

震源断層近傍における鋼製パイプラインの応答挙動解析 KINEMATIC RESPONSE ANALYSIS OF STEEL PIPELINE NEAR A FAULT

王宏沢¹ 原田隆典² 野中哲也³ 坂本佳子⁴

¹宮崎大学大学院土木環境工学専攻学生

Koutaku Oho, Graduate Student of Miyazaki University, hongze@civil.miyazaki-u.ac.jp

²宮崎大学土木環境工学科、教授 工博

Takanori Harada, Dept. of Civil and Environmental Eng., Miyazaki University, harada@civil.miyazaki-u.ac.jp

³ヤマト設計株式会社 企画開発部、部長

Tetsuya Nonaka, Planning and Research Development, Myamoto Sekkei Co. Ltd. nonaka@yamato-eng.co.jp

⁴ヤマト設計株式会社 企画開発部

Keiko Sakamoto, Planning and Research Development, Yamato Sekkei Co. Ltd. sakamoto@yamato-eng.co.jp

SUMMARY

Because the earthquake ground motions near a fault are quite complex in time and space by showing the vortexes of waves, it may be considered to be appropriate that a response analysis of long structures, for example, buried pipeline, is performed on the basis of three dimensional model of them. In this paper a three dimensional nonlinear response analysis of buried pipeline near a strike slip fault is performed, and its results are compared with those of the static analysis where the permanent ground deformations near a fault are subjected to the pipeline. The input earthquake ground motions are simulated by a stiffness matrices based formulation of seismic waves in stratified media with a extended seismic source.

キーワード：地震動、運動学的断層モデル、鋼製地中パイプライン、地震応答

Key words: seismic ground motions, kinematic source model, dynamic response, buried pipeline

1 はじめに

我が国では、海底を震源とする海洋型地震に対する地震対策が主流だったこともあり、震源断層近傍における構造物の挙動に関する研究は比較的少ない。しかし1995年の兵庫県南部地震による大災害を経験し、内陸型地震または直下地震に対する地震対策がクローズアップされている。このためには、これまで研究成果が少ない震源断層近傍における構造物挙動に関する研究が不可欠となる。震源断層近傍の構造物挙動に関する研究では、地震動記録が決定的に不足しているため、理論的方法を援用して、強震動をシミュレーションによって確認しながら、抜かりなく構造物の応答挙動の特徴を把握しておかなければならない。

本研究では、構造物として鋼製の地中パイプラインを取り扱う。震源断層近傍における地中埋設パイプラインの挙動に関しては、これまでいくつかの研究があり、高田ら¹⁾はこれらを整理し、新たにシェルモデルと梁モデルを組み合わせた解析結果から断層を横断する地中管路の設計法を提案している。この研究は、断層の静的ずれ(永久ずれ

量)により発生する管路の幾何学的な変形量と応答歪の関係性を静的解析によって調べ、これを整理したものであるため、震源断層近傍の地盤変形の時間的変化等の動的応答特性を考慮したものではない。震源断層破壊伝播特性、地震波伝播特性等の震源断層近傍地盤の動的挙動を考慮したより現実的な条件による解析モデルから地中パイプラインの応答挙動を調べておく必要がある。

そこで本研究では、運動学的断層モデルによる地震動の理論的合成によって震源断層近傍の多地点における地震動変位波形を計算し、これら断層の永久変位を含む変位波形を鋼製の地中パイプラインに入射する非線形応答解析によって、震源断層近傍における地中パイプラインの3次元非線形応答挙動を調べるものとする。断層の永久変位を含む変位波形は、運動学的断層モデルと水平成層地盤モデルに対して剛性マトリクス法に基づく定式化を採用し、比較的簡単な数値計算アルゴリズムによって地震動波形を合成する原田らの方法^{2),3)}によって計算した。構造技術者は、剛性マトリクス法に馴染み深いので、見通しよく地震動波形を合成することができるものと思われる。ま

