

# (110) 地中埋設ダクトの横断方向地震時挙動の観測とシミュレーション

東京電力(株) 片平 冬樹 興野 俊也  
 東電設計(株) 安中 正 高本 全徳 西村 友次

**1. まえがき** 地中埋設ダクトの地震時挙動を明らかにするために、1982年10月以来、福島県東部において鉄筋コンクリート製地中埋設ダクト及びその周辺地盤で地震観測を実施している。本研究では、横断方向地震時挙動に関してこれまでの観測記録を整理し、代表的な2つの地震の記録を対象として2次元有限要素法を用いたシミュレーションを行った。

**2. 地震観測の概要** 地中埋設ダクトの断面形状及び計器配置を図-1に示す。ダクト断面の形は幅が9.9m、高さが3.8mの長方形であり、鉄筋コンクリートの厚さは底版が80cm、底版を除く外壁が70cm、隔壁が40cmである。ダクトには、速度型地震計が2台、鉄筋計が5台、表面歪計が11台、土圧計が6台、ほぼ同一断面に設置されている。表面歪計の内7台は1989年3月に増設された。ダクト周辺地盤には、ダクト端から10mの位置に、鉛直方向に6台の速度型地震計が設置されている。ただし、古い計器の中には修理不能なため現在では計測不能になっているものがある。

**3. 地盤モデル** 地盤調査により得られた速度構造モデル及び鉛直アレーの観測記録を考慮して設定した解析用モデルを表-1に示す。ダクトは底版が泥岩に岩着する形で設置されている。泥岩の上部は埋め戻し土である。解析用地盤モデルは、図-2に示すように、地盤モデルから計算した地表と地中のスペクトル比のピーク周波数の位置が観測されたピーク周波数の位置と1次については一致するように地盤調査から得られたモデルを微調整して設定した。図の細い実線は各地震に対するスペクトル比を、太い実線は地盤モデルから計算したスペクトル比を示しており、観測されたスペクトル比は地震に依らずほぼ一定である。S波速度構造の設定には水平動主要動部分(S波群)のスペクトル比を、P波速度構造の設定には上下動初期微動部分(P波群)のスペクトル比を用いた。

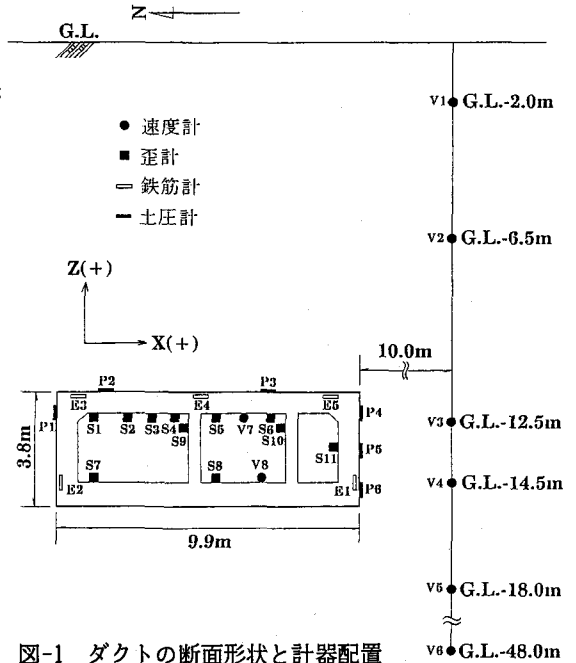


図-1 ダクトの断面形状と計器配置

表-1 地盤モデル

深度 (m)	地層名称	地盤調査結果			地盤モデル		
		Vs (m/sec)	Vp (m/sec)	単体重量 $\gamma$ (t/m <sup>3</sup> )	Vs (m/sec)	Vp (m/sec)	減衰定数
G. L. ±0.0							
-5.3	埋	227	550	1.52	230	480	一律 2%
-6.5		237	580	1.52	230	480	
-10.6	戻	237	580	1.52	300	480	
-13.3		208	1060	1.42	300	480	
-14.5	土	206	1470	1.96	300	480	
-48.0	泥岩	452	1630	1.70	480	1630	

