

Structural Design of High Pressure Gas Pipelines



小池 武
Takeshi Koike

エンジニアリング事業
部 鋼構造研究所建設
エンジニアリング研究
室 主任研究員(課長)
・工博



今井 俊雄
Toshio Imai

エンジニアリング事業
部 鋼構造研究所建設
エンジニアリング研究
室 主任研究員(掛長)



中野 昭三郎
Shouzaburo Nakano

エンジニアリング事業
部 鋼構造研究所建設
エンジニアリング研究
室 室長(部長)

要旨

高圧ガスパイプラインの設計に対する当社の取り組み方、および構造設計分野における解析・設計技術についてその開発現況を述べた。パイプラインの耐震設計は構造設計における最も重要な設計分野であるとの認識から、耐震安全性検討用に埋設管路非線形挙動解析システムを開発した。本システムは、液状化地盤における地盤永久変位を受ける埋設管の変位挙動を解析するため、管路の弾塑性挙動と立体管路系としての大変位挙動を同時に考慮できる機能特徴としている。解析システムの概要と適用事例を示した。

Synopsis:

The current developing stage and scope of work in Kawasaki Steel are described on the high-pressure gas pipeline design, especially on the structural analysis and design methodology. Noting that the seismic design is the most important in the structural design field of Japan, a new analytical method on structural behaviors of buried pipelines against earthquake-induced ground movements is developed, in which both material and geometrical nonlinearities are taken into consideration. The numerical study is devoted to the analysis of pipe deformation caused by lateral ground movements which are forced by liquefaction.

1 まえがき

我が国のパイプラインは、(1)上下水道、都市ガスなど市民生活に直結したライフラインシステム、(2)化学プラント、エネルギープラント、備蓄施設など特定場内配管システムおよび(3)大規模基地(都市)間を結ぶ長距離パイプラインシステムに分類できる。

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、我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つつあるが、国上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我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。

従来、ライフラインと言われる上下水道、都市ガスなどの公益的パイプラインシステムでは、需要者が一般市民であることから、構造的に安全であることはもちろん、とくに安定的供給を前提にしたシステム作りが要求されてきた。これらのライフライン事業者は、送水管と給配水管または高圧導管と中低圧管のように幹線ラインと支線管網という階層構造およびネットワークシステムという特性を

生かしてさまざまな安定供給体制を実現してきた。

本報告でとりあげる高圧ガスパイプラインは、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、高圧ガス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ことで、安定供給のための構造強度的保証を要求される。また、安定供給を維持するためには、輸送システムとしてパイプラインの流送状況を常時監視するとともに、それを支える流況予測システム、運転監視・制御支援システム、漏洩検知システム、地震時復旧支援システムなどさまざまな運転支援システムを整備することが不可欠となる。

いずれのパイプラインも、それを実現するには流送設計、構造設計、運転・監視技術、制御・通信技術、検査技術、施工技術など幅広い技術が必要であり、その意味でパイプライン技術は総合エンジニアリングとしての性格を有している。

本報告では、パイプライン総合エンジニアリングの中から、とくに高圧ガスパイプラインの設計に対する当社の取り組み方、および構造設計分野における解析・設計技術について当社の開発現況を述べる。

* 平成5年4月26日原稿受付

2 設計技術

パイプライン設計技術の基幹をなす技術は、当社においては Fig. 1 に示す 5 つの基礎技術（構造設計、流送設計、システム設計、限界状態安全性照査、各種画像処理技術）から構成されている。

パイプラインは、管路施設としての構造安全性と輸送システムとしての供給安定性を長期にわたって維持できるように設計しなければならない。

高圧ガスパイプラインの構造安全性は、一般外荷重（内圧、土圧、交通荷重、温度変化など）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をその検討分野とする。したがって、日常の構造設計では、パイプライン施設に含まれる基本要素（直管、異形管、付帯設備）に対して、適用する設計基準に基づいた安全照査を実施する。一方、設計基準を前提としない限界状態における構造物系の安全性照査は、破壊力学、FEM、信頼性解析などを用いて構造物系の破壊限界状態での究極強度を評価することになる。とくに、大規模地震に対する構造物系の耐震安全性は、地盤震動による系の地震応答や地盤変状による系の有限変位挙動、座屈破壊など多方面からの総合的な検討が必要になる。

