

地震時埋設管被害に及ぼす 不整形地盤の影響について

清野 純史¹・井上 佳樹²・清水 謙司³

¹京都大学工学研究科教授 (〒606-0944京都市左京区松ヶ崎御所ノ内町4-18)

E-mail:kiyono@quake.kuciv.kyoto-u.ac.jp

²京都大学工学研究科

(〒615-0883 京都市右京区西京極南大入町66エスぺランスナカイ107号室)

E-mail:inoue.yosiki@t22005.mbox.media.kyoto-u.ac.jp

³日本ガス協会 (〒105-0001東京都港区虎ノ門1-15-12)

E-mail:shimizu.kenji@gas.or.jp

本研究では2007年7月16日の新潟県中越沖地震で発生した新潟県柏崎市での埋設管の長柱座屈による被害と柏崎市の不整形地盤の関係を地盤震動解析により考察する。地震時において不整形地盤によって発生する地盤のひずみが埋設管に影響を与える評価として考えられる。本研究では地震波をSH波入射、P-SV波入射に分けて考え、それぞれ応答倍率、地盤ひずみを求め、地盤の特性を明らかにする。また新潟県中越沖地震で実際に観測された加速度時刻歴を入力波として用いることにより、埋設管が存在する位置における地盤の挙動を検討した。地盤のひずみの分布を時間ごとに表示することで、ひずみがどのように埋設管に影響を及ぼすのかについての考察も行なった。

Key Words :irregular interface, axial strain, SH wave, P and SV wave

1. 研究の背景と目的

2007年7月16日に新潟県中越沖地震が起こった。マグニチュードは6.8、最大震度は6強であり、ガス導管の長柱座屈による被害が15箇所¹⁾発生した。ガス導管の被害状況を写真1に示す。

本研究ではガス導管の被害が不整形地盤の影響によるものであるとの仮定の下に、地震時において埋設管が不整形地盤によってどのように影響するのかを、新潟県柏崎市の地盤を対象とした地盤応答解析によって明らかにすることを目的とする。



写真1 ガス導管の被害状況

2. 地盤解析の解析モデルと解析手法

(1) 解析に用いるモデル

解析の対象に柏崎市を選んだのは、柏崎市は新潟県中越沖地震で全体の死者 15 名、重軽傷者 2,345 名に対して死者 14 名、重軽傷者 1,664 名(新潟県庁の調査より)と最も被害を受けた地域であり、またガス導管の被害も全体の 27 箇所に対して 19 箇所でもっとも多い地域であるからである。新潟県地盤図²⁾より抜粋した断面線位置図を図1に示す。



図1 断面線位置図

◀ 16-16' 断面 (柏崎東西) ▶

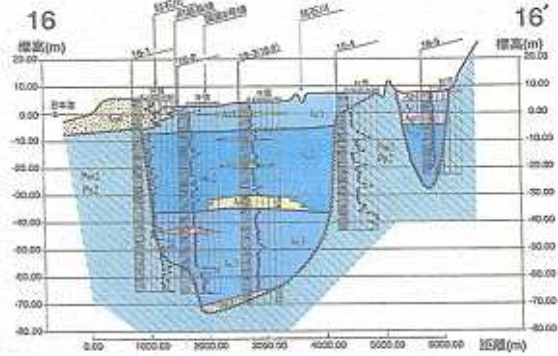


図 2 16-16'断面図

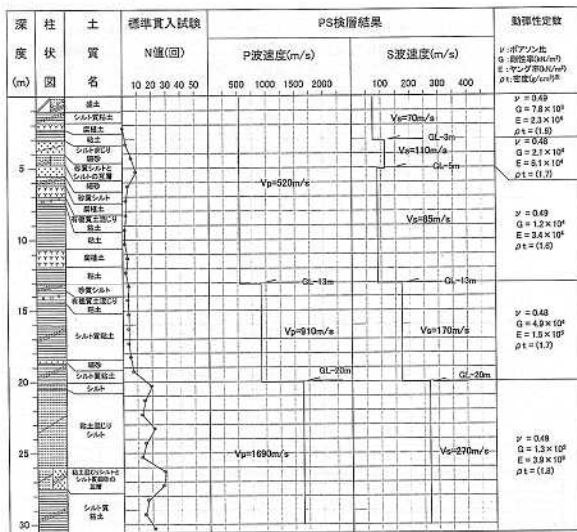


図 3.2.7 PS 換層結果 (総合柱状図)

