

利根川横断推進工事における耐震性評価について

新海 元¹・下河啓介¹・中根宏行¹
出羽克之²・木全宏之²・鎌倉友之²・田中孝典³

¹正会員 工修 東京ガス株式会社 設備技術部 (〒105-8527 東京都港区海岸一丁目5-20)

²正会員 工修 清水建設株式会社 土木本部設計第1部 (〒105-8007 東京都港区芝浦一丁目2-3 シェパルス館)

³正会員 工修 同上 土木東京支店技術部 (同上)

東京ガス(株)では、推進工法による利根川横断のガス導管敷設工事を計画しており、管路の耐震安全性について事前検討を実施した。一般に、推進工法による管路は、鞘管である推進管が数mごとに継手を有する可撓性構造となっており、耐震安全性が高いとの判断から、詳細な検討が行われていないのが現状である。筆者らは、耐震設計基準に基づく簡易解析を実施し、特にレベル2地震動に対する推進管の継手抜出量、継手曲げ角度ならびに管体圧縮応力度について照査した。また、当該地盤は典型的な不整形地盤であり、伝播性の地震波動を対象とした簡易解析のみによる評価に加えて、鉛直上昇波を入力地震動とした動的応答解析を行った。

Key Words : 推進工法, 推進管, ガス導管, 簡易解析, 動的応答解析, レベル2地震動, 不整形地盤

1. はじめに

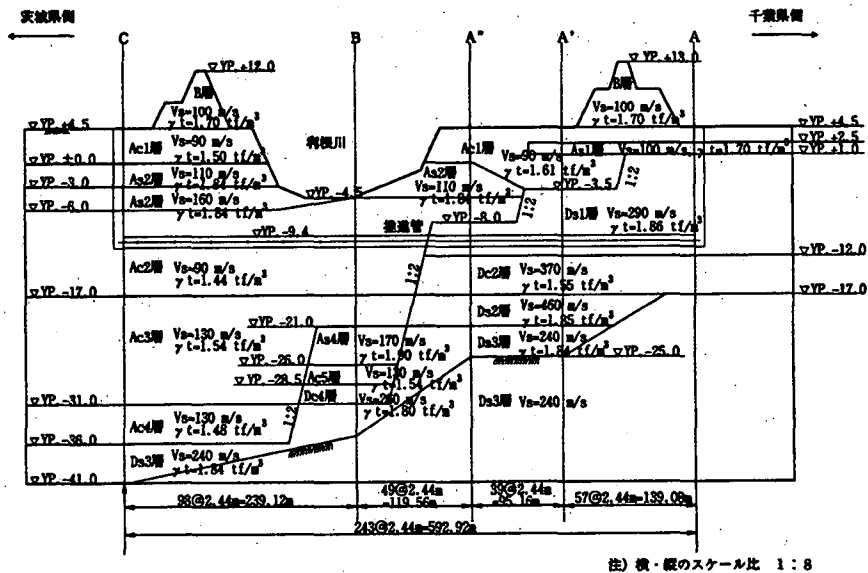
東京ガス(株)では、ガス輸送導管整備事業の一環として、推進工法による利根川横断のガス輸送導管敷設工事を計画している。一般に、推進工法による管路は、鞘管である推進管が数mごとに継手を有する可撓性構造となっており、本管には地震力が伝達せず、耐震安全性が高いとの判断から、詳細な検討が行われていないのが現状である。本報は、耐震設計基準に基づく簡易解析ならびに動的応答解析を実施し、当該推進管の耐震安全性につ

