

地震環境下での長距離パイプラインの信頼性評価

Reliability Assessment of Transmission Pipeline under Seismic Hazard

小池 武¹⁾、 前田 諭²⁾

Takeshi Koike, Satoshi Maeda

1) 正会員 工博 川鉄エンジニアリング株式会社

東京都文京区後楽 1-1-5

2)

川崎製鉄株式会社 エネルギー水道事業部 東京都千代田区内幸町 2-2-3

The reliability-based design methodology for the transmission high-pressure pipeline is described. Limit state design criterion is introduced for the lifetime risk assessment in the seismic environment, while the maintenance activities including field patrols, periodic inspections and repairs are also taken into consideration. Pipe damages, which are caused by potential defect, corrosion, earthquake ground displacement, settlement and the third party accident, are classified into three major damages modes which include tension/compression, bending and dent with gouge. The assessment is made for the transmission pipeline system which is surrounded with various hazards spatially distributed along the pipeline route.

Key word: pipeline, reliability analysis, seismic hazard, corrosion defect, dent with gouge

1. はじめに

欧米では長距離パイプライン網が都市、州、国境を越えて縦横に張り巡らされ、高速道路網に匹敵するインフラストラクチャーとして発展しているのに比較して、わが国では一部の都市ガス幹線やエネルギー輸送ラインとして建設が進められているが、国土を縦貫するエネルギー輸送インフラストラクチャーとしての地位を得るには至っていない。しかしながら、地球環境保全やエネルギー利用の適正化の観点から、とりわけ高圧天然ガス輸送のパイプラインがわが国の内外において今後ますます発展するものと期待されている。

本論文で取り上げる長距離パイプラインは、都市ガスの高圧導管あるいは発電所間のエネルギー輸送管路に相当するパイプラインであり、形態的には非ネットワーク構造であることが多く、基本的性格として長距離、高圧、埋設を主とする幹線ラインという特徴を有している。その結果、長距離パイプラインは日常の一般的な荷重だけでなく、地震、地盤破壊などの突発的自然災害に対しても十分な安全性を有するよう厳しい構造強度的保証を要求されることになる。

本研究では、高圧ガス導管を中心とする長距離パイプラインの構造安全性について、とくに管特有の破壊限界状態に対するライフタイム危険度評価を行う方法論を展開する。

長距離輸送に適した高圧ガスパイプラインは、エネルギー基地を起点とし、都市間を結ぶ幹線パイプラインとして建設されるが、そのルートは各種道路下や占

用地であり、いくつかの河川、鉄道、道路横断部分を含むことになる。事前の調査結果に基づき管路敷設ルートは潜在危険度を有する地区を避けて設定されるのが原則であるが、多くの都市が沖積平野に立地し、埋立地での産業活動、都市生活が活発なわが国ではパイプラインルートが沖積地盤、とくに軟弱地盤地区を避けることができず、また場合によっては、液状化危険度を潜在的に有する地区にルートを設定せざるを得ない場合も想定しなければならない。そして、道路下への敷設は、将来第三者による掘削工事などに伴う管路破損の危険が常に付きまとうことになる。

したがって、長距離パイプラインの構造安全性照査は、一般外荷重（内圧、土圧、交通荷重、温度荷重など）に対する許容応力度照査をはじめとして、腐食・溶接欠陥からの亀裂の進展、第三者行為を原因とする管路損傷、地盤特性に依存する不同沈下そして地震による管路への影響、付帯施設の地震応答などに対する安全性検討をその内容とすることが要請される。

以上より、本研究では（１）パイプラインの構造的損傷モードとして代表的な腐食欠陥およびへこみ（dent）などの潜在欠陥を有する管体の残存強度を推定する。次に（２）地震動により管に発生する地震時ひずみおよび地盤変状による管変形挙動推定の簡易手法を提案する。さらに（３）定期点検・補修作業により潜在欠陥レベルがある一定水準に維持される中で、地震が発生した場合のパイプラインシステムの安全性評価手法の定式化を試みる。

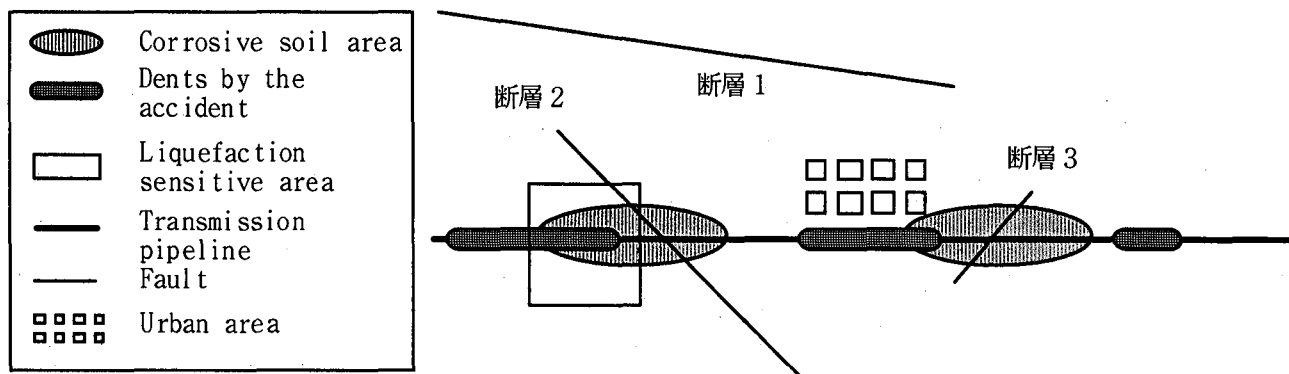


Fig.1 Geological hazard conditions along the pipeline

2. パイプラインを取り巻く荷重環境

従来、欧米のパイプラインでは内部欠陥、腐食欠陥、第三者原因の管損傷、運転中の圧力変動、温度変化を原因とする疲労破壊などが主要破壊要因として挙げられているが、わが国ではそれらの要因に加えて地震荷重が主要因として存在する。また、多くの都市が沖積平野に立地し、埋立地での産業活動、都市生活が活発なわが国では、軟弱地盤内へのパイプライン敷設を回避できない場合もあり、不同沈下も管路被害の要因の一つとなる。

