

1 まえがき 八戸市白山系埋設導水鋼管は、石油パイプライン技術基準（以下石パ基準）に準じて耐震設計がなされ、またこの管路では地盤、導管およびその付属物の地震時挙動を把握し、安全性を確認するため地震応答観測が行なわれている。本報告は、これまでに得られた記録について検討を加えたものである。

2 地震観測 観測地点はSt.1～St.12で、各St.での観測内容は図-1にまた、観測項目は、①岩盤（St.12）および表層地盤面（St.6）における3成分加速度、②導管および埋設地盤における管軸および直角方向2成分加速度、③導管のひずみ、④ベローズ管の伸縮量、⑤弁室の加速度、である。記録地震の発震時、八戸市での震度、岩盤での加速度を表-1に示した。

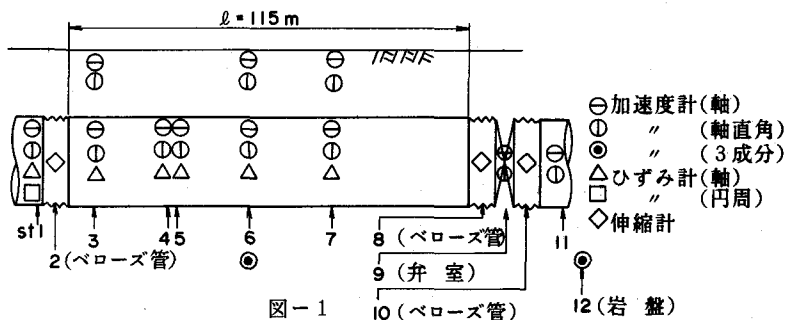


図-1

3 地盤応答解析 3-1 地盤モデル 埋設地盤特性は、St.6近傍でボーリング調査、P・S検層が行なわれた。測定結果および計算モデル地盤系を図-2に示す。なお、このモデル化には以下の事項を考慮した。①基盤の設定： St.12において露頭岩盤の加速度を観測しているが、図-2に示すようにこの岩盤は集塊岩で、St.6における深度31.6m以深の集塊岩に相当する。この集塊岩はS波速度が1500m/Sで、St.12での記録を基盤データとして用いる。②地盤モデル： 地盤モデルはS波速度区分を基準とし、地盤の単位体積重量は同一S波速度地盤層の平均値を用いる。

NO.	発震時 月日	震度	岩盤加速度 gal			
			N-S	E-W	U-D	(3成分)
1	6 16	Ⅱ	2.4	1.1	2.8	(3成分)
2	6 18	Ⅱ	0.5	0.6	0.5	(3成分)
3	9 20	Ⅲ	3.1	1.8	2.3	(3成分)
4	10 30	Ⅲ	3.1	5.2	4.0	(3成分)

表-1

3-2 増幅度スペクトル 図-2に示した地盤モデル系で、基盤と地表間での増幅度スペクトルを求めると図-3となる。これによると、3～6Hzにピークが認められる。

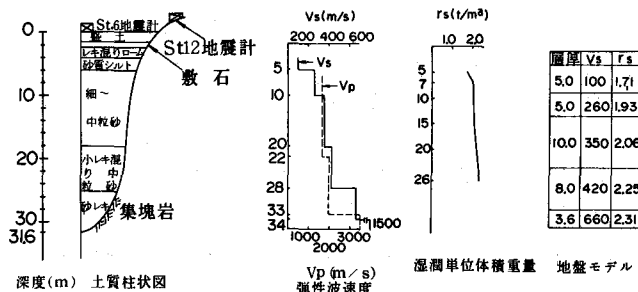


図-2

3-3 地震波形 地盤モデルの適合性を検討するためにNO.1地震について、St.12のN-S成分を基盤入射波、St.6の同一成分を地表のものとして上記地盤モデル系にそれぞれ挿入し、重複反射理論で計算した結果を図-4に示す。また4波形それぞれのフーリエスペクトルを図-5に示す。

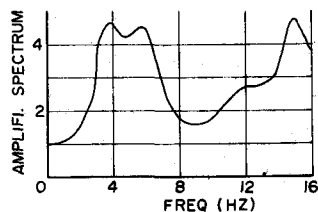


図-3

した。この結果、①基盤および地表面ともに観測波と計算波の振幅値がほぼ一致し、また②基盤への入射波より計算された地表面での地震波は、地表面観測波と同様の周波数特性を示す。しかし、基盤においては観測波と計算波とが異なった周波数特性を示している。このことは、基盤の地震波から地表の地震波を求めるのはよいが、地表の地震波より基盤での地震波を推定することには問題があると考えられる。

