(b)に示す。N 値が大きいくほど最大曲げモーメントが大きくなった。また, 軸ひずみの値は鋼材外径 D=101.6 cm と鋼材外径 D=76.2 cm よりも大きかったが, その影響は少なかった。強制変位が 8 m になるまでの最大曲げモーメントは, 最大で降伏モーメントの 1/30 以下の値で, 最大軸ひずみは最大で 0.009% と許容ひずみには至らなかった。

5. 結論

本研究では, 海底パイプラインを弾性支床上の一次元梁要素として, 断層による地質の強制変位に対する海底パイプラインの安全性評価を行った。その結果, 逆断層と縦ずれ断層で各々以下のことが分かった。

(1) 逆断層

今回想定したパイプラインはある程度の強制変位量によ

り許容ひずみ基準に達した。また, 断面力は上盤側の断層近くで最大となった。その際, パイプラインの軸ひずみの大きさは, 海底地盤の硬さとパイプ内の内圧に対する影響が大きかった。すなわち, 海底地盤が硬質のほどひずみ量が大きくなり, また, 内圧を考慮するとひずみ量が大きくなった。

(2) 横ずれ断層

パイプラインが地盤上を滑り, パイプラインは許容ひずみ基準には至らなかった。また, パイプラインの断面力が大きくなるのは, 断層位置よりかなり離れた部分であった。その際, パイプラインの軸ひずみの大きさは, パイプ内の内圧に対する影響が大きかった。すなわち, 内圧を考慮するとひずみ量が大きくなった。これは, 横ずれ断層では断層のずれ量によりパイプラインに生ずる軸ひずみ量は小さく, 内圧の考慮の有無が軸ひずみに与える影響が大きいためである。

6. あとがき

今回, 簡易な方法により海底パイプラインを弾性支床上の一次元梁要素として, 海底パイプラインの安全性評価概略を行った。その結果, 特に逆断層で地震時に生ずる地盤の段差に対する海底パイプラインの損傷が大きいことが分かったが, 今後, 海底パイプラインの安全性評価をよりの確に把握するために, 海底パイプラインのパイプラインを SHELL 要素に置換したモデルで, 局所的な座屈の発生の有無, 合成応力, 埋設の有無, 内圧の大小等についても検討されることが望まれる。

更に, 断層周辺地盤における動的解析を実行した時の海底パイプラインに生じる断面量力についても検討していくことにより, 断層を横切る海底パイプラインの安全性評価がより高まると考える。

なお, 断層変位の計算には東京大学島崎教授の所有プログラムにより実施した。ここに快く計算させて頂いた島崎教授に敬意を記す次第である。

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 23 回地盤工学・応用地学に関するシンポジウム, pp.43-44, 1999
- 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) Yoshimitsu Okada: Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space, Bulletin of the seismological society of America, Vol. 75, No.4, 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