一方、パイプラインの輸送システムとしての供給安定性を長期間にわたって維持するためには、流送設計・解析システムの有効的な利用が重要となる。すなわち、パイプラインの流送解析システムはルート計画から流送・運転条件決定に至る基本計画・設計段階の各ステップの解析検討に不可欠であり、とくに非定常流送・運転シミュレーションシステムは SCADA (supervisory control and data acquisition) を中核とする操業安全監視・制御・通信システム構築に主要な役割を果たす。最近の傾向として、SCADA システムは従来の監視制御機能だけでなく運転支援用解析システムや地理情報システム GIS¹⁾ (geographic information system) 機能を装備することでますますインテリジェント化する傾向にある。

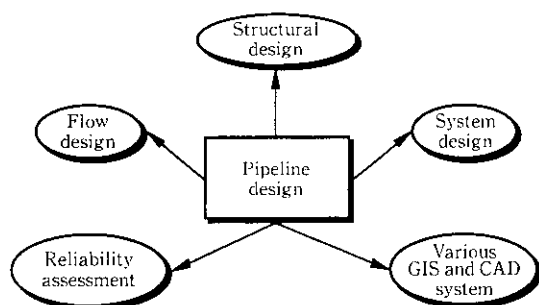


Fig. 1 Pipeline design and its related technologies

3 構造設計

我が国では、ガスパイプラインは主として都市ガスを中心に発展し、最近では電力向け燃料需要の急増とともに新たな幹線高圧導管が計画・建設され、さらにより長距離のパイプライン計画が立案²⁾、検討されつつある。

高圧パイプライン（高圧導管）は、エネルギー基地を起点とし、都市間を結ぶ長距離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、沿岸部に位置する我が国の都市立地の性格からパイプラインルートが沖積地盤、とくに軟弱地盤地区の通過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。また、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。そこで、人為的事故に対しては、設計上の防護対策だけでなく現地パトロール、事前協議などさまざまな対策を併用することで、管路破壊を事前に防ぐ方策・体制の整備が行われている。一方、地震災害に対しては、耐震設計の充実とともに地震防災対策として構造的な耐震補強対策および事前防災訓練から震後応急復旧・恒久復旧に至るさまざまな手段が検討されている。また最近では地震動のモニタリングや GIS を基礎にした地震防災情報管理システムなどの新しい防災技術が発展しつつある。

パイプラインの構造設計は、上述のように人為的要因および自然災害のいずれの外的要因からも管路の安全性を確保するため、一定の防止対策・復旧対策を前提とした安全設計が図られる。なかでも埋設管路の地震時被害が広範囲かつ同時的であり他のライフライン被害を誘発するなど典型的な都市型地震災害を引き起こすことから、パイプラインの耐震設計は構造設計における最も重要な設計分野として位置づけられる。

石油パイプライン技術基準³⁾を初めとする埋設管路の各種耐震設計基準・指針は、いずれも応答変位法に基づいて管内発生応力を評価し、その耐震安全性を照査している。しかしながら、1978 年宮城県沖地震を初め、ここ 20 年間に国内で発生したいくつかの地震で観察された埋設管路の被害は、応答変位法が前提としている地盤震動による超過管ひずみが管路破壊の原因と理解するよりも、地盤の永久変位、すなわち切盛土区間での過大な地盤相対変位や液状化地盤での側方流動による大規模な地盤変状によって、管路の塑性変形、座屈などを生じているものと考えの方が理解しやすい事例が多々報告⁴⁾されている。

高圧ガスパイプラインの耐震安全性・信頼性を向上させるためには、埋設管路の地震時における限界状態を正しく把握することが重要であり、そのためには大規模な地盤変状によって生じられる管路の有限変位および管材料の弾塑性挙動を忠実に把握できる解析システムが必要となる。

以下では、耐震安全性を検討するための解析システムとして当社が開発した埋設管路非線形変位挙動解析システム⁵⁾について、その概要と適用事例を紹介する。

3.1 埋設管路非線形変位挙動解析システム

鋼管が使用される幹線管路の地震時被害では、地盤震動による管路損傷例は少なく、むしろ地盤変状による管路の浮上、沈下および側方変位の形で多く現われる。このような現象は、従来の管路系弾性挙動解析の適用範囲を超えており、地盤変状により埋設管路に作用する強制変位とそれによる管路の弾塑性挙動を忠実に評価し、管路とそれに付帯する各種施設を含めた管路系の大変位挙動を解析するシステムの構築が必要となる。

