

# 埋設管の地震時挙動の観測結果

住友金属 正員 渡辺奉昭  
住友金属 正員 飯田 毅

## 1. 緒言

粘性土（観測点Ⅰ，S49.9～）と砂質土（観測点Ⅱ，S52.5～）の両地盤に敷設されたそれぞれの埋設管について地震時の管の歪，地盤の加速度を長期観測中である。本報は，①今迄に得られた観測データ，②石油パイプライン技術基準（以下基準）<sup>1)</sup>との応力比較，③埋設管挙動の解析，などの中間報告である。

## 2. 観測地条件と計測方法

地震観測地は観測点Ⅰが東京地区粘性土地盤，観測点Ⅱが茨城県鹿島地区砂質地盤であり，それらの土質柱状図を図1(a)，(b)に，また，地震計設置位置とゲージ貼付位置を図2,3に示す。観測点Ⅰでは管軸，管軸直角，上下3成分の地震計を，900A鋼管の埋設深さG.L.-1.62mに設置し，また，ストレインゲージを曲管部2ヶ所，直管部1ヶ所にいずれも管軸方向に貼付した。観測点Ⅱでは地中地震計，地表地震計をそれぞれG.L.-20m，G.L.0mにNS,EW,上下3成分ずつ合計6成分設置し，また，埋設深さ約1.5mの300A鋼管の約 $1/4$ ， $1/2$ ， $3/4$ 点に軸歪，曲歪を検出できるようにストレインゲージを貼付した。

つぎに，用いた地震時自動計測装置は共和電業製VAS-1122型（観測点Ⅰ），明石製作所製AJE-304型（観測点Ⅱ）で，地震計としては両地点ともサーボ型加速度計（2G）である。記録計には，電磁オシログラフ（観測点Ⅱ），データレコーダ（観測点Ⅱ）を用いた。

## 3. 観測結果と考察

### 3.1 地盤加速度と管歪

観測点Ⅰ，Ⅱで収録された16例の地震の諸元，地盤の最大加速度，管に生じる最大歪を表1,2に示す。両地点で最大歪が記録された地震NO.はⅠ-7とⅡ-5で，これらの加速度および歪の波形を図4,5に示す。これらから明らかなように地盤加速度の大きさと管歪のそれとは必ずしも一致せず，加速度が小さくても大きな管歪が発生している。これは図4(a)，(b)より明らかなように低振動数領域の時点