図 3 半田地区でのボーリング調査及び PS 換層結果の総合柱状図

図 1 の断面線位置図の 16 - 16'断面を図 2 に示す。この断面図における地盤は大きく沖積層と基盤層の二つに分けられる。次に半田地区でのボーリング及び PS 換層結果の総合柱状図を図 3 に示す。柱状図における P 波速度及び S 波速度は堆積層の粘性土層 Ac1,Ac2,Ac3 でそれぞれ計算されているが、本研究の解析では、堆積層での P 波速度及び S 波速度は層厚による重みづけを行ない、それぞれ 657m/s、115m/s とした。

以上より図 2、図 3 をもとに作成した地盤解析モデルを図 4 に示す。

モデル断面の長さは 5,120m、不整形境界部分は正弦曲線の組み合わせで表現した。最深部は 1,900m の地点で -72m とした。初期設定としては 2 層地盤 (堆積層とその下半無限地盤) とし、それぞれの物性値として P 波速度、S 波速度、密度が、堆積層で 657m/s、115m/s、1.7ton/m³、基盤層で 1,690m/s、270m/s、1.8ton/m³とした。

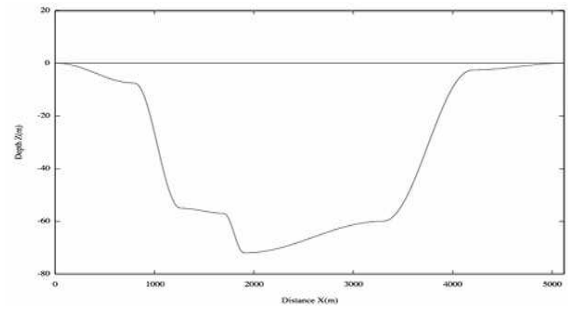


図 4 解析モデル

(2) 解析手法

本研究での地盤解析には Aki and Larner 法 (以下 AL 法) を用いる。

AL 法とは、対象となる地盤の水平方向の不規則構造に周期性を持たせるによって Fourier 級数展開の形に置き換えることができ、これを不規則境界面の変位、応力の連続条件に適合させるように近似的に解を評価する方法である。

平面 SH 波が入射する問題を考える。堆積層と基盤で構成された不整形境界を持つ 2 層地盤を考える。ここで、第 1 層 (堆積層) の変位、および第 2 層 (基盤) の変位は次式で表され、 k 、 v はそれぞれ x 、 z 方向の波数 A_1 、 B_1 、 A_2 は求めるべき散乱係数である。

$$u_1(x, z) = \int_{-\infty}^{\infty} \{ A_1(k) \exp(i v_1 z) + B_1(k) \exp(-i v_1 z) \exp(ikx) \} dk \quad (1)$$

$$u_2(x, z) = \exp\{i(k_0 x - v_0 z)\} + \int_{-\infty}^{\infty} A_2(k) \exp\{i(kx + v_2 z)\} dk \quad (2)$$

x 方向の周期性の仮定、境界面の変位、応力の連続条件より散乱係数が求められ、それらを (1)、(2) 式に代入することにより地表面における応答倍率、基盤における応答倍率がそれぞれ求められる。

次に P-SV 波問題について、 $z=h(x)$ で表示されるような 2 次元の不整形地盤を考える。まず P 波について考える。入射する P 波は x - z 面内を伝播するとする。地表面震動は入射波と反射波で表される。wave potential ϕ 、 ψ を用いて表示すると、

$$\phi(x, z, k) = A_1^0(k_0) \exp\{i(k_0 x - v_0 z)\} + \int_{-\infty}^{\infty} A_1(k) \exp\{i(kx + v_1 z)\} dk \quad (3)$$

$$\psi(x, z, k) = \int_{-\infty}^{\infty} \{ A_2(k) \exp\{i(kx + v_2 z)\} \} dk \quad (4)$$

ここで両式共に $\exp(-i\omega t)$ が省略されている。 x および z 方向の変位 U_x 、 U_z は

$$U_x = \frac{\partial \phi}{\partial x} - \frac{\partial \psi}{\partial z} \quad U_z = \frac{\partial \phi}{\partial z} + \frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (5)$$

SH 波問題と同様にして散乱係数を求め、(3)、(4)、(5) 式より地表面における応答倍率が求められる。

3. 解析結果

(1) SH波解析

a) 応答倍率

入射波は振幅 1m の単純な正弦波とし、鉛直入射するものとする。入射 SH 波の周波数 0.1Hz、0.2Hz、0.5Hz、0.8Hz、1.0Hz、2.0Hz、3.0Hz としてそれぞれ応答倍率を算出した。その結果を図5に示す。