いて検討した結果を示したものである。特にレベル2地震動を対象とし、巨大地震時の推進管の耐震安全性について照査した。

2. 管路および地盤の概要

(1) 管路

利根川横断のガス導管は、千葉県と茨城県を結ぶ延長約600mの推進工法による管路として計画されている(図-1参照)。管路の標準構造と仕様を図-2に示すが、



注) 横・縦のスケール比 1 : 8

図-1 管路敷設地盤

推進管は内径φ1100であり、1函当たりの長さは2.44m(有効長2.43m、クッション材の厚さ10mm)である。

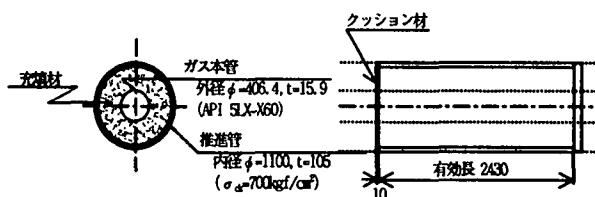


図-2 管路の標準構造と仕様

(2) 地盤

当該地盤は、図-1に示すように、千葉県側がN値10~50程度の洪積層、茨城県側がN値0~20程度の沖積層の土層構成となっており、推進管の延長中央付近で沖積層と洪積層に地層が大きく変化してことが特徴的である。また、地震基盤として想定されるせん断弾性波速度 $V_s=300\text{m/s}$ 以上の D_{33} 層は大きく傾斜しており、典型的な不整形地盤となっている。

3. 簡易解析による耐震性検討

(1) 適用基準

地中長手構造物を対象とした「ガス導管耐震設計指針」¹⁾、「水道施設耐震工法指針・解説」²⁾、「共同溝設計指針」³⁾ならびに「下水道施設の耐震対策指針と解説」⁴⁾の4つの耐震設計基準を適用し、簡易解析を実施して、推進管の耐震安全性を検討した。本検討はレベル2地震動を対象として実施したが、「ガス導管耐震設計指針」および「共同溝設計指針」には、レベル2地震動に対する規定がなく、適宜「水道施設耐震工法指針・解説」の規定を準用することとした。なお、各耐震設計基準とも、地震波動としては管軸方向に沿った伝播性の波動(表面波)が想定されている。

(2) 検討結果

図-1に示したA, B, Cの3断面を対象とし、地盤を水平成層として、耐震設計基準に基づく推進管の耐震安全性検討を実施した。検討結果を表-1に示すが、推進管の継手抜出力、継手曲げ角度および管体圧縮応力度は、許容値に対してそれぞれ最大13%、2%および26%程度の値であり、十分余裕のある結果を与えている。

表-1 耐震設計基準に基づく簡易解析結果

推進管	ガス導管耐震設計指針	水道施設耐震工法指針・解説	共同溝設計指針	下水道施設の耐震対策指針と解説	許容値
継手抜出力 θ (cm)	0.16 ~ 0.19	0.13 ~ 0.79	0.16 ~ 0.79	0.14 ~ 0.67	6.0 ^(注1)
継手曲げ角度 θ_s (°)	0.001 ~ 0.009	0.009 ~ 0.031	0.004 ~ 0.012	0.011 ~ 0.044	2.6 ^(注2)
管体圧縮応力度 σ_c (kgf/cm²)	1 ~ 5	2 ~ 4	33 ~ 179	-	700 ^(注3)

注1)最大抜出力の1/2に設定。注2)許容抜出力を角度で表示。注3)設計基準強度 $\sigma_s=700\text{kgf/cm}^2$ 。

4. 動的応答解析による耐震性検討

(1) 解析概要

当該地盤は典型的な不整形地盤であり、伝播性の地震波動を対象とした耐震設計基準のみによる管路の耐震安全性評価では不十分であると考えられる。このため、鉛直上昇波を入力地震動とした動的応答解析を実施し、推進管の耐震安全性について検討した。

図-3に動的応答解析による耐震性検討フローを示すが、応答変位法を前提にして、最初に推進管敷設位置での自然地盤の地震時応答変位を算定した。次に弾性床上の梁としてモデル化した管路に相互作用地盤バネを介して地盤の応答変位を入力し、骨組解析を実施した。そして、推進管の継手抜出力、継手曲げ角度および管体圧縮応力度について照査した。