4 観測記録および解析結果

4-1 基盤加速度と導管応力との関係

4回地震における発生応力を石パ基準に

基づいて求め、観測された応力と比較する。

なお、表層地盤内に発生するひずみの大きさが異なると、地盤の動力学的性質が異なってくると言われており⁽¹⁾、石パ基準では大規模地震を想定し、S波速度の $\frac{1}{2}$ を計算上採用している。しかし、ここで取扱うものは小規模地震で、4回地震の地盤に生じたひずみは 10^{-4} 以下であり、観測S波速度を補正なしで用いることにした。前提条件は、水道鋼管（外径 $D=122\text{Cm}$ 管厚 $t=16\text{mm}$ ヤング率 $E=2.1 \times 10^6 \text{Kg/cm}^2$ ）、地盤（表層地盤厚 $H=3.16\text{m}$ 湿潤単位体積重量 $\gamma_s=1.71\text{t/m}^3$ 基盤S波速度 $V_{0s}=1500\text{m/S}$ 表層下端S波速度 $V_s=660\text{m/S}$ 管埋設深さ $H_p=2\text{m}$ ）である。石パ基準で求めた応力と観測応力との関係は図-6となる。なお、基盤の最大加速度としては、観測水平2成分中の最大値を用いた。これによると、発生応力は基盤加速度に比例する傾向がみられ、石パ基準による計算値に近い

4-2 導管および地盤の加速度

地中埋設管は地盤挙動と密接に関連していることはこれまで多く指摘され、また、石パ基準では、導管と地盤は同一挙動を示すとの仮定がなされている。本管路でもこの点に着目し、St. 3, 6, 7において導管および地盤の管軸および直角方向加速度を観測している。この検討のため、代表的なNO.4地震についてSt. 3, 6で記録された導管および地盤の加速度波形を示すと図-7で、また、各記録のフーリエスペクトルは図-8である。St. 3における記録のフーリエスペクトルをみると、管軸および直角方向ともに導管と地盤は同一の周波数特性を示している。卓越振動数は、管軸方向が 2.3Hz 、管軸直角方向が $2.4 \sim 4.5\text{Hz}$ である。St. 6においても導管と地盤は同一の周波数特性を示している。卓越振動数は管軸方向がSt. 3と同様に 2.3Hz であり、管軸直角方向では 3Hz 前後でSt. 3とはやや異なった特性を示している。このことより、導管と地盤の挙動は密接に関連し、成分別では、管軸方向においては各地点で同一の