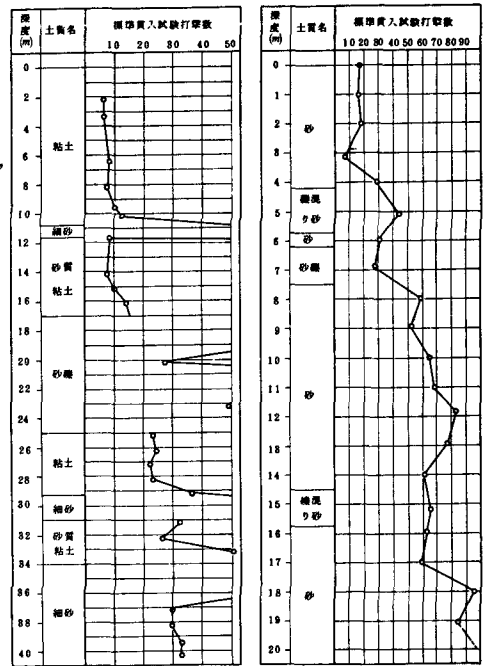


図1 土質柱状図

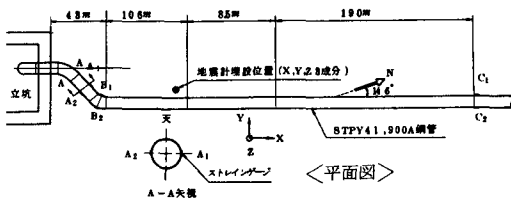


図2 埋設管と振動，応力測定位置（観測点Ⅰ）

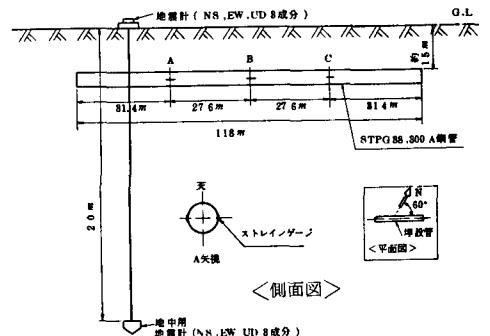


図3 埋設管と振動，応力測定位置（観測点Ⅱ）

で管歪が大きくなるためである。また、図5の波形では地震前半で長周期成分、後半で短周期成分が存在することから前半部で歪量が大きくなっている。

以上より管歪の大小は地震加速度よりもむしろ、地震波の周波数特性（後述）に依存していると考えられる。

つぎに、観測点IIの最大地表加速度/最大地中加速度、最大軸歪/最大曲げ歪を表3に示す。表2.3より、

(i) 地表加速度/地中加速度は水平動で平均2.1、上下動では平均2.2となる。

(ii) 直管部に生じる歪は軸方向の歪が卓越し、曲げ歪が検出できた場合で軸歪/曲げ歪≦5であった。

(iii) II-9では、地盤加速度が大きいにもかかわらず管の発生歪は小さい。これは後述のように地震波の卓越振動数が高いためと考えられる。

### 3.2 波形分析

従来より埋設管の動きは地盤の動きに追従することが実験的に明らかにされている<sup>2)</sup>が、これに関して埋設管と地盤との相関を観測点IIで得られている地盤加速度、管歪のパワースペクトル密度により検討した。

(1) 地盤加速度のパワースペクトル密度

同程度規模のII-1～II-3（震度III）の3例に対する地表および地中の地震波NS成分のパワースペクトル密度曲線を図6に示す。これより、

(i) 地表面の卓越振動数は1.5～3.5 Hzの範囲にあり、そのピークは2.5 Hz前後である。

(ii) 地下20 mでの卓越振動数は、1.2, 2.5, 4.3 Hzとピークバンドが多数存在する。地表面ではこれらより選択した振動数に対して増巾効果を有している。

(2) 地盤加速度と管歪のパワースペクトル密度

最大の管歪が記録されたII-5に対する地盤加速度と管軸歪のパワースペクトル密度曲線を図7,8に示す。本地震は、図5にみられるように、大きな加速度振幅を示す時点が2ヶ所存在するという特殊な例である。したがって、地盤加速度のパワースペクトル密度の算定には波

表1 地震諸言および加速度、歪の最大値（観測点I）

項目	地震名	I-1	I-2	I-3	I-4	I-5	I-6	I-7
発震年月日		5.49 10.81	5.50 2.8	5.50 8.11	5.50 8.12	5.50 4.12	5.50 4.18	5.50 6.12
震源地名		茨城県 南西部	千葉県 北西部	栃木県 中部	利根川 中流	茨城県 南西部	茨城県 南西部	宮城県 沖*
震源深さ (km)		5.0	6.0	1.0	5.0	5.0	5.0	3.0
Magnitude		4.6	5.4	5.1	4.2	5.0	5.0	7.4
震央距離 (km)		5.1	3.9	9.4	5.8	5.5	5.2	8.3
東京地方震度		2	4	3	2	2	2	4
最大管軸 加速度 (gal)		1.8	2.0	5	1.0	1.5	3.5	2.9
管軸方向		1.7	2.8	7	1.0	1.4	2.8	2.9
上下		1.6	1.4	2	2	5	1.1	10.6
A1		1.9	3.8	0	0	0	1.9	—
A2		1.9	3.8	0	0	1.4	2.9	4.8
B1		1.9	5.2	0	0	2.9	4.8	8.8
B2		1	0	0	0	0	1.9	—
C1		1.9	4.8	0	0	2.4	4.8	5.2

\*地震の前半、後半の加速度、歪を記す。

表2 地震諸言および加速度、歪の最大値（観測点II）

項目	地震名	II-1	II-2	II-3	II-4	II-5	II-6	II-7	II-8	II-9	
発震年月日		5.52 8.21	5.52 10.5	5.52 12.17	5.53 3.20	5.53 4.7	5.53 4.8	5.53 5.18	5.53 6.5	5.53 9.2	
震源地名		房総 南東沖	千葉県 北西部	茨城県 南西部	茨城県 南西部	千葉県 東方沖	千葉県 東方沖	茨城県 沖	茨城県 沖	茨城県 沖	
震源深さ (km)		4.0	7.0	5.0	6.0	5.0	6.0	4.0	5.0	3.0	
Magnitude		5.4	4.5	5.6	5.5	5.0	4.8	5.2	4.9	4.4	
震央距離 (km)		9.8	6.5	8.8	3.2	10.6	2.8	8.7	5.7	2.6	
観測点 番号		8	0	8	1	4	4	2	8	8	
最大 加速度 (gal)		NS 9.6 EW 9.7 UD 8.0	9.1 6.7 4.5	1.17 1.40 5.8	6.0 4.8 3.5	10.9 3.20 8.7	6.4 4.7 4.7	4.0 6.9 1.8	5.3 8.5 2.8	3.7 6.7 18.7	8.8 2.6 18.7
最大 管軸 加速度 (gal)		NS 5.4 EW 4.8 UD 2.9	4.2 2.7 1.4	6.8 6.6 2.9	2.8 2.4 1.8	7.8 5.5 2.9	2.6 2.2 2.2	2.0 1.7 1.2	2.4 2.2 1.1	2.8 1.9 1.9	
最大 管軸 歪		軸歪 0.0 曲歪 4.2	0.0 8.0	0.0 2.8	0.0 1.9	0.0 7.6	1.3 1.9	0.0 1.2	0.0 1.8	0.0 8.7	
最大 管軸 歪		軸歪 0.9 曲歪 0.0	0.0 2.9	0.0 3.1	0.0 1.8	0.0 7.6	1.3 2.3	0.0 1.1	0.0 1.2	0.0 8.8	
最大 管軸 歪		軸歪 0.0 曲歪 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	