以上より、わが国のパイプラインに対する支配的管路被害要因⁵⁾として、内部欠陥、腐食、地震、不同沈下、第三者による事故そして運転中の圧力・温度変動を取り上げることとする。

Fig.1は、長距離パイプラインとその周辺環境を模式的に表現したものである。パイプラインルート設定時には当然、潜在危険箇所を回避したルートを選定することを基本とするが、やむを得ない事情から、上述のような潜在危険箇所を通過せざるを得ない場合が存在する。Fig.1はそのような場合を想定しており、パイプラインは、腐食土壌区域、市街地道路下埋設で常に第三者原因の管路破損の危険性に晒されている地区、液状化危険度地区あるいは断層線を横断して敷設されたモデルとなっている。パイプライン周辺に、ある延長距離 L_f をもつ活断層が存在する場合があることから、同図には3種類の活断層を配置している。断層1はパイプラインから遠方に位置するが、断層延長距離の長いもの、断層2はパイプラインを横断し、しかも断層延長が3断層中の中間的なもの、そして、断層3はパイプラインを横断するが断層規模は三者中最小のものと設定した。

3. 構造的損傷を受けたパイプラインの残存強度

構造的損傷として、腐食やへこみによる管表面の損傷がある。これらの構造的損傷をもつ管は、健全な管と比較すると強度劣化を免れない。ここでは、構造的損傷をもつパイプラインの残存強度推定手法について概説する。

3. 1 腐食損傷

Fig.2は、管体表面に腐食損傷が発生し、管表面の幅 W において管厚が d^c だけ腐食して

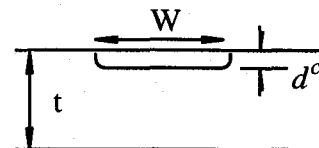


Fig.2 Corrosion crack in the pipe wall.

いる状況を示している。腐食深さは、時間経過 T とともに進行する。いま、腐食深さの進行度合い Δd^c がAhammed & Melchers¹⁰⁾の提案する次式で表現できると仮定する。

$$\Delta d^c = \zeta T^n \quad (1)$$

ここで、係数 n, ζ は、それぞれ腐食劣化のパラメータであり、Ahammedら¹⁰⁾は $n = 0.53$ を採用している。

管表面の腐食や溶接欠陥などが存在する場合には、欠陥周辺部の応力集中のため、破壊開始円周方向応力が無欠陥の場合より低下する。Mokらによれば、長い腐食欠陥を有する管路の破壊開始円周方向応力は次式で与えられる。

$$\sigma_{h,c} = \sigma_{flow} \frac{1 - \frac{A}{A_0}}{1 - \frac{A}{MA_0}} \quad (2)$$

ここで、 σ_{flow} : 管材の限界強度、 A : 欠陥部面積、 W : 管表面欠陥長さ、 t : 管厚、 M : Folias factor¹¹⁾

$$A_0 = tW, \quad A = d^c W \quad (3)$$

$$M = \sqrt{1 + \frac{1.255}{2} \left(\frac{W}{\sqrt{Dt}} \right)^2 - \frac{0.0135}{4} \left(\frac{W}{\sqrt{Dt}} \right)^4}$$

3. 2 へこみ損傷

第三者によってもたらされる管路被害の典型的事例として管体のへこみ(dent)がある。

Fig.3に示すように、へこみ表面に傷を有する深いへこみ(dent with gouge)を考える。すなわち、深さ

L_d のへこみが発生し、その表面にさらに深さ d の傷が発生する場合を仮定する。このような傷を有するへこみの周方向強度に関する実験結果が *Battelle* 報告¹⁾ (Fig. 4) に示されている。そこでは、横軸を管材の寸法、へこみ寸法、シャルピーエネルギー値からなる代表値を Q とした場合に、傷のあるへこみを持つ管の残存強度は次式で与えられる。

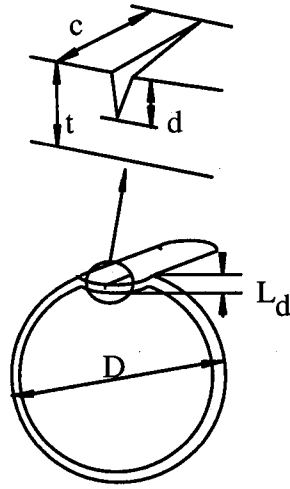


Fig. 3 Dent profile with gouge.

$$\sigma_{h,dent} = \sigma_{flow} \frac{(Q-30)^{0.6}}{90} \quad (4)$$

ここで、

$$Q = \frac{CVN}{\frac{L_d}{D} \frac{2c}{t} d} \quad (5)$$

ただし、 σ_{flow} : 管材の限界強度、 D : 管径、 d : へこみ内の傷深さ、 L_d : 最大へこみ深さ、 $2c$: 傷長さ (inch)、 t : 管厚、 CVN : シャルピーエネルギー値 (ft-lb)。