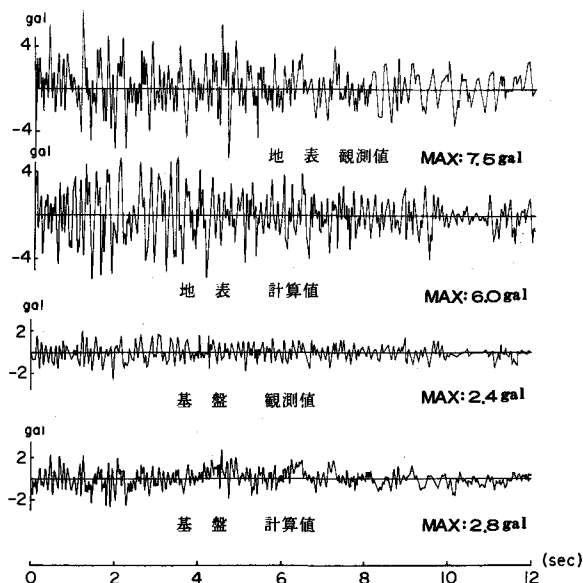


図-4

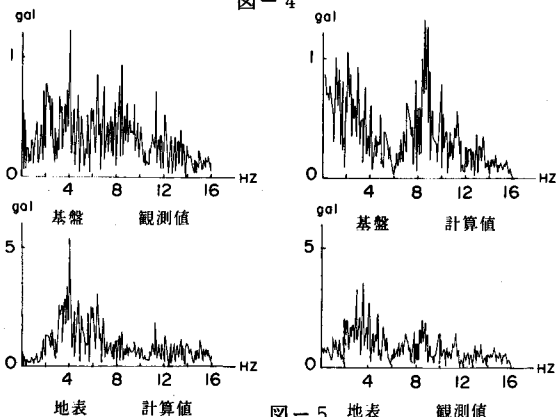


図-5 地表 観測値

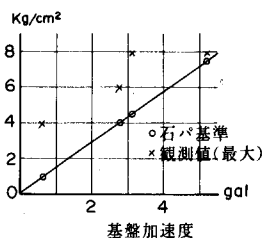


図-6

周波数特性を示すが、管軸直角方向においては各地点で異なる。これは地層の成層が画一的でない事が原因していると考えられる。

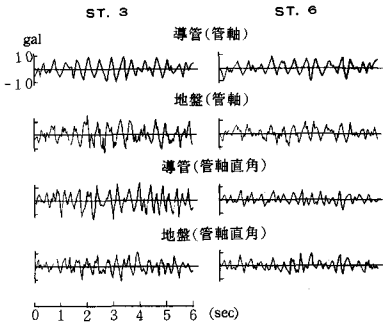


図-7

4-3

導管のひずみおよびベローズ管の伸縮 NO.4地震の導管ひずみおよびベローズ管の伸縮についての各記録を同一時間軸で比較し、図-9に示す。ひずみ記録は3地点ともにほぼ同一挙動を示している。つまり、圧縮および引張りひずみのピーク時が3地点でほぼ一致しており、時間差を読み取ることができない。また、周期は0.40~0.46秒である。St.4、6間の距離 θ は23mで、2点間のひずみ記録に時間差が認められない点を考え合わせると、地盤変位の管軸方向へのみかけの波長 L_x が θ に比べてかなり長いことがわかる。 L_x は実際の波長 L と導管への入射角 θ より次式で求まる。

$$L_x = L / \cos \theta \quad (1)$$

石が基準にしたがえば $L = 230m$ と計算上得られ、したがって θ は 90° に近い値と推測される。つきに、ひずみとベローズ管伸縮挙動の関係に着目すると、ベローズ管の伸縮周期は0.42秒前後でひずみの周期と一致し、また、図-9に示すように、ひずみの引張りおよび圧縮のピーク時とベローズ管の伸びおよび縮みのピーク時が一致している。これは、導管に発生したひずみをベローズ管が解消しようと正常に機能していることを示し、また、ひずみと伸縮量との間に時間差が認められない点は、みかけの波長 L_x が長いことより理解される。ひずみ、ベローズ管伸縮の周期が0.40~0.46秒であることは先に述べたが、これは図-8に示すSt.3、6における地盤および導管の管軸方向卓越周期と一致し、管軸直角方向卓越周期とは異なっている。これより、管軸方向応力は、曲げによる影響は小さく、主として軸ひずみによって生じると考えられる。

4-4 ベローズ管を有する導管の解析 図-10に示すSt.2~8間

115mの導管における、NO.4地震の際の応力解析を行う。ベローズ管のたわみ性より、境界条件として両端の応力が0であるとする。図-11に示すように地震波が正弦波として進行するとき、導管の変位 U_x 、応力 σ_x は次式で表わされる。

$$U_x = U_{xs} \cdot \sin 2\pi (T/T_0 - X/L_x) + C_1 \cosh \lambda x + C_2 \sinh \lambda x \quad (2)$$

$$\sigma_x = \sigma_{Lc} \cdot \cos 2\pi (T/T_0 - X/L_x) + \lambda E (C_1 \sinh \lambda x + C_2 \cosh \lambda x) \quad (3)$$