— 等点位置移動のためのデータ取れず。

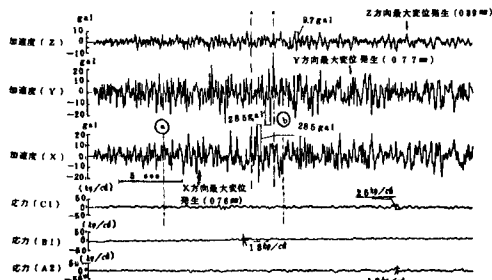


図4(a) 地震観測波形 (NO. I-7; 前半部)

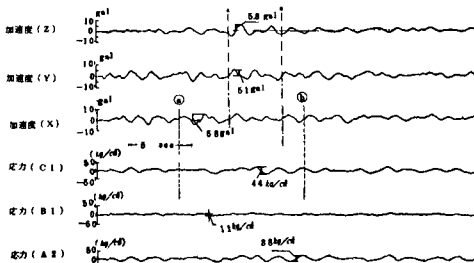


図4(b) 地震観測波形 (NO. I-7; 後半部)

表3 最大地表加速度/最大地中加速度, 最大軸歪/最大曲げ歪

項目	地震名	II-1	II-2	II-3	II-4	II-5	II-6	II-7	II-8	II-9
地表 加速度	NS	1.6	2.2	1.8	2.5	1.5	2.4	2.1	2.2	1.6
	EW	2.0	2.5	2.1	2.0	1.7	2.0	2.1	3.0	1.5
	UD	1.02	3.4	1.9	2.5	1.8	2.1	1.1	2.6	3.8
地中 加速度	A	—	—	—	—	5.8	—	—	—	—
	B	4.7	—	—	—	5.8	—	—	—	—
	C	—	—	—	—	—	—	—	—	—

ただし、—, 曲げ歪=0

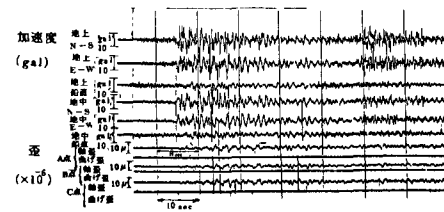


図5 地震観測波形 (NO. II-5)

形を前、後半部に分け、歪に関しては最大歪を示す前半部のみを用いた。結果を要約すると以下のとおりである。

- (i) 前半部では、地中、地表の卓越振動数は0.5～0.8 Hzであり、比較的低振動数域が卓越している。
- (ii) 後半部では、(a)地表の卓越振動数はNS成分で2.7 Hz、EW成分で1.5～2.5 HzとⅡ-1～Ⅱ-3と同様の傾向にある。(b)地中での卓越振動数はNS成分で0.8 Hz、EW成分で1.0～1.5 Hzと比較的低振動数成分域である。一方、上下成分では2.7 Hzが卓越し他の地震と同様の傾向にある。
- (iii) 管軸歪の卓越振動数は、地盤加速度前半の場合と同様、0.5～0.8 Hzであり、管と地盤は同一の周波数特性を示している。

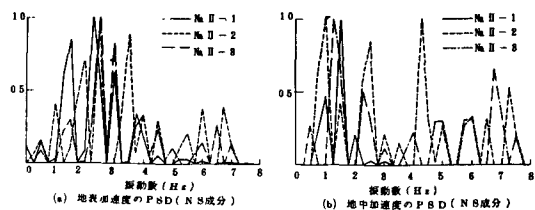


図6 地盤加速度のPSD曲線

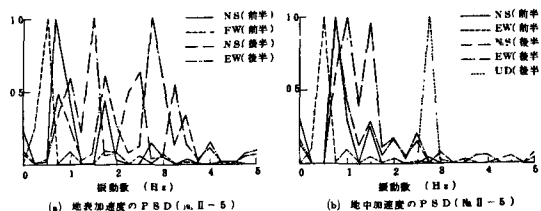


図7 地盤加速度のPSD曲線

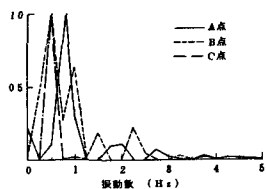


図8 軸歪のPSD曲線 (NO. II-5)