3. 3 パイプラインの地震時挙動

(1) 地盤震動

パイプラインに発生する地震時ひずみ⁶⁾ ϵ_s は、地盤ひずみ ϵ_G 、ひずみ伝達率 α_0 、すべり低減係数 q

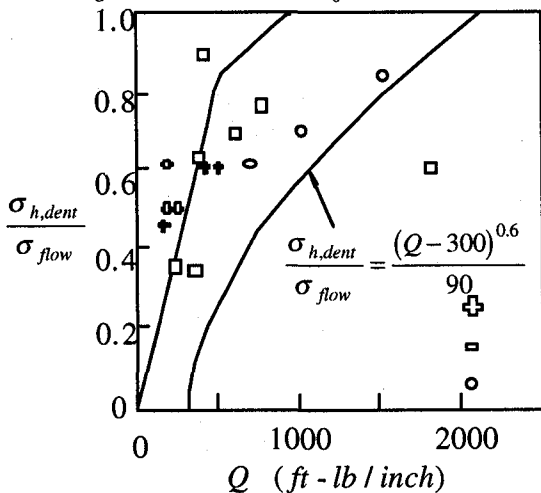


Fig. 4 Experimental results and design curve for the dent with gouge.

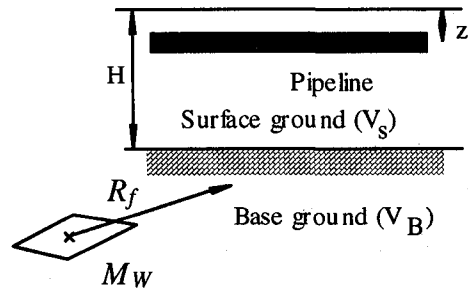


Fig. 5 Pipeline buried in the surface ground.

を用いて次式により算定することができる。

$$\epsilon_s = q \alpha_0 \epsilon_G \quad (6)$$

管と周辺地盤の間にすべりが発生すると、累積する相対変位は直管に隣接する異形管部に集中する。異形管に発生する管ひずみおよびたわみ角度は相対変位 Δ に比例する形で、次式で与えられる。

$$\epsilon_B = \beta_B \Delta, \quad \theta_B = \gamma_B \Delta \quad (7)$$

ここで、 β_B および γ_B は曲管のひずみ変換係数とたわみ角変換係数であり、その詳細な数式表現は文献¹²⁾ に示されている。さらに管と周辺地盤間の相対変位 Δ は、

$$\Delta = (1 - q^* \alpha_0) U_h \quad (8)$$

ここで、 U_h 、 q^* は、それぞれ管路位置での地盤変位振幅、相対変位を求めるためのすべり低減係数⁶⁾。

水平方向の管・地盤間相対変位は、地震波の水平方向伝播速度の定義により異なる値をとる。たとえば、水平方向伝播速度としてガス導管耐震設計指針では表面波の伝播速度を採用し、石油パイプライン基準や水道施設耐震工法指針等では表層地盤と基盤のせん断波速度の調和平均値を採用しているため、それぞれから算定される相対変位も異なることになる。

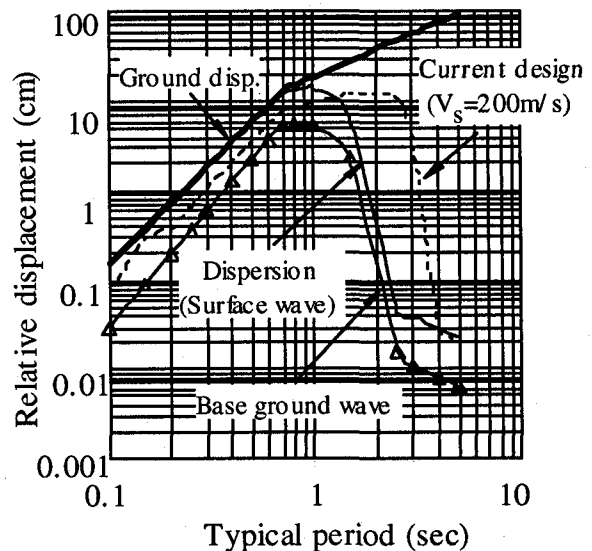


Fig. 6 Relative displacements for various definitions of wave velocity.

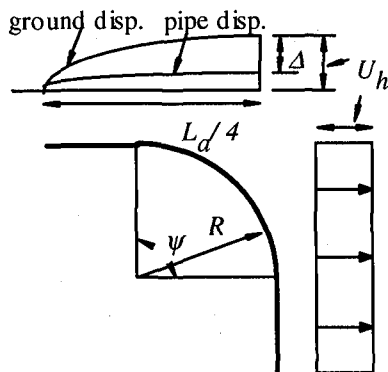


Fig.7 Bend pipe deflected by relative displacement.