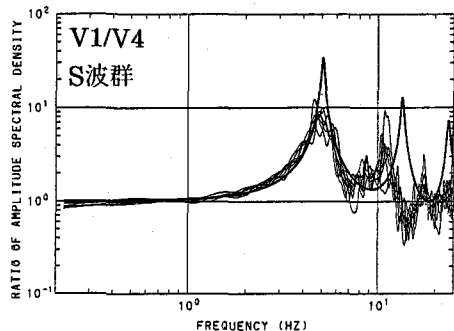


図-2 観測によるスペクトル比(細い実線)と地盤モデルによるスペクトル比(太い実線)の比較

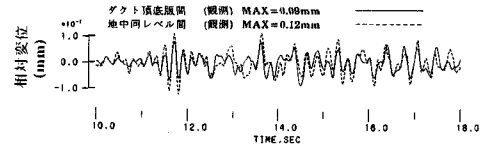
#### 4. 埋設ダクトの地震時挙動 埋設ダクトの挙動

は地盤のせん断変形に支配されていると考えられている。ダクトの変形と地盤の変形の関係を調べるために、図-3に示すように、ダクト頂底版に設置されている地震計(図-1のV7とV8)間の相対変位と対応する深さに設置されている地盤内の地震計(図-1のV3とV4)間の相対変位を比較した。振幅は地盤よりもダクトの方がやや小さくなっているが、位相的には一部を除き両者の波形はよく対応しており、地盤のせん断変形によりダクトが変形していることが明瞭に示されている。これに伴い、ダクトに設置されている各計器の応答もダクト頂底版間の相対変位に対応している。図-4は、シミュレーションの対象とした2つの地震について、ダクト頂底版間の相対変位と表面歪計、鉄筋計、土圧計の波形の対応関係を示したものである。ダクト頂底版間の相対変位に対して同位相のものと同位相のものがあるが、どちらの場合も波形の変化はよく対応している。図-4では振幅が比較的大きな波形を比較しているが、他の計器の波形もほぼダクト頂底版間の相対変位に対応した応答を示している。ダクト頂底版間の相対変位の位相を基準にした場合の各計器の位相を表-2に示す。+はダクト頂底版間の相対変位と同位相であることを、-は逆位相であることを示している。表面歪計、鉄筋計、土圧計(静止土圧からの増減分)の応答は+側が圧縮、-側が引っ張りの方向である。従って、ダクトが図-1でXの正方向にせん断変形した場合、表-2で+の計器は常時に比べ圧縮になり、-は引っ張りになる。頂版の場合、E3とS6が圧縮でE5とS1が引っ張りであり、ダクト全体のせん断変形に伴い、頂版は中央付近を変曲点とする曲げ変形をしていると考えられる。他の部分も同様に考えると基本的な傾向は説明できる。このダクトのみかけのせん断剛性は周辺地盤より大きい。これはP1の動土圧が圧縮でP4が引っ張りであることと調和している。

表-2 頂底版間の相対変位を基準にした各計器の位相

計器	位相	計器	位相	計器	位相	計器	位相
S1	-	S7	+	E1	+	P1	+
S2	-	S8	+	E2	-	P2	-
S3	-			E3	+	P3	+
S4	+	S9	+	E4	-	P4	-
S5	-	S10	+	E5	-	P5	-
S6	+	S11	+			P6	-

#### 1984年1月1日東海道はるか沖地震



#### 1989年4月28日福島県沖地震

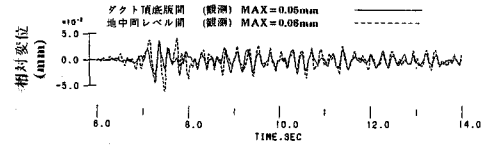


図-3 ダクト頂底版間と対応する地盤間の相対変位の比較

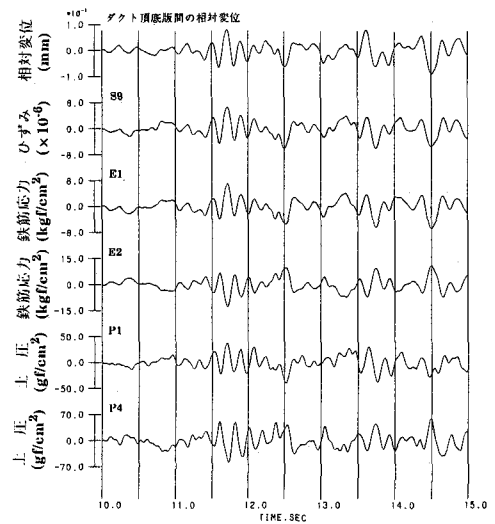


図-4(1) ダクト頂底版間の相対変位と各記録の波形の対応 (1984年1月1日東海道はるか沖地震)

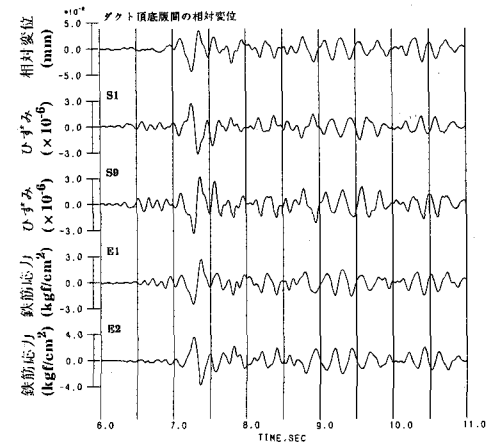


図-4(2) ダクト頂底版間の相対変位と各記録の波形の対応 (1989年4月28日福島県沖地震)