た地中パイプラインの3次元非線形応答挙動は、第3著者が開発した非線形地盤ばねとファイバーモデル⁴⁾によってモデル化したパイプラインモデルによって計算した。

2 震源断層近傍地震動の時空間分布特性の複雑性と解析用入力地震動

2.1 横ずれ断層近傍地震動変位の時空間分布の複雑性

横ずれ断層近傍の仮想連続高架橋の地震応答解析に用いる入力地震動は、論文^{2) 3)}で使ったものと同じで、断層長さ8.5km、断層幅8.5kmの大きさの矩形鉛直横ずれ断層を含む半無限地盤上に厚さ1.5kmの表層地盤が存在するような震源断層—地盤系を想定し、原田らの方法²⁾に従って計算した。この方法では、運動学的震源モデルと水平成層地盤の剛性マトリックスから解析的に求められる振動数—波数領域の地震波動場を3重逆フーリエ変換して、地震動波形が合成される。また半無限地盤と表層地盤の物性値は、それぞれP波速度=6.0km/s、2.8km/s、S波速度=3.5km/s、1.6km/s、密度=2800kg/m³、2300kg/m³、Q値=400、150で、これらも論文^{2) 3)}のものと同じである。計算では、震源断層や地盤系の不確定性を考慮して、振動数1.9Hzまでの低振動数の地震波を合成したが、地中パイプラインの応答挙動計算では、地震動変位波形が主要な要素であるため、本入力地震動の振動数範囲で十分であると思われる。

このような横ずれ断層—地盤系において、断層近傍の地震動変位波形の時空間分布特性を見るために、Fig. 1に示すように断層破壊開始から約2秒毎の断層近傍地表面(15km×15km)における地震動の水平変位分布をプロットした。Fig. 1に示す6つの時刻毎の水平変位分布図において、左端中央から右方向に延びる黒帯は、震源断層の破壊領域の地表面への投影長さを表す。断層長さ8.5km、断層破壊速度2.2km/sより、約3.9秒で破壊が終了する。また各図の矢印の方向と長さは、地表面の各地点における断層の平均すべり量D=0.9mのときの水平変位の向きと大きさを表す。

Fig. 1によると、断層破壊終了付近の地表面に半時計回りの渦が現れ、この渦の後に時計回りの半径の大きい2つの渦が断層破壊方向に伝播している。このような現象は約10秒程度まで続き、以後はほぼ一定となりいわゆる永久変位の状態となる。約11.5秒の変位図には、本研究で用いた左横ずれ断層による永久変位の様子が現れている。この永久変位場になるまでの地表面の動きは、Fig. 1に示すように複雑な空間分布特性になっており、例えば約5.2秒のときの変位場の振幅とその分布特性は明らかに永久変位場とは違っている。

これらの複雑な時空間分布特性は、震源の複双力に基づいた運動学的断層モデルにおける断層破壊特性と表層地盤特性の相互作用に、さらにディレクティブティー効果も加わった結果として現れる現象であると考えられる。

2.2 解析用入力地震動変位波形

Fig. 1のような震源断層近傍の特異な地震動による鋼製地中パイプラインの応答を調べるために、断層近傍地表面に横ずれ断層と平行並びに、直交する全長約4080m、直径1219.2mmの仮想的な鋼製地中パイプラインを想定するものとする。

Fig. 2は、横ずれ断層の地表面への投影位置と断層に平行及び直交する2つの場合におけるパイプラインの位置関係を示している。この図に黒丸で示す1、2、…2041(断層平行の場合)や1、2、…1921(断層直交の場合)の番号は2m毎にある地盤ばねを介して強制変位を注入する地点番号を表す。断層に平行なパイプラインの場合(case 1)における2番と2040番地点、並びに断層に直交するパイプラインの場合(case 2)における2番と480番地点に注入する地盤の3成分変位波形(u断層平行成分、v断層直交成分、w鉛直成分)をFig. 3に示す。この入力変位波形は、振動数1.9Hz以下の低振動数地震波を対象に理論的に合成したものである。断層の平均すべり量をD=0.9mのときの変位波形を示している。断層直交成分(v)の変位振幅が最も大きく最大で約40cmの変位が現れている。水平2成分変位波形(u,v)には最大20cm程度の永久変位が見られるが、鉛直成分にはほとんど永久変位が見られない。