Fig.6は、レベル2地震動を受けたときの地震波のさまざまな水平伝播速度に対する管・地盤間の相対変位を地盤周期ごとに図示したものである。図中の細線(Dispersion)は表面波速度、破線(Current design)は調和平均による剪断弾性波速度そしてもう一つの線(Base ground wave)は工学的基盤内の剪断弾性波速度から算定した相対変位であり、太い実線は地盤変位である。同図を見ると表面波の場合の相対変位の最大値は1秒付近で15cm程度となることがわかる。Fig.7は、地震波が曲管部に入射したときの地盤変位および相対変位の発生状況を示している。

相対変位が大きくなり、曲管部の断面扁平化が進むと、弾塑性状態における曲管変形挙動は曲管部を塑性ヒンジとして取り扱うことで、以下に示すような簡易ひずみ算定式¹³⁾を得ることができる。

$$\varepsilon_B = C_B \frac{iD}{2\psi nR} \arctan\left(\frac{\Delta}{W}\right) \quad (9)$$

ここで、 C_B, D, i, n, R, W, ψ はそれぞれ弾塑性調整係数、管外径、応力集中係数、たわみ係数、曲率半径、塑性ヒンジ区間、曲管角度である。Fig.8は、簡易曲管ひずみ算定式(実線)とFEM解析結果を比較¹³⁾したものであり、両者が概ねよい一致を示しているのがわかる。

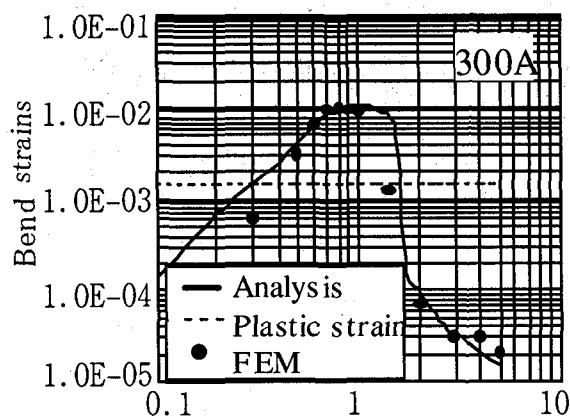


Fig.8 The maximum structural strains of the bend portions

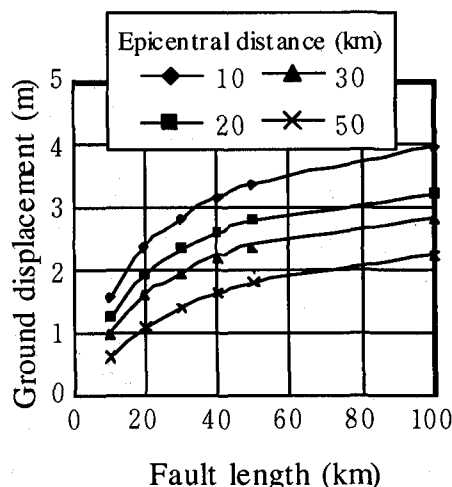


Fig.9 Ground displacement by fault movements.

(2) 地盤変状

レベル2地震動による地盤変状として、地盤液状化に伴う地盤の永久変形、断層変位、地すべりなどを挙げるができる。

従来から日本国内において、地盤変状量を推定する調査研究が精力的に行われているが、地震規模と地盤変状量との関係を明示した予測法はまだ研究途上と言わざるを得ない。最近、Rauchら²⁾により、地震規模から液状化地盤変状量の平均値と標準偏差値を推定する算定式が次式のように提案されている。

$$\mu_D = (D_R - 2.21)^2 + 0.149 \quad (10)$$

$$\sigma_{D_L} = 0.589\mu_{D_L}$$

ここで、

$$D_R = 0.613M_w - 0.0139R_f - 2.42A_{max} - 0.0114T_d \quad (11)$$

ただし、 M_w, R_f, A_{max}, T_d はそれぞれモーメントマグニチュード、震央距離(km)、最大加速度(g)、地震動継続時間(sec)であり、ここでは一般的な地震動の主要動継続時間として10秒を仮定した。

Fig.9は、震源断層の規模と震央距離が与えられたときの地盤変状量を式(10)により算定したものである。

Fig.10は、大きさの地盤変状が曲管部に作用し、周辺土圧が受動土圧抵抗を発揮したとき、曲管部のたわみ角は次式で簡易的に算定⁹⁾することができる。

$$\theta = \arctan\left(\frac{\Delta}{W}\right) \quad (12)$$

ここで、 W, M_p, p は塑性ヒンジ間の距離⁴⁾、塑性モーメントそして地盤反力である。

$$W = \sqrt{\frac{3M_p}{p}}$$

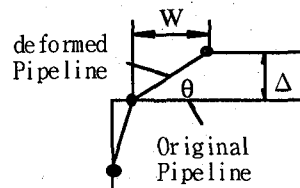


Fig.10 Deformed pipeline due to an excessive ground displacement.

4. 地震環境下でのパイプラインの信頼性

4. 1 定期点検と補修

パイプラインの運転が始まるとともに、パイプライン周辺環境の影響を受けて、その延長線に沿ってさまざまな潜在欠陥が生成する。しかし、定期点検とそれに続く補修業務が行われるとき、補修後の潜在欠陥は確実に減少するが、しかし皆無にすることはできない。それは、点検補修時の欠陥検出精度や補修の確実度に限界が存在するためであり、その状況を概念的に示したのがFig. 11である。いま、潜在欠陥Dの検出・補修性能特性曲線がFig. 11のP[I | D]で与えられ、さらに点検前の潜在欠陥の存在確率がP[D]のとき、点検・補修後の潜在欠陥の確率分布は、Bayesの定理に従ってP[D | I]で与えられる。数式表現としては、次式で求められる。

$$P[D|I] = \frac{P[I|D]P[D]}{\sum P[I|D]P[D]} \quad (13)$$

欠陥の点検・補修性能特性は、平常時にはその時間的余裕から一定の精度を確保できるが、地震直後のように災害発生後の応急復旧時にはその時間的・人的制約から平常時とは異なる水準での復旧が実施される可能性がある。