図5において、低周波では中央、すなわち堆積層が厚い地点で大きい値となり、周波数が大きくなるにつれて応答倍率は大きくなっていき、高周波になるにつれて応答倍率は両端で大きくなることがわかった。

次に 500m、1,000m、1,500m、1,800m、3,000m、3,800m 地点における周波数応答を図6に示す。

図6では、500m 地点では堆積層が薄いので、高周波になるにつれて応答倍率が大きくなっていることがわかる。1,000m 地点と 3,800m 地点ではほぼ同じ傾向を示しており、周波数が 1.1Hz 付近で最も大きくなっている。残りの 1,500m 地点、1,800m 地点、3,000m 地点でもほぼ同じ傾向を示しており、周波数 0.5Hz 付近で最も大きくなっている。また、各地点における卓越周波数は堆積層が深くなるにつれて小さくなっていることがわかる。

b) 地盤のせん断ひずみ

各周波数について深さ 2m における地盤のせん断ひずみ γ_{xy} を求めた。その結果を図7に示す。

図7より、入射波の周波数が大きくなるにつれてひずみは大きくなっており、また境界面の変化が大きいすなわち勾配が大きい地点でひずみが大きくなっていることがわかる。

(2) P-SV波解析

a) 応答倍率

P-SV波解析での応答倍率は、P波入射に対して地表面におけるx軸方向の変位応答倍率 U_x およびz軸方向の変位応答倍率 U_z 、SV波入射に対して地表面におけるx軸方向の変位応答倍率 U_x およびz軸方向の変位応答倍率 U_z を求めた。その結果を図8に示す。

図8(a)のP波入射時の U_x は成層構造ではどの地点においても0になるが、本解析のモデルは不整形であるため、不整形境界面の影響を受けてx軸方向にも小さいながらも応答が見られる。ひずみは境界面の変化が大きい地点（境界面の勾配が大きいところ）で応答が大きいことがわかる。図8(b)の U_z は0~1,000m、4,000m~5,120mの堆積層が浅い地点ではどの周波数においてもほぼ2となっており、1,000m~4,000mの堆積層が深い地点では、入射波の周波数が0.1Hz、0.2Hzのときはほぼ2であり、0.5Hz、0.8Hz、1.0Hzになると周波数が大きくなるごとに少しずつ応答は大きくなっていき、2.0Hz、3.0Hzになると応答はかなり大きくなっている。

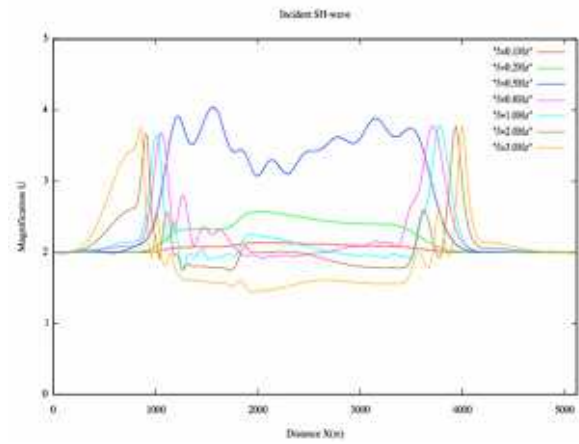


図5 各周波数のSH波入射による地表面の応答倍率

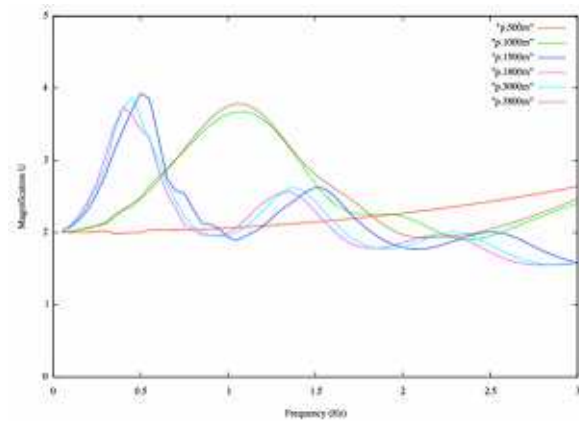


図6 当該地点の周波数応答(SH波入射)