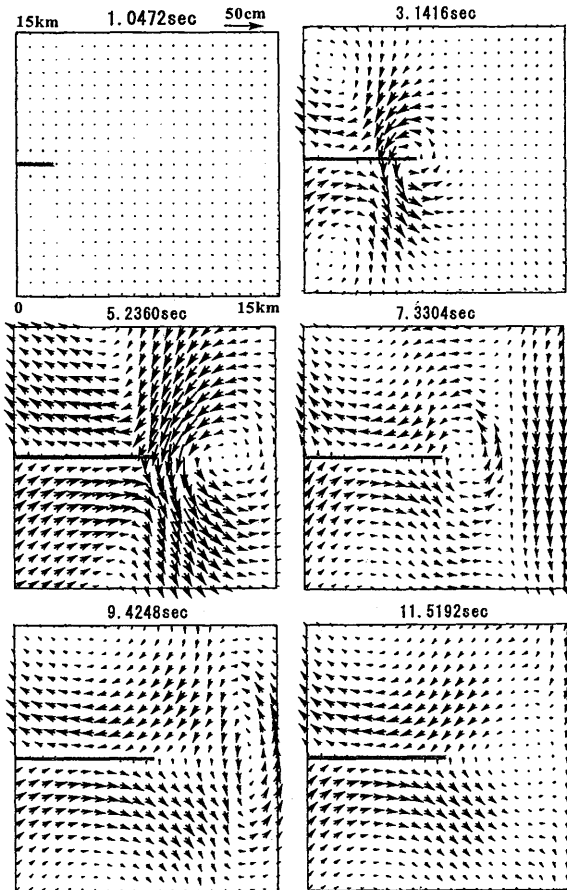


Fig. 1 Snapshots of horizontal ground displacements over 15kmx15km at 6 time instants

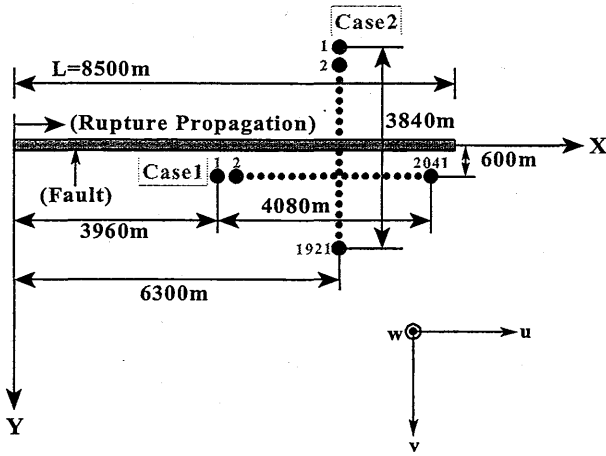


Fig.2 Coordinate and location of fault projection and two cases of pipeline (plane view)

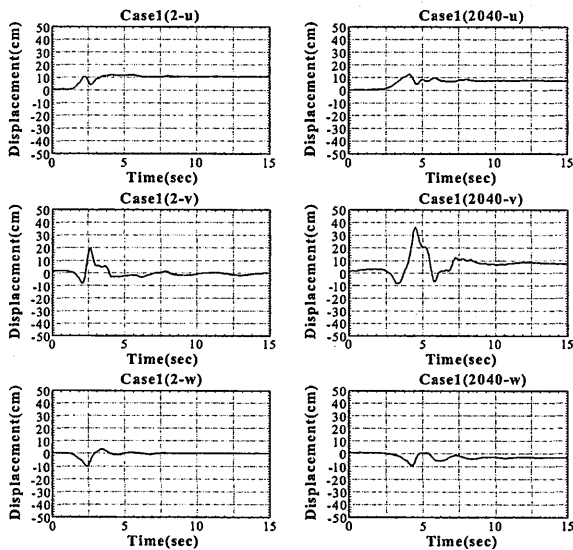


Fig.3a Input ground displacements at No. 2 and No. 2040 points in Case 1 pipeline