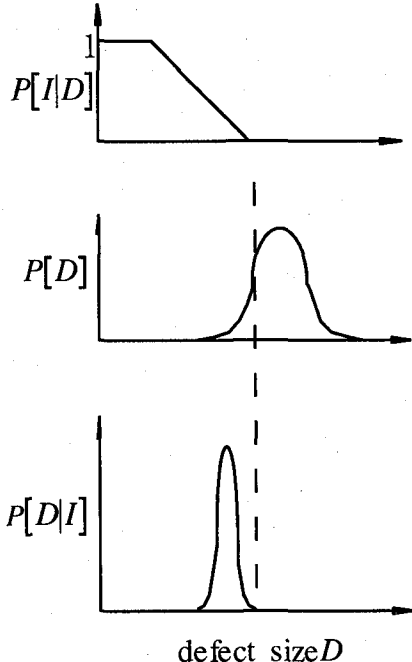


Fig.11 Probability density of dent size revised through the inspection works.

Fig. 12は、このような状況を想定した場合の平常時および地震直後の点検・補修性能特性⁸⁾を図示したものである。ここでは、地震時の点検・補修性能特性が平常時よりも低下している状況を示している。

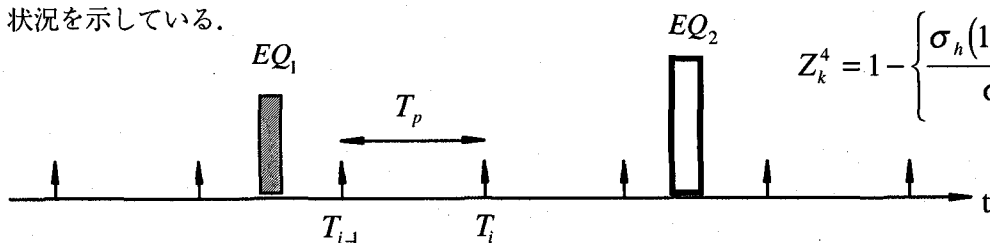


Fig.13 Lifetime events during the maintenance activities.

4. 2 地震環境下でのパイプライン信頼性解析

Fig.13は、パイプラインの供用期間中に時間間隔 T_p で定期的に行われる点検・補修と突発的に発生する複数の地震EQ₁, EQ₂の発生状況を例示

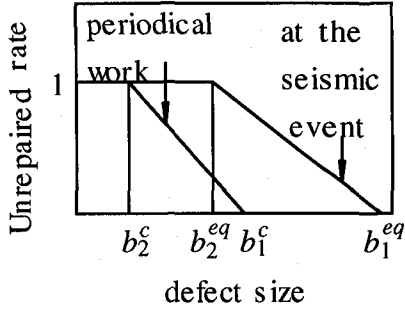


Fig.12 Repair work capability.

したものである。上図を参考に、地震発生以前、地震発生時、地震以後のパイプラインシステムの信頼性評価の方法について述べる。

いま、損傷モードkの潜在欠陥について考えると、地震発生以前での周方向応力 σ_h に関する限界状態関数は次式で定義できる。

$$Z_k^1 = 1 - \frac{\sigma_h}{\sigma_{cr}} \quad (14)$$

ここで、 σ_{cr} は損傷モードkに関する限界強度であり、式(2)、(4)で与えられる。つぎに、地震時の限界状態関数は、軸方向管ひずみ ϵ_s が卓越して発生することから、次式で与えることができる。

$$Z_k^2 = 1 - \left\{ \frac{\sigma_h}{\sigma_{cr}} + \left(\frac{\epsilon_s}{\epsilon_{cr}} \right)^\alpha \right\} \quad (15)$$

ここで、 ϵ_{cr} は軸方向限界ひずみであり、一方、 α は二軸応力状態の限界状態を対象とする時の軸方向成分評価係数であり、海底パイプラインなど⁷⁾ではしばしば0.8の値が用いられる。

地震後に運転を再開した状況下では、周方向の管厚が地震時の永久ひずみ成分 ϵ_p により少なくともポアソン比 ν の影響によるひずみ $\nu\epsilon_p$ だけ薄くなることから、その限界状態関数は次式となる。

$$Z_k^3 = 1 - \frac{\sigma_h(1 + \nu\epsilon_p)}{\sigma_{cr}} \quad (16)$$

一方、上記の永久ひずみを抱えた期間中にさらに新たな地震が発生したとき、管軸方向のひずみに関する許容値はすでに存在する永久ひずみ相当分だけ差し引くことで、以下の限界状態関数を定義することができる。

$$Z_k^4 = 1 - \left\{ \frac{\sigma_h(1 + \nu\epsilon_p)}{\sigma_{cr}} + \left(\frac{\epsilon_s}{\epsilon_{cr} - \epsilon_p} \right)^\alpha \right\} \quad (17)$$