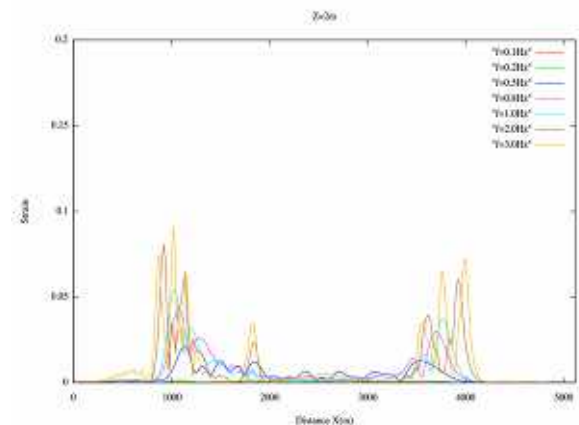
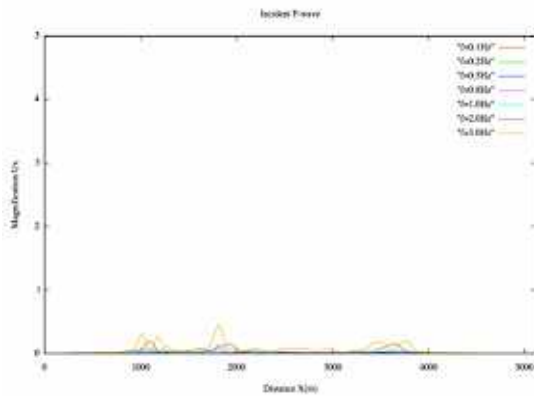
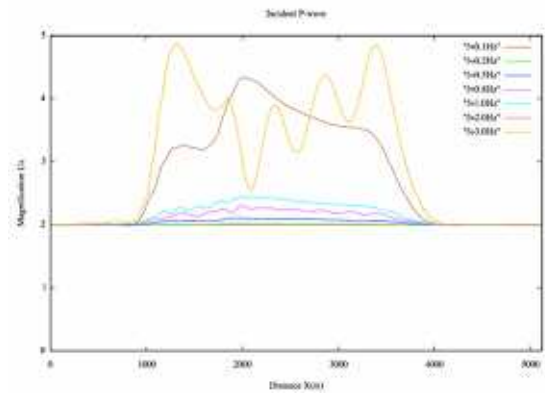


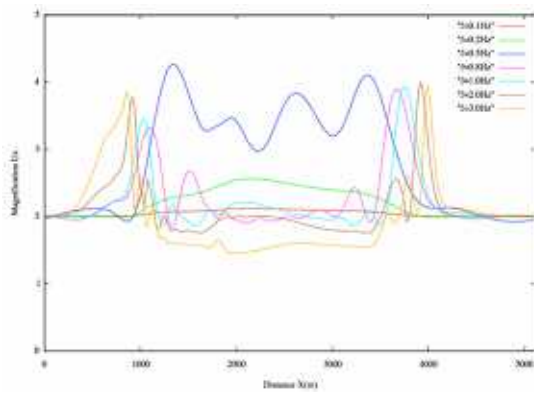
図7 Z=2mにおける地盤のせん断ひずみ γ_{xy}



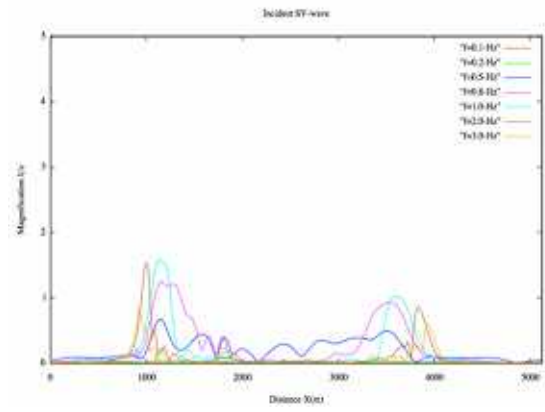
(a) 応答倍率 U_x (P波入射)



(b) 応答倍率 U_z (P波入射)



(c) 応答倍率 U_x (SV波入射)



(d) 応答倍率 U_z (SV波入射)