自然地盤の地震時応答変位について、管軸方向の変位は2次元FEM解析により算定した。一方、管軸直角方向

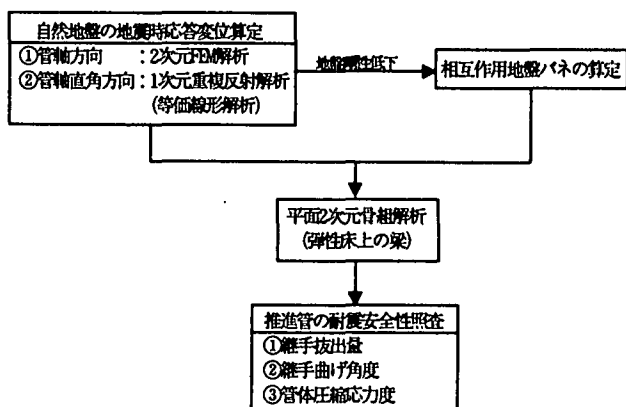


図-3 動的応答解析による耐震性検討フロー

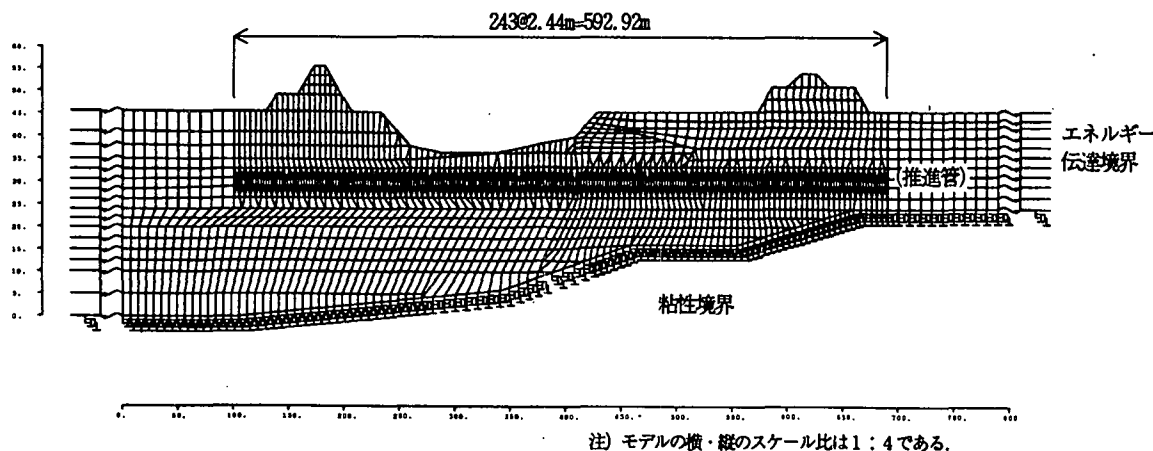


図-4 2次元FEM解析モデル

については、図-1に示したA, A', A'', B, Cの5断面で1次元重複反射解析を行い、各断面間は線形補間によって自然地盤の地震時応答変位を算定した。両方向の解析とも等価線形解析として実施し、地盤の非線形性を考慮した。解析プログラムには、それぞれ「Super FLUSH」⁵⁾、「SHAKE」⁶⁾を用いた。相互作用地盤バネに関しても、地盤の非線形性を考慮し、せん断ひずみの増加による剛性低下を考慮して設定した。骨組解析は、両方向の解析で得られた自然地盤の地震時応答変位を用い、平面2次元解析として実施した。

(2) 解析モデル

管軸方向について、自然地盤の地震時応答変位算定のための2次元FEM解析は、平面ひずみ状態を仮定して実施した。解析モデルを図-4に示すが、せん断弾性波速度 $V_s=300\text{m/s}$ 以上の D_{33} 層を地震基盤とし、 D_{33} 層以浅をモデル化の対象とした。推進管敷設地盤全長についてモデル化し、敷設位置では推進管1函当たりの管軸方向長さ2.44mピッチで要素分割を行った。底面は粘性境界、側方はエネルギー伝達境界を設定した。なお、管軸直角方向の1次元重複反射解析モデルについては、掲載を省略する。