限界状態関数 Z が定義できると、関数 Z に対する破壊確率は正規分布関数 Φ を用いて以下のように求めることができる。

$$P_f = \Phi\left[-\frac{\mu_Z}{\sigma_Z}\right] \quad (18)$$

ただし、確率変数 Z は、正規分布に従うものと仮定する。したがって、

$$\mu_Z = E[Z], \quad \sigma_Z = \sqrt{\text{Var}[Z]} \quad (19)$$

パイプラインが完成すると、時間経過とともに沿線上にさまざまな管路被害要因が発生し空間的に分布するようになる。これらの管路被害要因全体の単位時間、単位長さ当たりの発生確率、すなわち危険率(hazard function)を $\Lambda(\tau, x)$ とする。この時、区間長 L のパイプラインが期間 $[0, T]$ にわたって安全である確率 $R[T, L]$ は、初期状態での信頼性 $R_0[L]$ と供用後の危険率 $\Lambda(\tau, x)$ により次式で与えられる。

$$R[T, L] = R_0[L] \exp\left\{-\int_0^L \int_0^T \Lambda(\tau, x) d\tau dx\right\} \quad (20)$$

供用期間中のパイプラインは、上述の内部欠陥による潜在的危険に晒されるだけでなく、管外面の腐食や地震の影響、不同沈下、第三者原因の事故による管体へこみなど、さまざまな外荷重による作用を加重的に受けることになる。したがって、供用期間中における危険率 $\Lambda(\tau, x)$ は、前述の被害モードの独立性の仮定から次式で書き表すことができる。

$$\Lambda(\tau, x) = \sum \lambda_k(\tau, x) \quad (21)$$

ここで、 $\lambda_k(\tau, x)$ は被害要因が生成する潜在クラックによる時刻 τ 、位置 x におけるシステムの危険率であり、次式で与えられる。

$$\lambda_k = P[Z_k(\tau, x) \leq 0] v_k(x) \quad (22)$$

ただし、 v_k は位置 x を含む領域の単位距離、単位時間において被害要因 k による潜在クラックが発生する確率である。

とくに、地震荷重については供用期間中の T 年間に少なくとも m 回の地震 $\{EQ_i, i=1, \dots, m\}$ が発生し、それによる潜在危険箇所(地盤液状化、地すべり、断層変位などの地盤変状)の発生率が $v_{eq}(x, EQ_i)$ で与えられるとすると、(20)式の供用期間中の信頼性は以下のように拡張した表現を得る。

$$R_p[t, T_p, L] = \sum_{j=1}^m R_p[t, T_p, L | EQ_j] P[EQ_j] \quad (23)$$

ここで、 $P(EQ_i)$:地震の発生確率、 $R_p[t, T_p, L | EQ_i]$ は地震 EQ_i 発生条件下でのシステムの信頼性を意味し、危険率 $\Lambda(\tau, x)$ の時空間におけるPoisson過程を仮定することで以下のように定式化できる。

$$\begin{aligned} R_p[t, T_p, L | EQ_j] &= R_p[T_{i-1}, T_p, L | EQ_j] \\ &\quad \cdot \exp\left\{-\int_0^L \int_{T_{i-1}}^{t'} \Lambda(\tau, x) d\tau dx\right\} \\ R_p[T_i, T_p, L | EQ_j] &= R_p[T_{i-1}, T_p, L | EQ_j] \\ &\quad \cdot (1 - H_{eq}) \prod_k (1 - H_k^*) \end{aligned} \quad (24)$$

ただし、 H_k^* は被害要因が地震以外である破壊確率を表し、そして H_{eq} は地震に対する破壊確率を表し、それぞれ次式で与えられる。

$$\begin{aligned} H_k^* &= \int_0^L \int_0^{d_{cr}^k} v_k(x) P[\text{failure at } x \text{ due to } k\text{-th hazard} | y \leq d_{cr}^k] \\ &\quad \cdot f_{D^k(x, t)}(y) dy dx \\ H_{eq} &= \int_0^L P[\text{failure at } x | EQ_j] dx \end{aligned} \quad (25)$$

ここで、 $v_{eq}(x, EQ_i)$:位置 x における地震 EQ_i による潜在危険箇所の発生率である。 d_{cr}^k :潜在欠陥の点検・補修における最小検出長さ、 $f_{D^k(x, t)}(y)$:位置 x での時刻 t における被害要因 k による潜在欠陥長さ $D^k(x, t)$ の確率密度関数。

ところで、潜在危険箇所とは、地盤液状化や地すべりあるいは断層変位発生地点などであり、それぞれの発生箇所に関する空間的相関はほとんど無視することができる。

4. 3 数値検討例

数値計算例は、口径600A、延長100km、内圧7MPaの長距離ガスパイプラインを想定して検討した。パイプラインに関する諸元をTable 1に示す。直管の地震時ひずみに対する許容限界ひずみは3%、曲管の場合の対応する許容限界ひずみは10%と仮定した。

Table 2は、本論文で仮定した欠陥検出精度の限界値一覧表であり、Table 3は、へこみ表面に傷がある欠陥寸法に関して仮定した統計量の一覧表である。

さらに、パイプラインが断層横断する場合の断層変位量 $^{3)}D_p$ は、地震モーメントを用いて次式より推定した。

$$\mu_{D_F} = 1.0657 \times 10^{-7} M_0^{1/3}$$

ここで、 M_0 は地震モーメント¹⁴⁾であり断層面積 $S(\text{km}^2)$ を用いて次式で与えられる。

$$M_0 = 1.23 \times 10^{22} S^{1.5} \quad (\text{dyn} \cdot \text{cm})$$

さらに、腐食欠陥およびへこみ欠陥の年間単位距離当たりの発生率はそれぞれ次式で与えられると仮定した。

$$v_c = 10^{-4} \text{ to } 10^{-2} \quad 1 / \text{yr} \cdot \text{km}$$

$$v_{dent} = 3 \times 10^{-4} \text{ to } 3 \times 10^{-2} \quad 1 / \text{yr} \cdot \text{km}$$