図8 P-SV波入射に対する応答倍率

図8(c)のSV波入射時の U_x はSH波入射時の応答倍率 U_y とほとんど同じ結果となった。

図8(d)のSV波入射時の U_z も成層構造ではどの地点においても0になるが、不整形境界の影響を受けて応答が発生している。特に入射波の周波数が0.8Hz、1.0Hzのとき大きく、P波入射時の応答倍率 U_x と同様に境界面の変化が大きい地点で応答が大きいことがわかった。

b) 地盤の軸ひずみ

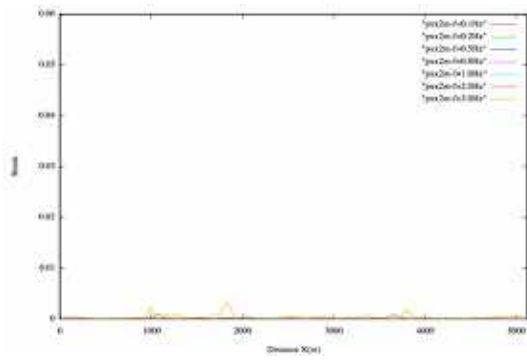
P-SV波解析ではP波入射時の深さ2mにおける軸ひずみ ε_{xx} および ε_{zz} 、S波入射時の深さ2mにおける軸ひずみ ε_{xx} および ε_{zz} を求めた。その結果をそれぞれ図9(a)～(d)に示す。

図9(a)はP波入射時のx方向のひずみであるので ε_{xx} は当然小さいが、境界面の変化の大きい地点でひずみが発生していることがわかる。

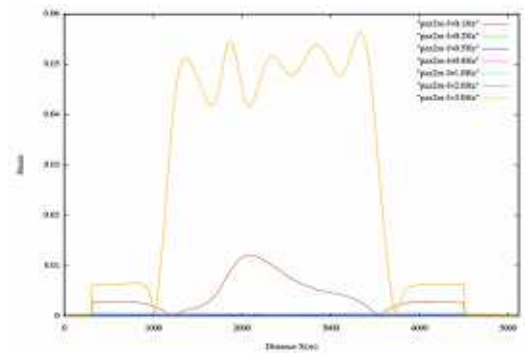
図9(b)はP波入射時の軸ひずみ ε_{zz} であり、入射波の周波数が小さいとき(0.1、0.2、0.5、0.8、1.0Hz)ひずみはどの地点でも小さいが、周波数が2.0Hz、3.0Hzと大きくなるとひずみは大きくなっていることがわかる。

図9(c)は深さ2mにおけるSV波入射時の軸ひずみ ε_{xx} であり、3.0Hz、2.0Hzなどの短周期ではひずみは両端で大きくなっていて、また0.1Hz、0.2Hz、0.5Hzなどの長周期では平野中心部でひずみは大きくなっている。

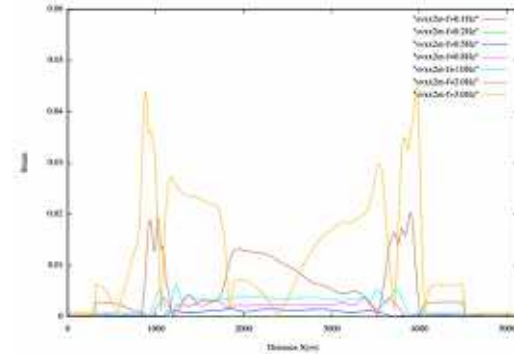
図9(d)は深さ2mにおけるSV波入射時の軸ひずみ ε_{zz} であり、SV波入射時の軸ひずみ ε_{xx} に比べ小さく、深くなるにつれてひずみは大きくなっている。また境界面の勾配の大きい地点でひずみは大きいことがわかる。



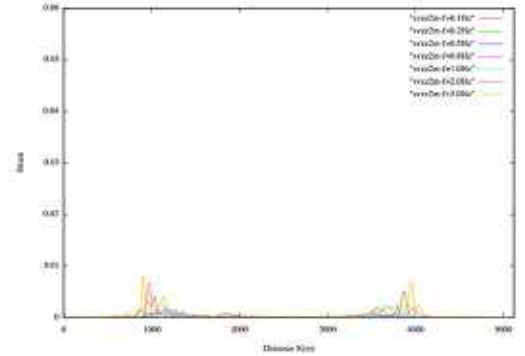
(a) 深さ 2m における軸ひずみ ϵ_{xx} (P 波入射)



(b) 深さ 2m における軸ひずみ ϵ_{zz} (P 波入射)