平面2次元の骨組解析は、継手の力学特性を考慮して実施した。解析モデルを図-5に示すが、隣接する推進管の間に引張時には剛性ゼロ、圧縮時には剛性無限大の継手バネ要素を設けて骨組解析を行った。推進管本体は線形の梁要素としてモデル化した。立坑はモデル化の対象から除外することとした。

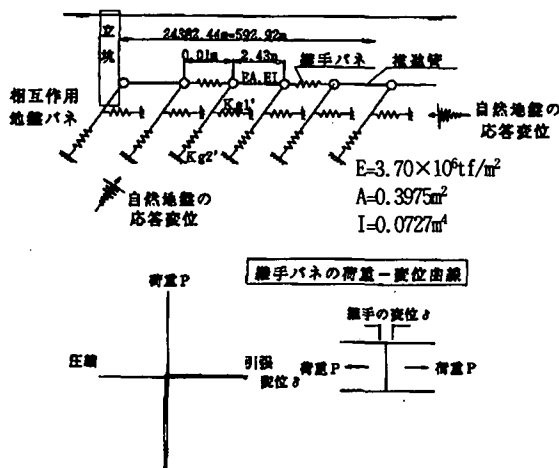


図-5 平面2次元骨組解析モデル

(3) 解析定数

地盤の解析定数は、図-1に示したとおりである。剛性低下($G/G_0 \sim \gamma$)曲線ならびに減衰増加($h \sim \gamma$)曲線については、掲載を省略する。相互作用地盤バネ K_{g1} , K_{g2} については、次式を用いて設定した。

$$\text{管軸方向} : K_{g1} = \alpha \cdot 1.5 \cdot G_0 = \alpha \cdot 1.5 \cdot \gamma \cdot g \cdot V_s^2 \quad (1)$$

$$\text{管軸直角方向} : K_{g2} = \alpha \cdot 3.0 \cdot G_0 = \alpha \cdot 3.0 \cdot \gamma \cdot g \cdot V_s^2 \quad (2)$$

ここに、 G_0 : 推進管敷設地盤の初期せん断弾性係数、 α : 剛性低下率、 γ_t : 単位体積重量、 V_s : せん断弾性波速度、 g : 重力加速度である。

一方、推進管については、内部の充填材ならびにガス本管の剛性を無視することとし、推進管単体として剛性評価を行った。また、応答変位法を前提としており、推

進管の質量は無視することとした。推進管の解析定数は図-5に示したとおりである。

(4) 入力地震波

レベル2地震動を対象として解析を実施するが、入力地震波には、1995年の兵庫県南部地震時にポートアイランドで観測された基盤波(PI-79m, NS成分)を用い、入射波(2E)に分離した波形を用いることとした。図-6に入力地震波形を示す。

○1995年・兵庫県南部地震:ポートアイランド基盤波(PI-79 NS BASE)

○入射波(2E), $A_{max}=570\text{gal}$

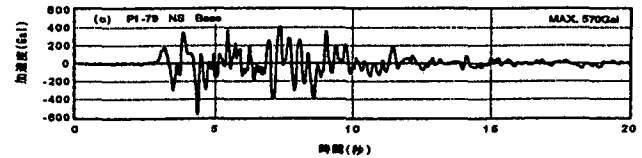


図-6 入力地震波形

(5) 解析結果

図-7に自然地盤と推進管の最大(絶対)応答変位を重ね書きした結果を示す。推進管の最大応答変位は自然地盤の変位と同程度の値となっており、推進管の地震時挙動は地盤の挙動に支配されていることがわかる。また、推進管の最大応答変位は、洪積層内に比べて沖積層内で大きく、管路延長中央付近の沖積層から洪積層への地層変化部を境にして、変位量が大きく変化していることがわかる。

図-8に推進管の最大継手抜出量、最大継手曲げ角度および最大管体圧縮応力度を示すが、許容値に対し、それぞれ最大17%, 8%および90%程度の値となっている。この値は、簡易解析結果に比べて大きく、特に圧縮応力度については、許容値以内であるが、かなり大きめの値となっている。また、最大応答変位と同様、沖積層から洪積層への地層変化部で抜出量や圧縮応力度が大きく変化していることがわかる。