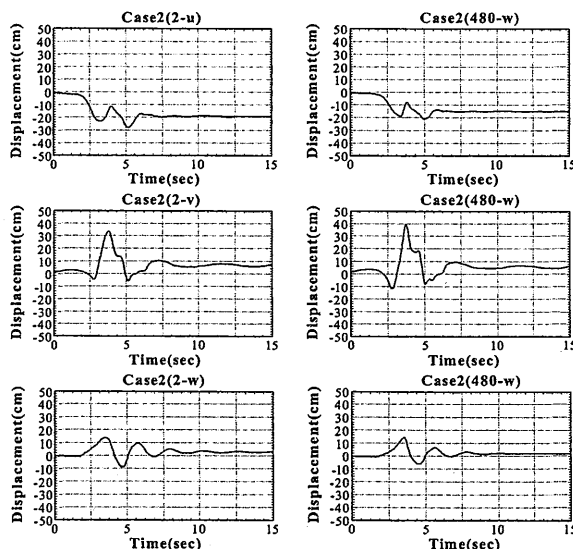


Fig.3b Input ground displacements at No. 2 and No. 480 points in Case 2 pipeline

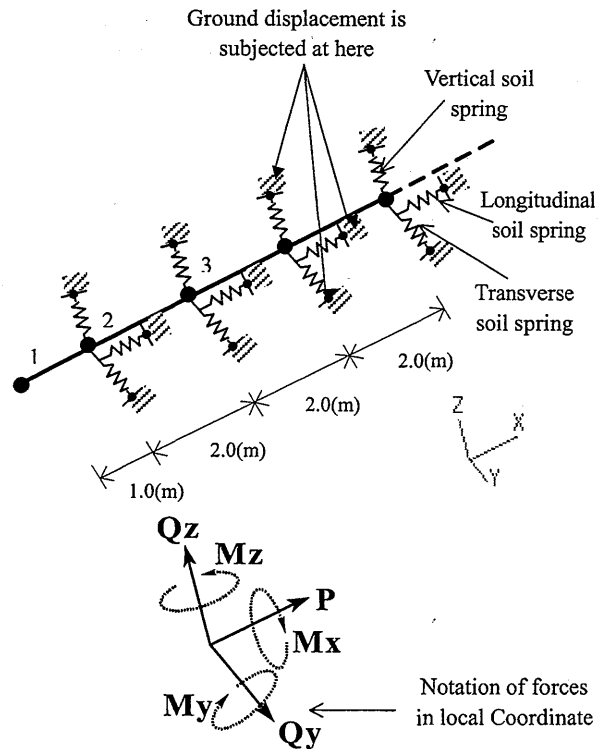
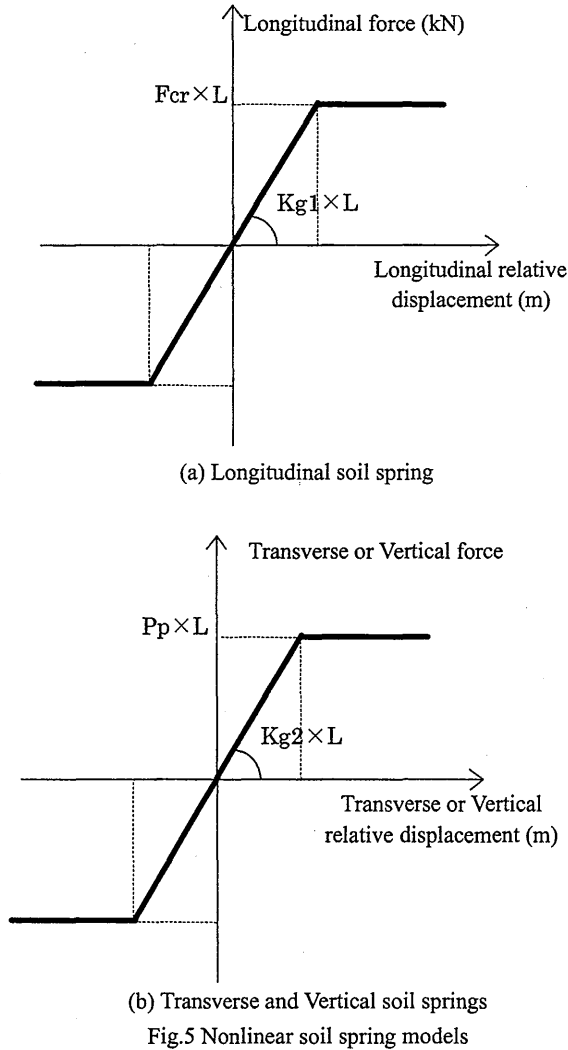