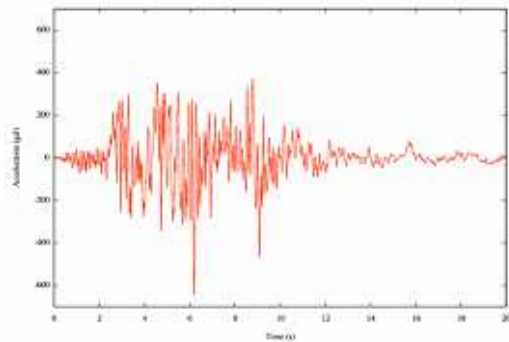


(c) 深さ 2m における軸ひずみ ϵ_{xx} (SV 波入射)

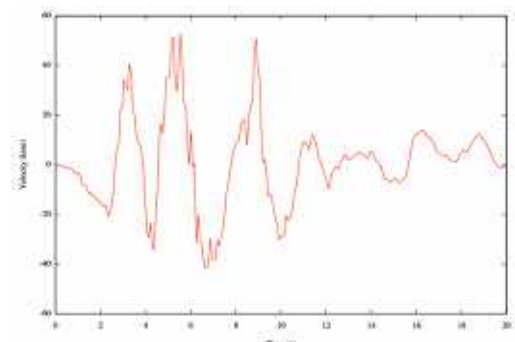


(d) 深さ 2m における軸ひずみ ϵ_{zz} (SV 波入射)

図9 P-SV波入射に対する地盤の軸ひずみ



(a) 加速度時波形



(b) 速度波形

図10 実観測波時刻歴

4. 地盤ひずみと埋設管被害

これまでの解析で、振幅 1 の正弦波とした入射波 (P 波解析では振幅 1m とした進行方向に振動する波) に対する地表面における応答倍率、深さ 2m における地盤のひずみを求めた。

実際にガス導管などの埋設管は地下 1、2 m にあるのが一般的で、座屈や溶接部の不良による被害は埋設管周辺の地盤のひずみを求めることで明らかになる。今回は埋設管が地下 2m にあるものと想定して、地下 2m における x 方向のひずみの分

布を求めていく。また実際の被害との関係を求めるために入力波は実観測波を用いることにする。

図 10(a)は新潟県中越沖地震で柏崎刈羽原子力発電所の地下 31.9m で観測された加速度時刻歴の 20 秒間をとりだしたもので、最大加速度は 647(gal) である。この加速度時刻歴を積分して求めた速度時刻歴を図 10(b)に示す。最大速度は 52.8(kine) である。地盤のひずみ ϵ_{xx} は x 方向の変位を x で偏微分したものであるから、

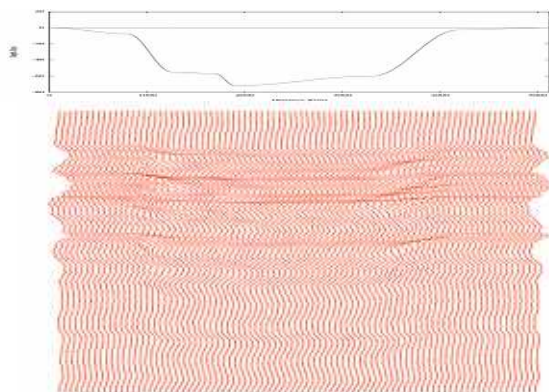


図 11 実観測波速度時刻歴入力による地下 2m における速度波形

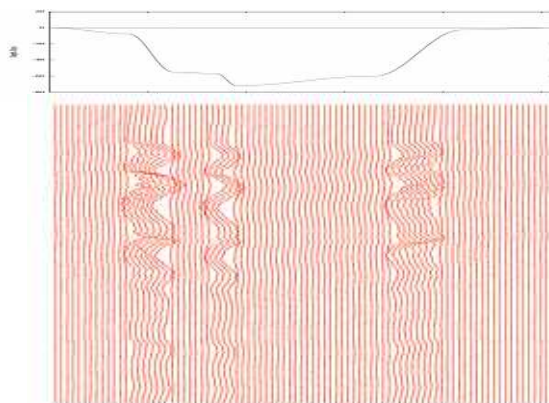


図 12 実観測波入力による地下 2m におけるひずみ波形

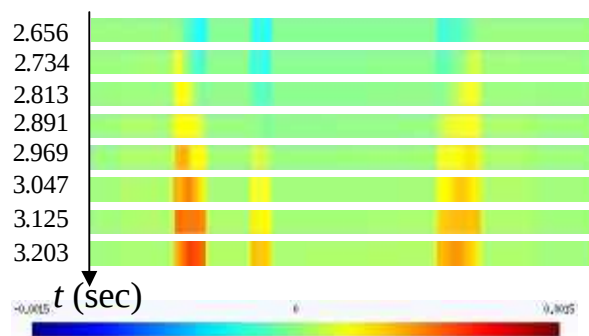
$$\epsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial u}{\partial t} \times \frac{\partial t}{\partial x} = \frac{\frac{\partial u}{\partial t}}{\frac{\partial x}{\partial t}} = \frac{V}{v} \quad (6)$$