解析対象となる埋設管路は、直管、異形管、伸縮継手、バルブ、人孔、建屋などからなる立体管路系を構成しており、埋設部の管路はそれを取り囲む周辺土の地盤剛性で支持されている。

管路構成要素の構造モデルは、梁要素とバネ要素からなり、梁要素は軸、曲げおよび捩じり剛性を持つ完全弾塑性体としてモデル化され、バネ要素は管継手および地盤バネをモデル化しておりいずれも非線形特性を有している。とくに、地盤バネは管軸方向、管軸直角水平方向、および鉛直上下各方向の4種類のバネを用い、それぞれにbi-linear特性を与えた。

立体管路系の中に存在する人孔、建屋などの施設は剛性要素としてモデル化し、剛性要素変位はその重心点に取付けられた変形・回転バネにより評価する。

さらに、断層変位、地盤変動に起因する地滑り、液状化による地盤側方流動などの地盤変位は、いずれも地盤バネを介して埋設管路に伝達される。

大変位挙動を含む立体管路系の変位挙動解析は、弾性剛性マトリックス K_E と幾何剛性マトリックス K_G を用いて構造系全体の断面力ベクトル P 、変位ベクトル U に関する次の関係式を解くことで、

$$(K_E + K_G) U = P \quad \dots\dots\dots (1)$$

系の変位場 U を求めることができる。

管路の材料非線形の取り扱い、宇佐美⁹⁾らの提案する降伏関数の概念を用いて以下のように行う。すなわち、曲げと軸力を受ける梁の部材断面内における弾塑性状態は、Fig. 2 に示すダイアグラムを用いて弾性状態、部分的塑性状態あるいは全断面塑性状態のいずれの状態にあるかを判定する。

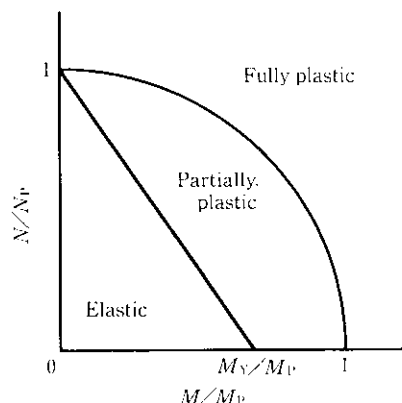


Fig. 2 Yield function

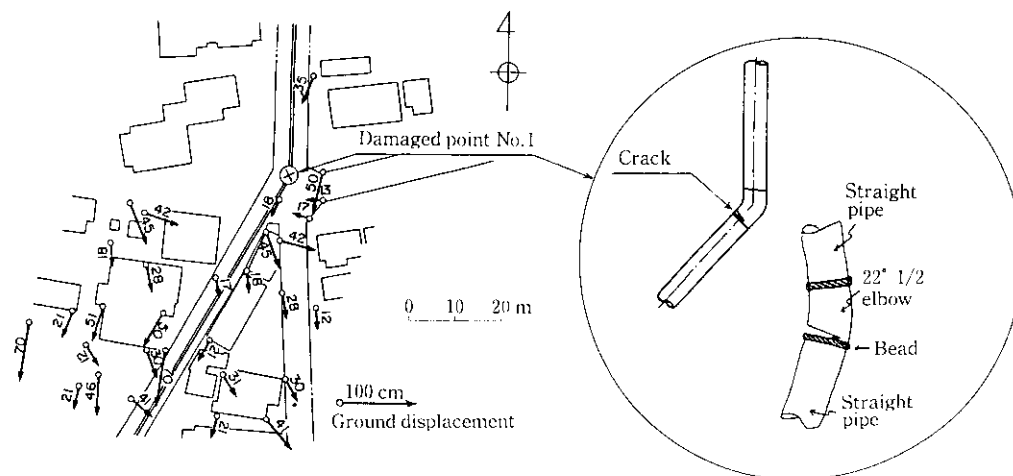


Fig. 3 Permanent ground displacements in the vicinity of the damaged gas pipe (Point No.1)
(Reprinted from M.Hamada and T.M.T'Rourke⁷⁾)