Fig.4 Discrete model of pipeline and soil spring
Ground displacement is subjected at here

3. 仮定の鋼製地中パイプラインのモデルと解析方法

対象とする鋼製地中パイプラインは、Fig.2 のように断層に平行な全長 4080m の場合 (case 1) と断層に直交する全長 3840m の場合 (case 2) の 2 つのケースを想定する。いずれの場合もパイプラインの特性は同じで、直径 1219.2 mm、厚さ 11mm、STW400 (降伏応力 225 N/mm²) の鋼製パイプラインとする。

Fig. 4 は、鋼製パイプラインと地盤ばねの分割を示し、鋼製パイプラインはファイバー要素でモデル化し、鋼材は 2 次勾配を $E/100$ (E ヤング率 = 2.0×10^5 N/mm²) とするバイリニアモデルとしている。鋼製パイプラインは 2m 毎に地盤ばねで支持され、地盤ばねを介して地盤の変位波形が入射され、第 3 著者らの開発した Y-FIBER3D⁴⁾ によってパイプラインの非線形動的応答が計算される。地盤ばねは、Fig.5 に示すようなバイリニアの非線形特性にモデル化している。本解析で用いた鋼管 1219.2mm × 11mm における地盤ばねモデルの特性値は、地中パイプラインの埋め戻し土のせん断弾性波速度 120 m/s、土被り厚さ 1.2m を想定し、 $F_{cr} = 56.27$ kN/m, $K_{g1} = 365.07 \times 10^2$ kN/m², $\delta_1 = 1.5 \times 10^{-3}$ m, $P_0 = 116.47$ kN/m, $K_{g2} = 730.14 \times 10^2$ kN/m², $\delta_2 = 1.6 \times 10^{-3}$ m, $L = 2$ m の値を用いた。



4. 仮定の鋼製地中パイプラインの非線形応答解析結果

約 2 秒毎における鋼製パイプラインの応答変位の様子を Fig.6 に示す。Fig.6 (a)は、断層に平行なパイプラインの場合 (case 1) の応答変位を、Fig.6 (b)は、断層に直交するパイプラインの場合 (case 2) の応答変位を表す。パイプラインの応答変位は、実際の変位を 2000 倍に拡大してメートル単位で描いている。両ケースとも断層近傍の地盤変位に追従してパイプラインが変形しているが、時刻 11.52 秒での変形は、地盤の永久変位に対応するパイプラインの変形である。この時刻 11.52 秒の変形と比べると、時刻 3.14 秒のときの変形は、両ケースともに最も大きく、また変形の形が異なっていることがわかる。これは、第 2 章で見たように地震波が伝播する過程における地盤変形の方が、地盤の永久変位よりかなり大きく、また地盤変形の空間分布も異なっているためである。