と考えることができ、ここで V は地震波の入射に対する地盤の変位する速度、 v は各地点における見かけの伝播速度である。よって、速度時刻歴を入力波とする地下 2m における速度波形を見かけの伝播速度で割るとひずみ波形を求めることができる。

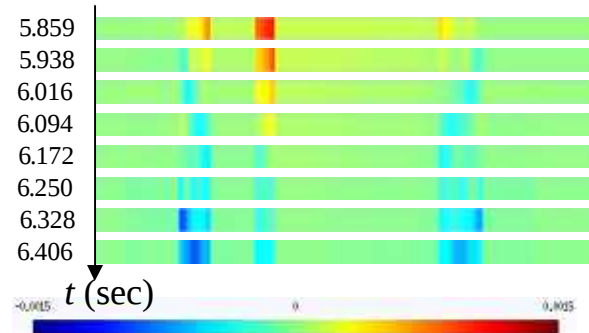
以後図 10(b)の速度時刻歴を入力波として用いる。次にこの入力波が入射したときの地下 2m における速度波形を図 11 に示す。

図 11 の速度波形を各地点における見かけの伝播速度で割って求めたひずみ波形を図 12 に示す。見かけの伝播速度は図 11 のそれぞれの波形の傾きを読み取った値で、遅い所が 1,000m/sec、速い所が 10,000m/s である。

地下 2m の 0m ~ 5,120m の各地点では時間ごとにひずみが変化している。その中でひずみの変化が顕著な時間帯を取り出したものが図 13 である。時間間隔は 1 ステップが 0.078125sec であり、合計 256 ステップで 20sec までを計算している。



(a) 2.625sec ~ 3.203sec



(b) 5.859sec ~ 6.406sec

図 13 ひずみの変化

取り出した時間帯は(a)が 34 ステップ ~ 41 ステップ、(b)が 75 ステップ ~ 82 ステップである。

2 つの図に共通してひずみが正のときは埋設管に対して引張応力が作用し、またひずみが負のときは圧縮応力が作用する。(a)について、2.656sec のとき埋設管の 800 ~ 1,200m、1,700m ~ 1,900m、3,500m ~ 4,000m 地点では圧縮応力が作用し、残りの部分は小さな圧縮応力が働いており全体として圧縮場となっている。また 2.734sec ~ 2.891sec のステップを見ると引張り応力が発生する様子がわかる。2.969sec、3.047sec、3.125sec、3.203sec と時間ごとに引張り応力が大きくなっていき、全体として引張り場となっていることがわかる。(b)については 5.859sec ~ 6.406sec まで引張り場から徐々に圧縮場に変化している様子がわかる。図 13 の(a)と(b)を見てわかるように 800 ~ 1,200m、1,700m ~ 1,900m、3,500m ~ 4,000m 地点でひずみが大きく変化していることがわかる。これらは境界面の勾配が大きいところでひずみが大きく変化しているため、不整形地盤による影響であると考えられる。

ここで各地点において 0s ~ 20s の間で圧縮を引き起こすひずみすなわち負のひずみで絶対値が最大のものをプロットしたものを次の図 11 に示す。

またJFEエンジニアリング株式会社の研究によるSGP50、SGP80、SGP100と呼ばれる口径、管厚の異なる3つの鋼管の中でさらに材料特性の異なる合計9つの鋼管の長柱座屈解析⁴⁾では表1のような結果とされている。