### 3.3 基準による管応力と実測応力との比較

告示<sup>1)</sup>では設計基盤面の水平震度より応力を計算するようになっているが、著者らは地表面の水平最大加速度(水平2成分の最大値)と重力加速度との比を地盤別補正係数で割ったもの<sup>3)</sup>を設計基盤面における設計震度とした。基準で求めた応力と実測応力を表4.5に、また、設計基盤面の加速度に対する応力の計算値と実測値を図9に示す。結果を要約すると以下のとおりである。

- (i) 最大実測応力は基準で求まる応力 $\sigma_L$ よりもつねに小さい。
- (ii) 基準で求まる応力 $\sigma_L$ は観測点Ⅱのような良好な砂質地盤に対しては設計上はほぼ妥当な値を与え、観測点Ⅰのような粘性土でN値の低い地盤では実測値より過大な値を与えると考えられる。
- (iii) 今回の測定値に関する限り基準の合成応力 $\sigma_X$ は、実測値より極めて過大な値となっている。

### 4. 解析的検討

浜田<sup>4)5)</sup>の解析モデルを用いて観測点Ⅰの埋設管について、地震応答解析を実施し、実測値との比較を行った。入力地震動には、I-7宮城県沖地震の観測点Ⅰにおける管軸方向(X方向)の加速度波形を用いた。地盤は図1(a)における砂礫層以上の表面層のみをモデル化した。解析モデルの1部を図10に、また、埋設管路で考慮した領域を図11に示す。なお、地盤の質点分割は管軸X方向に計15分割とした。ただし、立坑近傍曲管部では2m前後、他は10m前後間隔となっている。地盤の弾性係

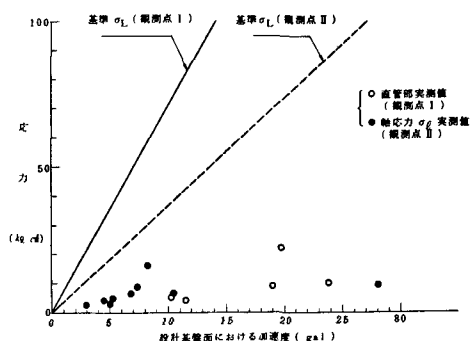


図9 設計基盤面加速度と管応力

表4 観測点Ⅰにおける応力						表5 観測点Ⅱにおける応力						
地震系	実測値 (kg/cm²)	基準 (kg/cm²)			実測値 (C <sub>1</sub> )	地震系	実測値 (kg/cm²)	基準 (kg/cm²)			実測値 (C <sub>1</sub> )	
		軸応力 $\sigma_L$	曲応力 $\sigma_B$	合成応力 $\sigma_X$				軸応力 $\sigma_L$	曲応力 $\sigma_B$	合成応力 $\sigma_X$		
I-1	4.0	82.9	7.5	145.6	1/20.6	Ⅱ-1	8.8	1.9	27.0	1.1	47.7	1/81
I-2	9.0	185.4	12.8	289.5	1/15.0	Ⅱ-2	6.2	0	25.8	1.0	44.7	1/4.0
I-3	-	89.9	8.1	60.0	-	Ⅱ-3	6.5	0	88.8	1.5	68.6	1/6.0
I-4	-	48.4	4.4	85.6	-	Ⅱ-4	4.0	0	16.7	0.7	29.5	1/4.2
I-5	5.0	72.6	6.6	128.4	1/14.5	Ⅱ-5	16.0	2.7	80.8	1.2	58.5	1/2.0
I-6	10.1	169.6	15.4	300.0	1/16.8	Ⅱ-6	4.5	0	19.2	0.8	33.9	1/4.0
I-7	2.2	140.8	12.7	248.1	1/6.8	Ⅱ-7	2.5	0	11.1	0.4	19.6	1/4.4
						Ⅱ-8	9.7	0	18.6	0.7	82.9	1/6.9
						Ⅱ-9	25.0	0	108.7	4.1	183.2	1/10.9