したがって、震源近傍におけるパイプラインの応答挙動を調べるためには、断層の永久変位を想定した検討のみでは不十分で、本研究で示したような断層破壊伝播特性と地

震波伝播特性を考慮した地盤変形の動的性状を考えた検討が必要であると思われる。

この点をさらに明確にするために、鋼製地中パイプライン各点の断面力 (軸力と曲げモーメント M_y, M_z) の時間的変化の中で最大のもの (動的解析結果と呼ぶ) と、地盤の永久変位が現れる時刻 11.52 秒時の各点の断面力 (静的解析結果と呼ぶ) を比較して示すと Fig.7(a),(b) のようになる。横軸は 2m 毎に離散化したパイプラインの要素点番号を表す。Fig.7 (a)には、断層に平行なパイプラインの場合 (case 1) におけるパイプライン各点 (1 から 2041) の動的解析による最大軸力、最大曲げモーメント (M_y, M_z) を黒円で、静的解析結果を白円で示している。断層に直交するパイプラインの場合 (case 2) も同じように Fig.7 (b) に示している。

両ケースともに、軸力 (x 軸方向の軸力) が曲げモーメント (y 軸回りの曲げモーメント M_y, z 軸回りの曲げモーメント M_z) よりも卓越しており、また動的解析の断面力 (黒円) の方が、静的解析の断面力 (白円) よりも圧倒的に大きいことがわかる。

なお、本研究で用いた震源断層—地盤系並びに鋼製地中パイプラインにおける最大軸応力は、ケース 1 で 26 N/mm^2 、ケース 2 では、24 N/mm^2 とパイプラインの降伏応力 225 N/mm^2 に比べ圧倒的に小さく、パイプ被害は生じない。

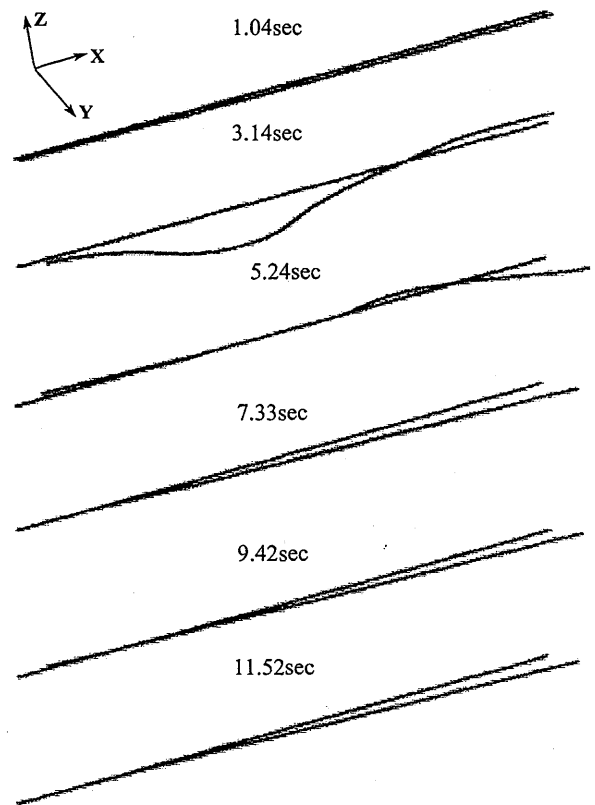


Fig.6(a) 3-dimensional deformation of pipeline at 6 time instants (Case 1)