5. 解析モデル及び解析対象地震 地震時挙動のシミュレーションには、2次元複素応答解析プログラム (FLUSH) を用いた。解析モデルを図-5に示す。ダクトはソリッド要素でモデル化し、コンクリートの物性は、品質管理試験結果に基づき、弾性定数 $E=3.92 \cdot 10^8 \text{ tf/m}^2$ 、ポアソン比0.167、単位体積重量 $2.40 \text{ tf/m}^3$ とした。周辺地盤は表-1の解析用地盤モデルを用いて水平成層でモデル化し、側方境界はエネルギー伝達境界、下方境界は粘性境界とした。入力としては、地表近傍 (V1) の観測波形から1次元波動理論に基づき推定した下方境界での入射波を用いた。解析対象地震として、1984年1月1日東海道はるか沖地震 ( $M=7.4$ 、震源深さ400km、震央距離581km、地表での最大加速度55gal) と1989年4月28日福島県沖地震 ( $M=4.9$ 、震源深さ53km、震央距離47km、地表での最大加速度26gal) を選んだ。前者は土圧計を含めて記録状態が良好で、鉄筋計等のダクトの応答が最も大きな地震として、後者は1989年3月の表面歪計の増設後に得られた記録の中でダクトの応答が最も大きな地震として選んだ。後者については土圧計が計測不能で、記録が得られていない。

6. 観測記録と解析結果の比較 福島県沖地震の場合について、ダクトの変形を支配している地盤の変位波形がシミュレーション解析により非常によく再現できていることを図-6に示す。また、鉄筋計と表面歪計の観測と解析の最大値の比較を図-7に、各種の波形の比較を図-8に示す。図-7に明らかなよう