$$\left(\frac{N_x}{N_p}\right) + \sqrt{\left(\frac{M_y}{M_p}\right)^2 + \left(\frac{M_z}{M_p}\right)^2} = 1 \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\left(\frac{N_x}{N_p}\right)^{\beta_N} + \left(\sqrt{\left(\frac{M_y}{M_p}\right)^2 + \left(\frac{M_z}{M_p}\right)^2}\right)^{\beta_M} = 1 \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 N_x 、 N_p は軸力、降伏軸力、 M_y 、 M_z は曲げモーメント、 M_y 、 M_p は降伏および全塑性モーメント、 β_N 、 β_M はパラメータである。

3.2 地盤液状化による地変に対する管路挙動解析

Hamada, O'Rourke⁷⁾の液状化によるライフライン被害に関する研究報告によると、埋設管路の地震時被害の多くが液状化による地盤変位が原因であることを示している。Fig. 3は、管路周辺での液状化により発生した地盤永久変形の変位ベクトルと曲がり部での管破断の状況を示している。

パイプラインのルート計画段階では、対象地点での液状化危険度および液状化による地盤変位量に関する情報が必要となる。そのためには、当該地盤の飽和砂層の粒度分布、液状化危険地層の層厚、傾斜度、周辺地盤での液状化被害履歴、液状化危険度予測に関連する微地形情報などを収集して総合的にその危険度を判断する。

液状化地盤に埋設された管路の変位挙動を解析するには、液状化発生範囲、地盤永久変位量、液状化時の地盤バネ定数を求める必要がある。液状化地盤の水平方向永久変位量 δ あるいは傾斜地盤での側方流動量 Δ に関して、現在のところ簡易推定式として(4)式および(5)式が提案されている。

[浜田⁹⁾の算定式]

$$\delta = 0.75\sqrt{H} \cdot \sqrt[3]{\Theta} \quad \dots\dots\dots (4)$$

H : 液状化地盤層厚 (m)

Θ : 地表面勾配と液状化層下面勾配の最大値 (%)

[東畑⁹⁾の算定式]

$$u = \left[x - \frac{1}{2} \left\{ \beta - \sqrt{(\beta^2 - 4(\beta - L))} \right\} \right] \times \sin \left\{ \frac{\pi}{2} \cdot \frac{y - x \tan \theta}{\alpha (A + x \tan \theta)} \right\} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\tan \theta = (A - B)/L$$

$$\beta = L + 2L\alpha(A + x \tan \theta)/(\pi\delta)$$

α : 液状化前後の地盤沈下率

θ : 傾斜地盤の傾斜角度

δ : 地震後沈下量

A : 傾斜地盤下手表層厚

B : 傾斜地盤上手表層厚

L : 検討対象区間水平距離

x, y : 側方流動地盤内の位置座標

(原点は対象傾斜地盤最深点)

前者は、液状化地盤の実測データを基礎に、後者は理論的考察に基づいて誘導されたものであるが、いずれの式も一次元方向の液状化時地盤変位を与える。一方、パイプラインルートは平面的に広がっていることから、一般的には液状化変位の二次元変位場が必要になる。この二次元変位場を求める方法を以下に示す。一つの方法は、Fig. 3 に示すように解析対象区域内の複数箇所で地盤永久変位が観測されている場合は、対象地盤をメッシュ分割し、その各メッシュ端点の変位量を既知変位量から内挿する手順を繰り返すことで、全体の変位場を求める方法である。一方、観測データが存在しないが地下水位、土層データが与えられている場合は、メッシュ分割した対象地盤に対し式(5)を適用することで全体的な変位場を求める方法である。この二次元変位場から算定される管路沿いの相対変位量を強制変位外力として与えることで、液状化地盤永久変位による二次元変位場に対する管路挙動解析を実行することができる。