Table 1 Dimensions of pipe element

Item		unit	value
Diameter	D	mm	610
Thickness	t	mm	8.7
Pressure	P	MPa	7
Flow stress	σ_{flow}	MPa	520
Charpy energy	CVN	J	500
Critical strain for pipe	ε_{cr}^p	%	3
Critical strain for bend	ε_{cr}^b	%	10

Table 2 Detection limits for defect size

Repair item	limit	unit	values
Usual defect repair	Upper limit	b_1^c	cm 5
	Lower limit	b_2^c	cm 2.5
Defect repair after quake	Upper limit	b_1^{eq}	cm 10
	Lower limit	b_2^{eq}	cm 5

Table 3 Statistics of dent size with gouge.

Item		unit	mean	cov
Crack depth	d^c	cm	5	0.1
Gouge depth	d	cm	8	0.25
Gouge length	c	cm	10	0.35

さらに、断層からの地震発生率³⁾は、断層活動度 s (m/1000year)および断層長さ L_f (km)を用いて、次式より推定することができる。

$$v_{eq} = \frac{s}{10^{1.9} L_f}$$

Fig.14は、さまざまな管厚がパイプラインの破壊確率に及ぼす効果を比較検討したものである。管厚が増加するとともに、破壊確率が大きく減少する様子が見て取れる。一方、Fig.15は、管厚が次第に減少してゆく腐食速度の影響を検討した図である。すなわち、式(2)の腐食劣化パラメータ ζ は腐食の進行度合いを規定するパラメータであり、腐食進行度合い(速度)が大きくなるにしたがって、破壊確率がどの程度増加するかを示している。上記二つの図面は、パイプラインの運転当初は次第に破壊確率が増加するが、その増加割合は時間経過とともに次第に緩慢になる傾向のあることを示している。

Fig.16は、定期点検・補修の時間間隔の効果を検討したものである。ここでは、5年、10年、20年ごとの3ケースについて検討している。同図より、5年間隔の場合は確かに破壊確率を 10^{-3} 以下におさえられているが、20年間隔の場合は破壊確率が 10^{-2} にまで上昇する可能性があることがわかる。

Fig.17は、地震発生前、地震発生時、地震発生後、さらに2回目の地震発生前後のパイプラインシステムの危険率について検討したものである。ここで、第一回

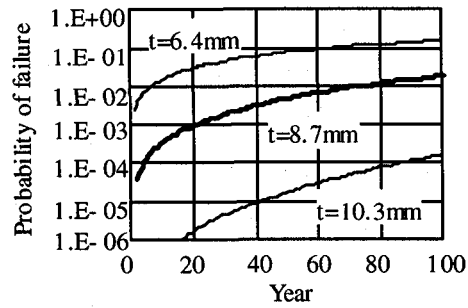


Fig.14 Probability of failure for various pipe walls.

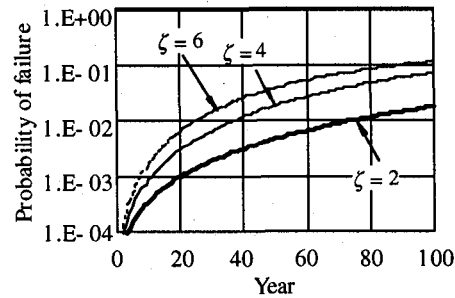


Fig.15 Effect of corrosive deterioration in pipe wall thickness.

目の地震(EQ1)はFig.1の断層1で地震が発生した場合であり、第二回目の地震(EQ2)は断層3で地震が発生した場合を想定している。

細い実線(C+D=non-insp.w/o EQ1)は、定期点検・補修を実施しない場合の腐食とへこみの影響を見たものである。太い実線(C+D+EQ=non-insp.with EQ1)は、地震EQ1が運転期間中一定の発生危険度をもつ場合のパイプラインシステムの危険率を算定したものである。

次に、点検・補修を実施した場合(insp.)について、地震発生が無い場合(w/o EQ1)と地震発生が1回ある場合(with EQ1)と2回ある場合(with EQ1&EQ2)でどの程度破壊確率に差異が生じるのかを算定比較した。ただし、第一地震(EQ1)発生時期は、パイプライン運転開始後15年目、第二地震(EQ2)発生時期は運転開始後35年目の場合に限定して数値検討を行った。地震発生が無い場合はもちろん三者の中で最小の値をとるが、定期点検・補修の影響で危険率の曲線が変動する様子を示している。地震発生を伴う後の二者は、地震発生直後は地震の影響で危険率の変動がより大きくなるが、その後は定期点検・補修の影響もあり運用期間中に亘ってある程度の変動を繰り返すことになる。とくに、二つの地震を受ける場合は、その変動が三者の中で最も大きい様子を示している。

Fig.18は、Fig.17の危険率の結果に対応するパイプラインシステムの破壊確率を算定したものである。危険率のグラフでは時間経過に沿って複雑に変動していたが、破壊確率のグラフではその変動が包み込まれているように観察できる。また、定期点検・補修の無い

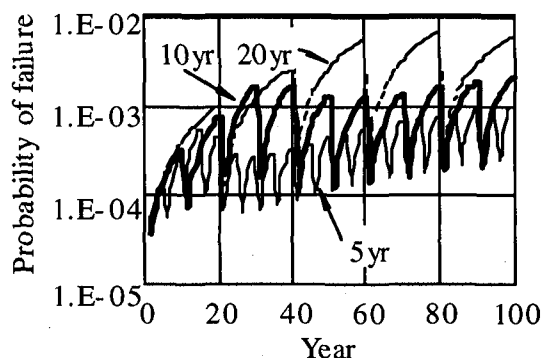


Fig.16 Effect of inspection intervals.