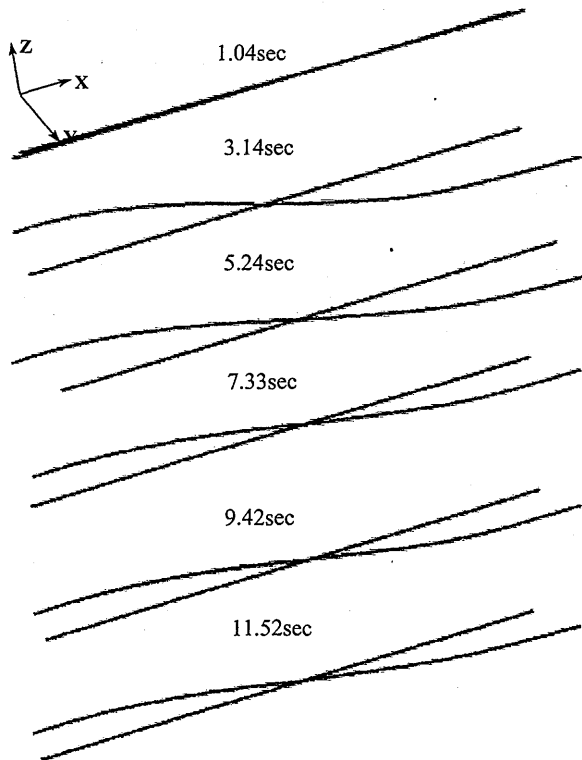


Fig.6(b) 3-dimensional deformation of pipeline at 6 time instants (Case 2)

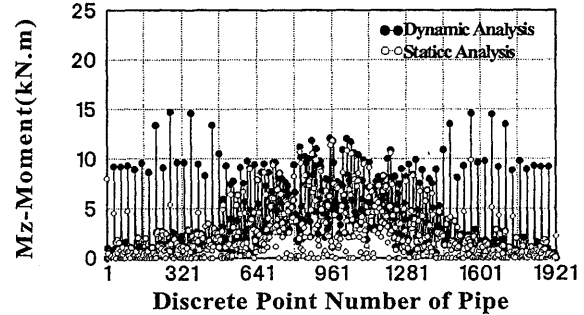
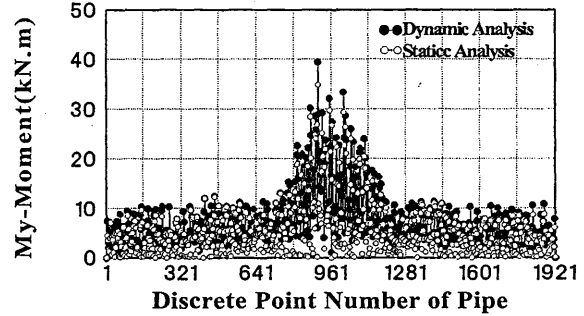
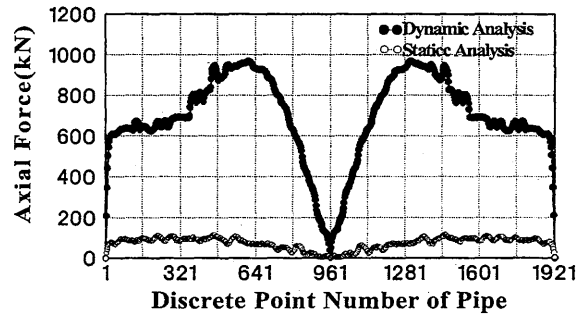


Fig.7(b) Comparison of maximum cross sectional forces of pipeline by dynamic analysis with those by static analysis (Case 2)