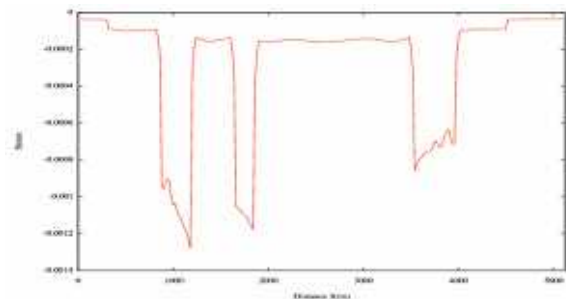


図 11 圧縮を引き起こすひずみの最大値

図 11 を見てわかる通り、1,200m 地点付近でひずみが 0.12%を上回っており、1,900m 地点付近で 0.11%を上回っている。表 1 の結果を見ると、降伏棚が 2%の SGP50 および降伏棚が 2%の SGP80 は長柱座屈開始ひずみが 0.11%で、また降伏棚のない SGP50 および降伏棚が 2%の SGP100 は長柱座屈開始ひずみが 0.12%となっているので、1,200m 地点付近および 1,900m 地点付近で座屈が起きる可能性があると考えられる。

5. 結論

本研究では新潟県中越沖地震で起きた埋設管の被害が不整形地盤による影響によって発生したものとして、新潟県柏崎市の地盤をモデル化してSH波、P-SV波入射時の地盤応答解析を行なった。本研究で行なったこと及び得られた成果は以下の通りである。

SH波解析について振幅 1 の正弦波が鉛直入射したときの応答倍率は、1,500m、1,800m、3,000m地点のような堆積層が深い地点では入射波の周波数が 0.5Hz付近で応答が大きくなり、堆積層が浅い地点になるにつれて応答のピーク時の入射波の周波数は大きくなっており、また地盤のせん断ひずみは不整形境界面の急変部で大きくなることがわかった。

P-SV 波解析について P 波入射時の U_x と SV 波入射時の U_z は不整形境界の影響を受けて応答が発生することを確認した。P 波入射時の地盤の軸ひずみ ε_{xx} は高周波かつ堆積層が深いところで大きくなり、SV 波入射時の軸ひずみ ε_{zz} は、SH 波解析で求めたせん断ひずみと同じように不整形境界面の急変部で

表 1 長柱座屈解析結果

管種	口径	管厚	材料特性		長柱座屈開始歪(%)
			降伏棚	降伏棚の終点歪(%)	
SGP50	60.5mm	3.8mm	あり	1	0.15
			あり	2	0.11
			なし	—	0.12
SGP80	89.1mm	4.2mm	あり	1	0.15
			あり	2	0.11
			なし	—	0.13
SGP100	114.3mm	4.5mm	あり	1	1.09
			あり	2	0.12
			なし	—	0.26

大きくなることがわかった。

実観測地震波を入力波として、地下 2m におけるひずみの時刻歴波形を求めた。そこから各時間ステップ毎に地下 2m のひずみの分布を表示し、ひずみの変化の様子を調べた。地盤の最大の軸ひずみは長柱座屈が起これと考えられる軸ひずみを上回っており、長柱座屈が起これる可能性があることが確認された。

今後の課題は、まず今回の解析ではすべて地震波の入射を鉛直としていたが、より地盤の震動特性を知るために入射角を与えた解析を行なう必要がある。また入力した地震動とモデル地点との対応、入力波の種類（P 波 or S 波 or 実体波 or 表面波など）等は実被害を説明する上ではまだ十分とは言えず、さらに詳細な解析、検討が必要である。

参考文献

- 1) 総合資源エネルギー調査会、都市熱エネルギー部会 ガス安全小委員会、新潟県中越沖地震における都市ガス事業・施設に関する検討会：新潟県中越沖地震における都市ガス事業・施設に関する検討会報告書, 2008 年 5 月
- 2) 新潟県地質調査業協会：新潟県地盤図および新潟県地盤図説明書, 2002 年 11 月
- 3) Aki, K. and K. L. Lerner : Surface Motion of a Layered Medium Having an Irregular Interface Due to Incident Plane SH Waves, Jour. of Geophys. Res., Vol. 75, No. 5, 1970.
- 4) JFE エンジニアリング株式会社：鋼管の長柱座屈解析資料 2009 年 2 月

Effects of layered medium with irregular interface on buried pipeline

Junji Kiyono, Yoshiki Inoue and Kenji Shimizu

Medium pressure gas pipelines sustained severe buckling damage during the 2007 Niigata-ken Chuetsu earthquake. We investigated relationship between damage to the gas pipeline and the ground with irregular interface at Kashiwazaki city in Niigata prefecture. Axial strain of the ground have a great influence on pipelines, therefore, we calculated the ground strain parallel to the pipeline by using Aki-Larner Method, which can solve the ground response for arbitrary input ground motion. The ground strain obtained is in good agreement with the value of experimental data at which the buckling begins to occur.