5. まとめ

工事計画中の利根川横断推進管について、耐震設計基準に基づく簡易解析ならびに動的応答解析を実施し、レベル2地震動に対する耐震安全性について検討した。得られた知見を列挙すると、以下ようになる。

①簡易解析結果に比して、動的応答解析結果の方が応答値は大きい。想定する入力地震動や地盤によって汎用的な議論はできないが、当該地盤のような典型的な不整形地盤では、動的解析による管路の耐震安全性評価の必要性が確認できた。

②推進管敷設地盤は沖積層から洪積層へ変化しているが、この地層変化部を境にして、動的応答特性が大きく変化する。

③自然地盤と推進管の変位は同程度の値となっており、推進管の地震時挙動は地盤の挙動に支配されている。

④推進管にはかなり大きな圧縮応力度が発生しているが、レベル2地震時には管体と地盤との間にすべりが生じ、低減されるものと考えられる。本解析では、管体と地盤との間のすべりは考慮しておらず、安全側の評価を

与えている。

なお、ガス本管についても同様の検討を実施した。安全側の配慮から、推進管および充填材は無視し、直埋設の連続管としてモデル化した。ガス本管の地震時発生ひずみは、レベル2地震時においても、「ガス導管耐震設計指針」で規定されている許容ひずみ1.0%を大幅に下回った。

参考文献

- 1) (社)日本ガス協会：ガス導管耐震設計指針，昭和57年3月。
- 2) (社)日本水道協会：水道施設耐震工法指針・解説，1997年。

- 3) (社)日本道路協会：共同溝設計指針，昭和61年3月。
- 4) (社)日本下水道協会：下水道施設の耐震対策指針と解説，1997年。
- 5) J. Lysmer, T. Udaka, C. F. Tsai and H. B. Seed : FLUSH, A Computer Program for Approximate 3-D Analysis of Soil-Structure Interaction Problems, Report No. EERC 75-30, University of California, Berkeley, Nov., 1975.
- 6) P. B. Schnabel, J. Lysmer and H. B. Seed : SHAKE, A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites, Report No. EERC 72-12, University of California, Berkeley, Dec., 1972.