地盤別補正係数 観測点Ⅰ: 1.47  
 観測点Ⅱ: 1.88  
 合成応力  $\sigma_X = \sqrt{0.12\sigma_L^2 + \sigma_B^2}$

数は、基準によるせん断弾性波速度より求め、地盤の減衰定数は一律に1.0と仮定した。また、地震入力方向は管軸方向のみとし、入力波形は図4(a), (b)の加速度で前半部、後半部の(a) - (b)部分を分けて取扱った。なお、境界条件は図11の点①を完全固定、点②を自由、点③をX, Z方向固定、Y方向自由とした。

図12, 13に観測点Cの管軸方向応力に対する応答計算結果と実測応力とを入力加速度とともに図示した。これより、地震前半、後半いずれの場合も解析応力波形と実測応力波形とで妥当な一致がみられない。ただし、最大応力のみで比較する限り、σ解析/σ実測は、前半部で6.0、後半部で0.8となり、地震後半部では実測値と近い値を与える。

### 5. 結 言

得られた結果を列記すると次のごとくである。

- (1) 管路に生じる歪は地震波の振動数が低い時点(0.5 ~ 0.8 Hz)で最大となる。
- (2) 直管部に生じる歪は軸歪が卓越する。軸歪/曲げ歪 ≒ 5.0
- (3) 管歪の卓越振動数は地盤と同様の周波数特性を示すことから、管と地盤はほぼ同一挙動をしているものと考えられる。
- (4) 観測された管応力は基準の1波動入力で計算された応力よりも小さく、とくに、粘性土地盤においてその差が著しい。
- (5) 基準で規定されている5波動入力で計算された合成応力は実測値より極めて大きい。
- (6) 浜田らの解析モデルによる地震応答計算を一例として実施したが、実測値との妥当な一致がみられなかった。

おわりに、本結果のとりまとめにあたり、東大久保慶三郎教授、京大後藤尚男教授から貴重な御助言を頂いたことを記し、謝意を表します。

### 参考文献

- (1) 石油パイプライン事業の事業用施設の技術上の基準の細目を定める告示、通産省、運輸省、建設省、自治省、告示第1号、官報、号外125号、1973.9
- (2) たとえば、桜井；地盤の震動解析に基づく埋設パイプラインの耐震性の研究、昭46、(3) 土田ら；地震動の多点同時観測にもとづく埋設パイプラインの耐震性の一考察、第14回地震工学研究発表会講演概要、1976、(4) 浜田ら；沈埋トンネルの地震応答計算、土木学会第26回年次学術講演会講演集第I部、昭46、(5) 浜田ら；実測および数値解析による沈埋トンネルの地震時応力、第14回地震工学研究発表会講演概要、1976。

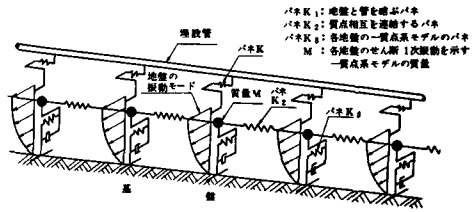


図10 地震応答解析モデル

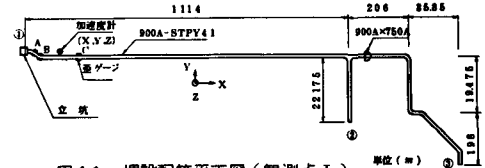


図11 埋設配管平面図(観測点I)

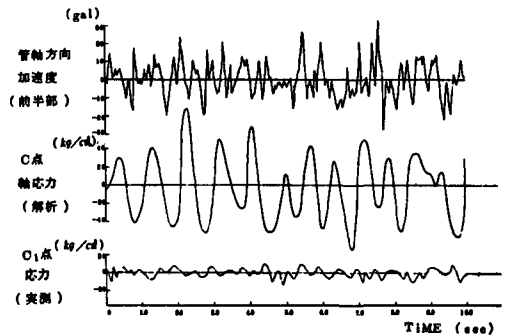


図12 入力加速度と応力の時刻歴(実測値との比較)

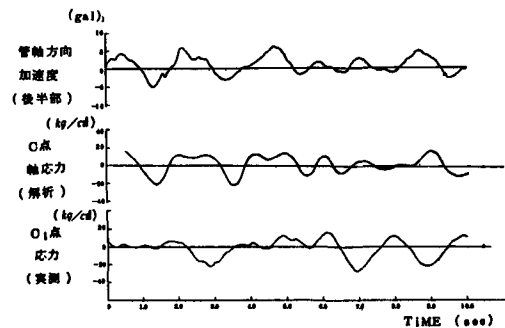


図13 入力加速度と応力の時刻歴(実測値との比較)