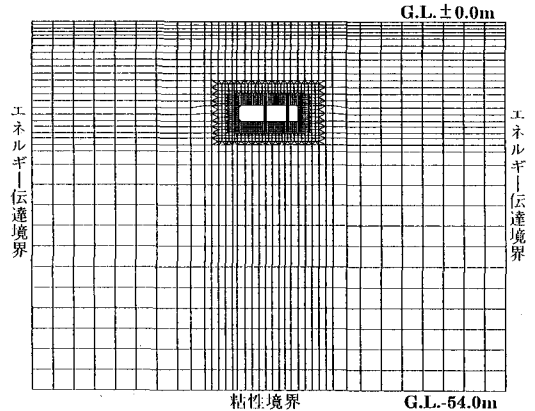


図-5 解析モデル

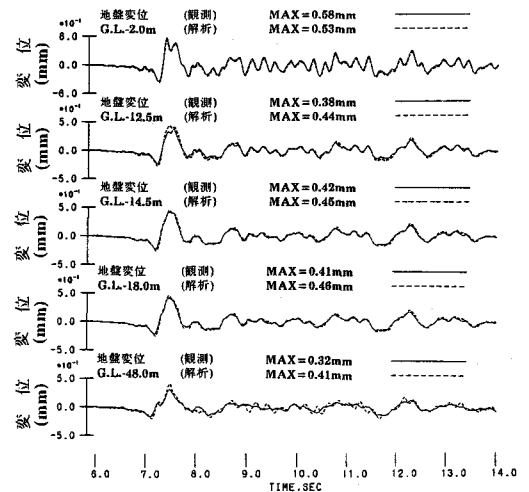


図-6 福島県沖地震の場合の地盤変位波形の比較

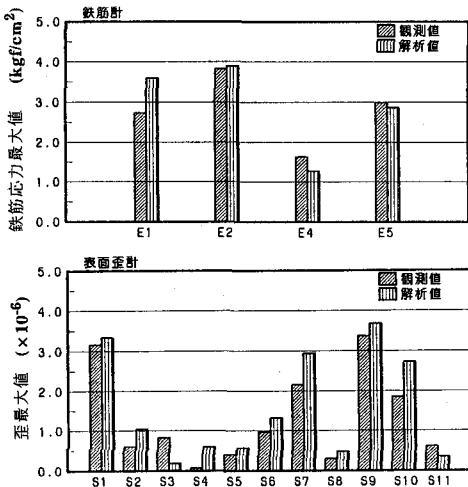


図-7 福島県沖地震の場合の最大値の比較

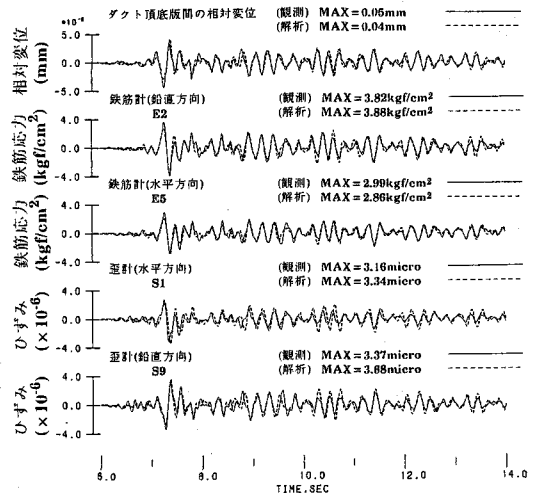


図-8 福島県沖地震の場合の波形の比較

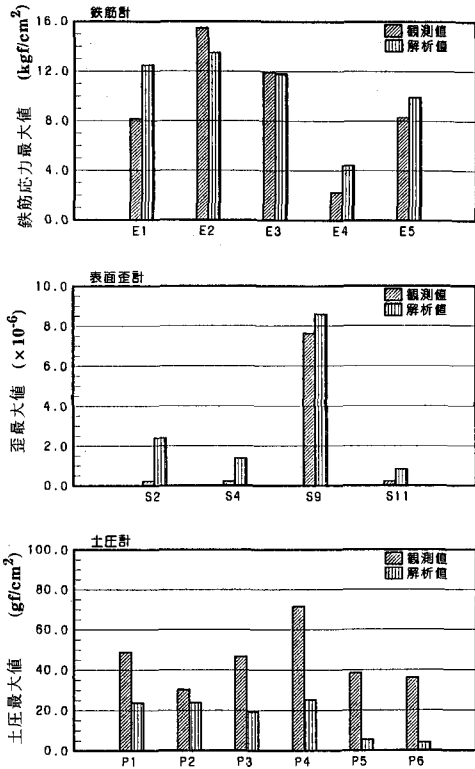


図-9 東海道はるか沖地震の場合の最大値の比較

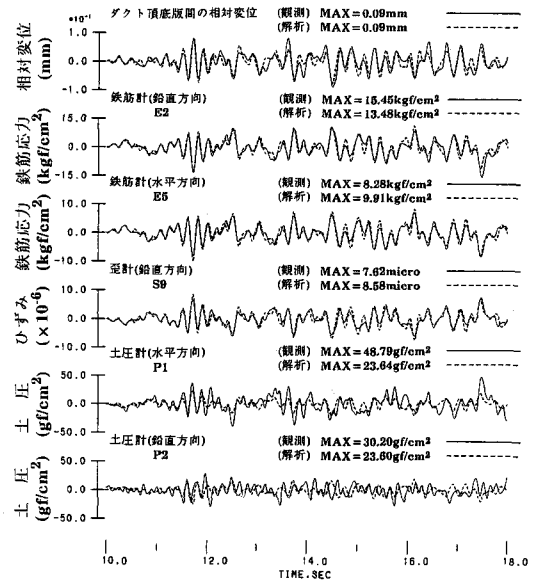


図-10 東海道はるか沖地震の場合の波形の比較

に、各計器の最大値及び各計器間の最大値の相対的な関係がかなりよく再現されている。波形の比較でも、ダクト頂底版間の相対変位を始めとして観測波形と解析波形はかなりよく一致している。前述したように、鉄筋計と表面歪計の波形はダクト頂底版間の相対変位の波形とよく対応しているので、ダクト頂底版間の相対変位及びその原因となる地盤の変位分布を正確に再現できたことが良好なシミュレーション結果が得られた1つの要因と考えられる。また、ダクトの変形モードが解析により正しく表現できているために、ダクトに設置されている各計器の最大値及びその相対的關係が再現できている。

東海道はるか沖地震の場合について、土圧計を加えた各計器の最大値の比較を図-9に、各種の波形の比較を図-10に示す。鉄筋計と表面歪計は、福島県沖地震の場合と同様に、最大値も波形もかなりよく再現できている。ただし、土圧計については、解析による最大値が観測よりもかなり小さくなっている。ただし、波形の対応については、頂版の上に設置されているP2とP3を除くとそれほど悪くない。土圧計の記録だけが再現できない原因については明確になっていないが、上下動が影響している可能性、設置条件等に問題があり測定精度が悪い可能性などが考えられる。

**7. あとがき** 福島県東部で実施している鉄筋コンクリート製地中埋設ダクト及びその周辺地盤での地震観測に基づき、埋設ダクト横断方向地震時挙動の特徴を検討し、埋設ダクトの挙動が地盤のせん断変形に支配されていること、2次元有限要素法を用いたシミュレーションにより観測結果の基本的特徴がかなりよく再現できることを示した。土圧計の記録については十分再現できていないが、上下動の影響の問題などについてさらに検討する余地が残されている。