3.3 解析事例

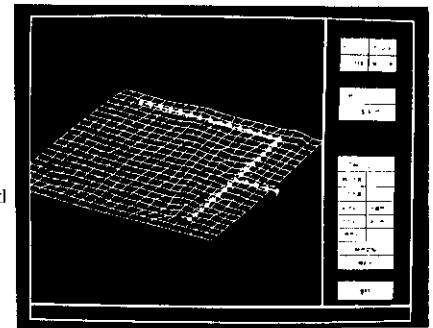
液状化により発生した地盤永久変位に対する埋設管路の変位挙動を考察するため、複数地点で地盤永久変位ベクトルが与えられている場合を3.2の方法にしたがって解析した。

Photo 1 は、それぞれ解析対象の液状化地盤の二次元変位場、当該変位場に対する埋設管路系曲管部の応力図そして管路軸に沿った応力分布図である。同写真(b)で最大応力が曲管部に発生しているが、このことは液状化地盤での管路破壊がFig. 3のように曲管部で多く現われる現象を説明するのに役立つことになろう。

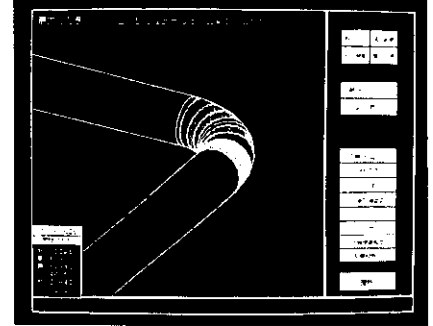
4 結論

本報告は、高圧ガスパイプラインの設計技術に関する当社の開発概況を構造設計部門に重点を置いて述べた。得られた成果は以下のとおりである。

(a) Permanent ground displacements shown in the deformed meshes and the buried pipeline model configuration



(b) Stress distribution of bend portion in the pipeline system



(c) Stress distribution along the pipeline

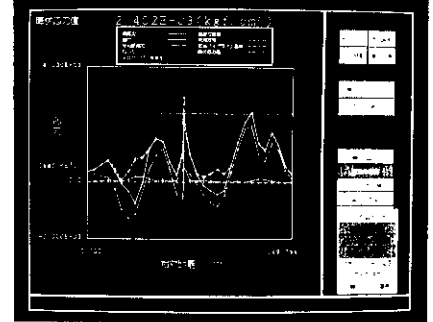


Photo 1 Numerical example of structural behaviors and stress distributions of the buried pipeline system to be calculated by the computer code developed in this study

(1) 管路の弾塑性挙動および大変形挙動を同時に解析できる埋設管路非線形挙動解析システムを開発した。

(2) 開発したシステムは、液状化地盤における二次元変位場に対する埋設管路非線形挙動の解析に適用できる。

なお、埋設管路非線形挙動解析システムの構造解析システムは、株式会社富士総合研究所との共同研究により開発したものである。

参考文献

- 1) 岩見由紀夫, 松尾好純, 小池 武, 今井俊雄: 「統合型地図情報管理システム『マップチューン』の開発」, 川崎製鉄技報, 24 (1992) 1, 13-19
- 2) 広域天然ガスパイプライン研究会: 「国土縦貫天然ガスパイプライン構想の実現に向けて(上)」, 鉄鋼界, 42 (1992), 49-56
- 3) 日本道路協会: 「石油パイプラインの地震対策に関する調査報告書」, 日本道路協会, (1974)
- 4) 日本ガス協会: 「宮城県沖地震と都市ガス」, 日本ガス協会, (1979)
- 5) T. Koike, T. Imai and T. Kaneko: "Large deformation analysis of buried pipelines," 10 WCEE, (Spain), (1992), 5443-5448
- 6) 宇佐美勉, 柴田輝昭: 「断面力表示構成則を用いた鋼骨組構造物の弾

- 塑性有限変位解析」, 土木学会論文集, (1990), 416/1-13, 339-348
- 7) M. Hamada and T. M. O' Rourke: "Case studies of liquefaction and lifeline performance during past earthquakes, Volume 1 Japanese case studies," Technical Report NCEER-92-0001, (1992)
- 8) 浜田政則, 安田 進, 磯山龍二, 恵本克利: 「液状化による地盤の永久変位の測定と考察」, 土木学会論文集, (1986), 376/III-6, 211-220
- 9) 東畑郁夫, 山田和彦: 「地盤の液状化による永久変形量の簡易予測式」, 土木学会第44回年次学術講演会, (1989), 632-633