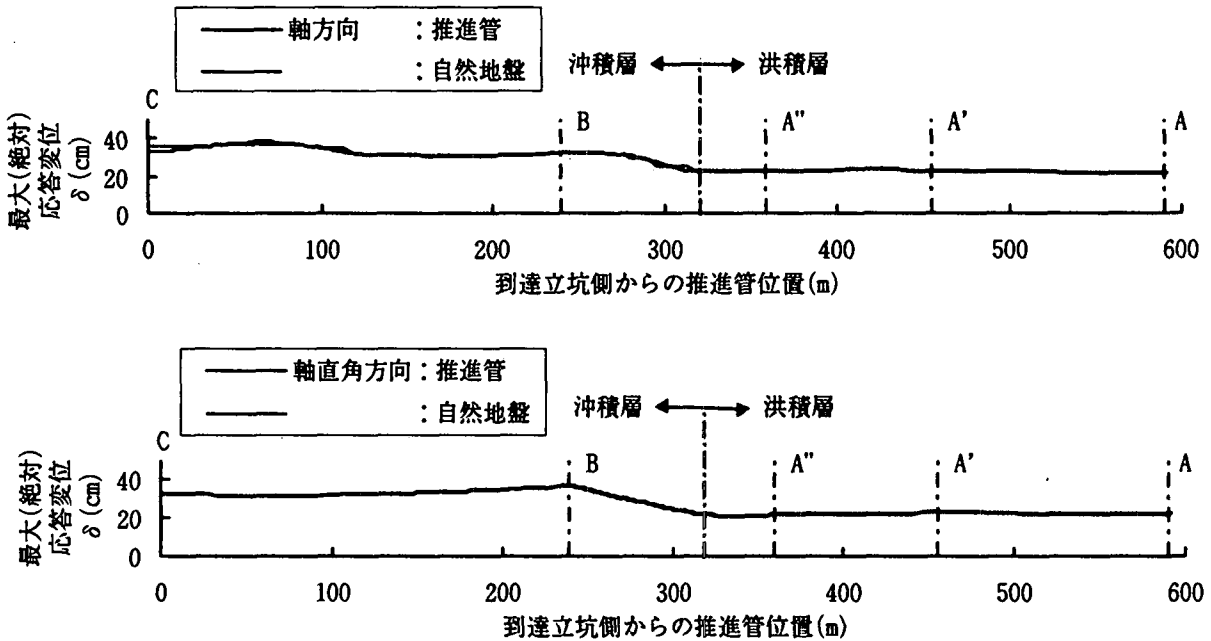


図-7 自然地盤と推進管の最大(絶対)応答変位

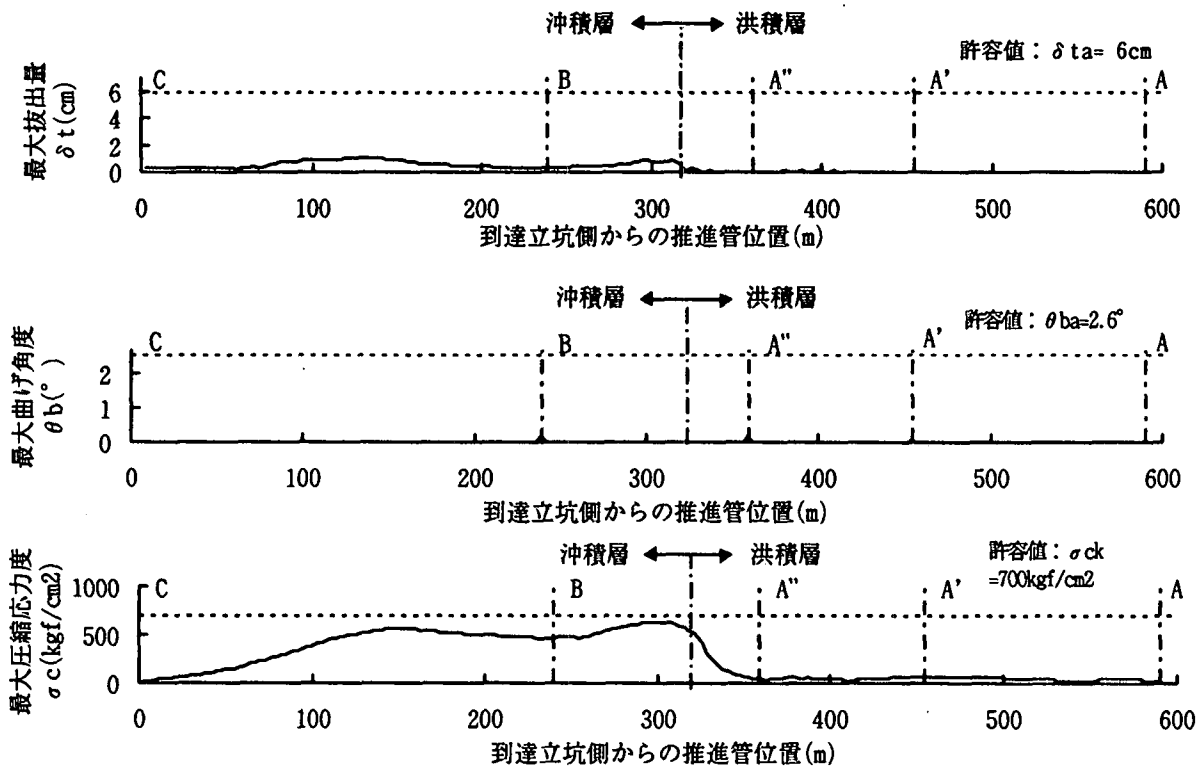


図-8 推進管の最大継手拔出量，最大継手曲げ角度，最大継手圧縮応力度