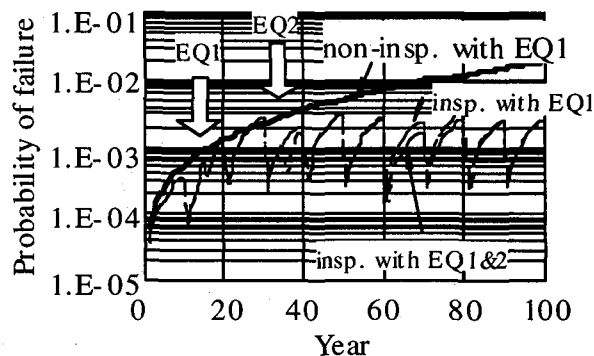


Fig.18 Effect of seismic hazards.

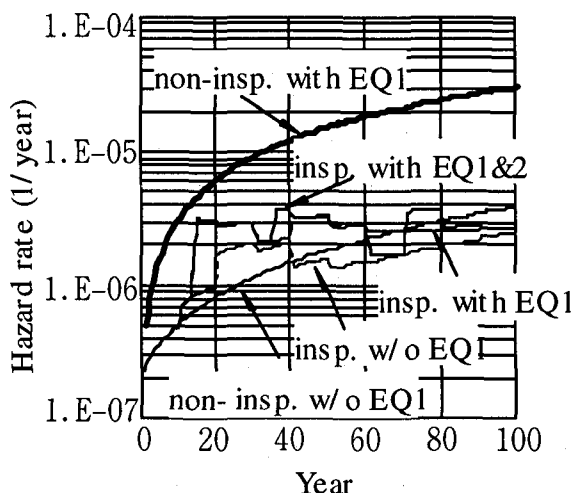


Fig.17 Hazared rates for various conditions.

場合は、破壊確率が増加傾向を保つ一方、定期点検・補修を実施する場合は地震が1回発生する場合と2回発生する場合であり差異が見られない。これは、今回の算定モデルで、1回目の地震規模が2回目の地震規模よりも大きいため、2回目の地震による塑性ひずみ累積の効果が顕著に現れなかったためと解釈できる。

5. まとめ

日常の定期点検・補修を受けて一定の安全性を確保している長距離パイプラインが供用期間中にレベル1あるいはレベル2相当の地震動を少なくとも一回あるいは二回受けた場合に、供用全期間中のパイプラインシステムの安全性が変化する状況を評価するための信頼性解析手法の展開と数値計算例を提示した。

得られた成果を以下に列挙する。

- (1) 長距離パイプラインを取り巻く自然的、社会的環境条件に起因する管路被害に対して、定期点検・補修を行った場合のシステム安全性評価手法を開発した。
- (2) さらに、耐用期間中に遭遇するレベル1地震動あるいはレベル2地震動に対するパイプラインシステムのライフタイム危険度照査手法を開発した。

参考文献

- 1) Stephens, D.R., R.J.Olsen and M.J.Rosenfeld(1991): Topical report on pipeline monitoring- limit state criteria -, NG-18 Battelle Report, No.188.
- 2) Rauch, A.F., et al(1999): EPOLLS Prediction of permanent ground deformation resulting from lateral spreading, Post-earthquake lifeline system reliability, pp.51-60.
- 3) 宇津徳治(1984): 地震学, 共立出版株式会社.
- 4) 高田至郎、他(1998): 液状化側方流動を受ける埋設管の弾塑性変形に関する簡易計算法, 第10回日本地震工学シンポジウム, pp.3155-3160.
- 5) 小池 武(1999): 長距離パイプラインのライフタイム危険度評価について, 材料, 第48巻, 第1号, pp.83-88.
- 6) 日本ガス協会(2000): 高圧ガス導管耐震設計指針, JGA指-206-00, 日本ガス協会.
- 7) Det Norske Veritas(2000): Submarine pipeline Systems, Offshore Standard OS-F101, DNV.
- 8) Koike, T. (2000): Lifetime reliability assessment of transmission pipeline under seismic hazard, 5th International conference on probabilistic safety assessment and management.
- 9) 高田至郎、他(2000): 液状化側方流動を受ける埋設管の非線形挙動解析, 構造工学論文集, Vol.46A, pp.947-956.
- 10) Ahammed, M. and R.E.Melchers(1997): Probabilistic analysis of underground pipelines subject to combined stress and corrosion, Engineering Structures, Vol.19, No.12, pp.988-994.
- 11) Mok, D.R.B., R.J.Pick and A.G.Glover(1990): Behavior of line pipe with long external corrosion, General Interest, MP, pp.75-79.
- 12) 小池 武、他(2000): マイターバンドの大変位挙動特性, 構造工学論文集, Vol.46A, pp.851-858.
- 13) Ogawa, Y. and T.Koike: Structural design of buried pipelines for severe earthquakes, The Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering(to be published)
- 14) 金森博雄(1991): 地震の物理, 岩波書店, pp.117-120.

(受付日 2000年9月14日)