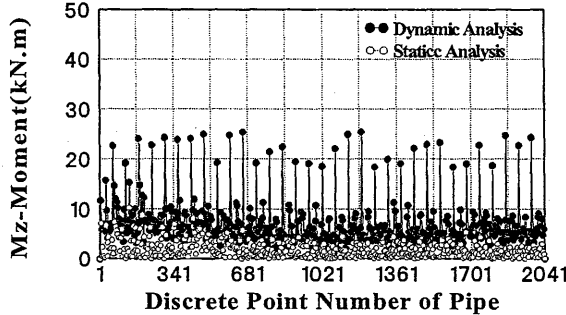
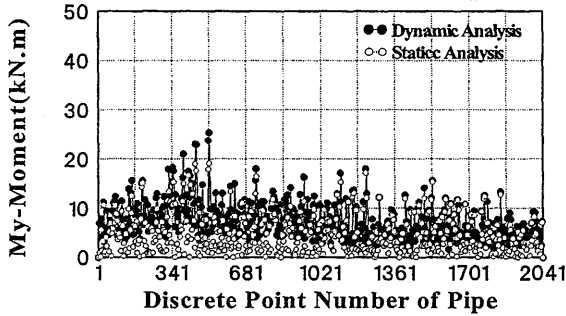
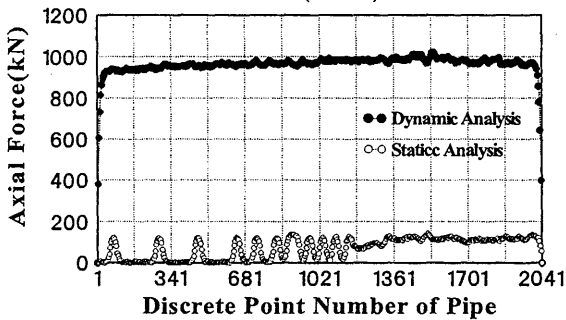


Fig.7(a) Comparison of maximum cross sectional forces of pipeline by dynamic analysis with those by static analysis (Case 1)

また、断層すべり変位量 D を 4 倍 ($D=3.6\text{m}$) として計算した地盤変位波形に対するパイプラインの応答も計算してみたが、応答もほぼ 4 倍になるのみで、パイプの被害が生じるものではなかった。したがって今後は、断層が地表に現れるような震源断層—地盤系に対するパイプの応答挙動等を明らかにし、パイプの被害と震源断層—地盤系の特徴を調べてゆく必要がある。

6. まとめと課題

原田らの方法^{2),3)}を使って、運動学的震源モデルと水平成層地盤の剛性マトリックスによって解析的に求められる振動数—波数領域の地震波動場を 3 重逆フーリエ変換して理論的に地震動波形を合成した。この横ずれ断層近傍における地表面地震動の変位波形の時空間分布特性を描いてみると、渦を巻きながら地震波が伝播するなど、時空間分布特性が複雑であることを示した。

この変位波形とファイバーモデルを用いた3次元非線形動的解析によって、この横ずれ断層近傍の鋼製地中パイプラインの地震応答計算(動的解析)を行った。この計算では、断層による地盤の永久変位に対するパイプラインの応答(静的解析)も求めた。

動的解析と静的解析結果の比較から、断層の永久変位を想定して求められるパイプラインの断面力(静的解析結果)に比べ、本研究で示したような断層破壊伝播特性と地震波伝播特性を考慮した地盤変形の動的性状を考えて求められるパイプラインの断面力(動的解析結果)の方が圧倒的に大きいことがわかった。

なお、本研究で用いた震源断層—地盤系並びに鋼製地中パイプラインにおける最大軸応力は、ケース1で26 N/mm²、ケース2では、24 N/mm²とパイプラインの降伏応力225 N/mm²に比べ圧倒的に小さく、パイプ被害は生じないが、断層が地表面に現れるような別の震源断層

—地盤系に対するパイプラインの応答挙動については今後検討する予定である。

参考文献

- 1) 高田至郎, Hassani N., 福田克巳(2001):断層を横断する地中管路の設計法の提案, 土木学会論文集 No.688/I-54,pp.187-194.
- 2) 原田隆典, 大角恒雄, 奥倉英世(1999):3次元直交座標系における波動場の解析解とその地震動波形作成への応用, 土木学会論文集 No.612/I-46,pp.99-108.
- 3) 原田隆典, 山下肇(2000):剛性マトリックスに基づく地震動の波形合成法と震源断層近傍地震動の渦現象, 土木学会応用力学論文集, Vol.3,pp.569-576, 地震の力学問題部門.
- 4) Y-FIBER3D, ヤマト設計株式会社.