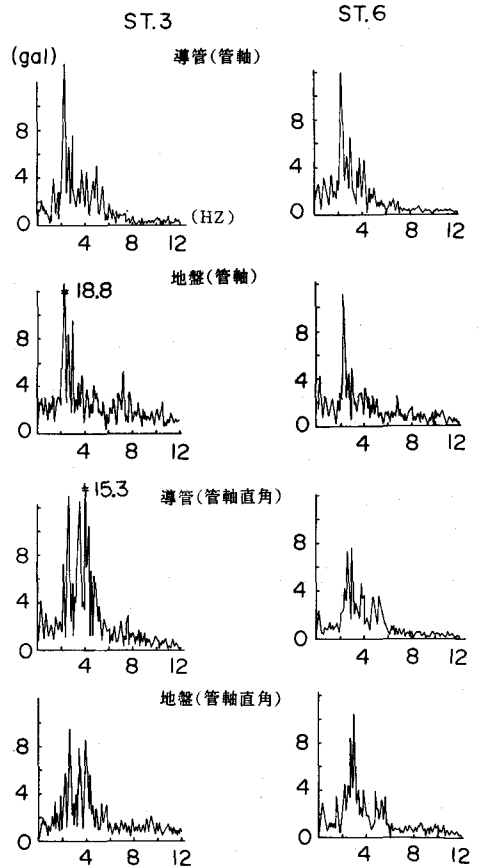


図-8

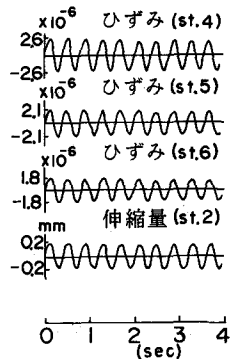


図-9

ここで、 r_s, D, E, t は4-1節と同様、管長 $l = 115 \text{ m}$ 導管位置S波速度 $V_s = 100 \text{ m/S}$ (S波測定より) 表層地盤固有周期 $T_0 = 0.4 \text{ S}$ (ひずみ、ペローズ管伸縮の周期より) 波長 $L = 40 \text{ m}$ ($=V_s \cdot T_0$) 応答速度の基準値 $S_v = 7.3 \text{ Cm/S}$ 入射角 $\theta = 8.5^\circ$ 基盤震度 $ko_h = 0.0053$ 表層地盤変位 $U_h = 0.203 \cdot T_0 \cdot S_v \cdot ko_h$ みかけの波長 $L_x = L / \cos \theta$ 地盤の剛性係数 $K_1 = 3 \cdot r_s \cdot V_s^2 / g$ $K = K_1 / \pi D$ $\lambda = \sqrt{K / Et}$ $U_{sx0} = U_h \sin \theta$ $U_{xs} = U_{sx0} / \{1 + (2\pi / \lambda L_x)^2\}$ $\sigma_{LC} = -2\pi \cdot U_{xs} \cdot E / L_x$ C_1, C_2 : 境界条件より求まる定数、で境界条件として $q_{x=0} = 0, q_{x=l} = 0$ を適用すると管路全体の応力が、(3)式により求まる。管路各部の最大応力と観測された最大応力とを比較すると図-12である。

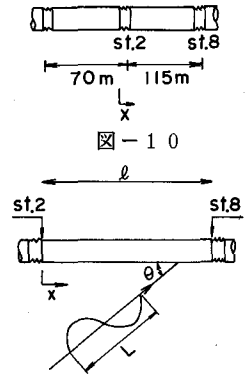


図-10

4-5 ペローズ管伸縮の解析 (2)式に基づきSt.2におけるペローズ管左右両端の変位 $U_{x=0} \text{ 右}, U_{x=0} \text{ 左}$ を求めることにより、ペローズ管の伸縮量 Δl は次式で算定される。

$$\Delta l = U_{x=0} \text{ 右} - U_{x=0} \text{ 左} \quad (4)$$

最大伸縮量を求めると0.13mmである。一方、観測結果は0.2mmで、これより、ペローズ管はほぼ計算値程度に伸縮し、応力を減少させているものと推定される。

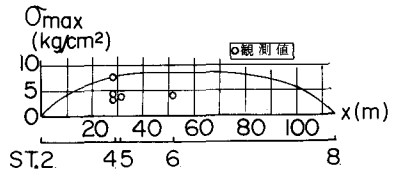


図-12

5 まとめ 観測された地震波が小規模のため、全体を線形挙動とした取扱いで説明がほぼ可能で、特筆すべきものがないが、確認事項を列記すると次のごとくである。

- 1) 重複反射理論により、基盤入射波から求めた地表面での地震波は、観測波とよい一致を示すが、一方、地表面地震波より求めた基盤での地震波は、観測波と異なった性質を示している。
- 2) 観測された導管応力は、基盤加速度に比例する。
- 3) 導管と地盤の挙動は密接に関連しており、管軸および直角方向ともに同一の周波数特性を示している。管軸方向では、距離4.4mの2地点で同一の周波数特性を示すが、管軸直角方向においては、両地点で異なる特性を示している。
- 4) 地震波の導管への入射角 θ は 9.0° に近い値と考えられる。
- 5) St.2におけるペローズ管は、ひずみを減少させるよう正常に機能している。
- 6) 管軸方向応力は曲げの影響が小さく、軸ひずみの影響が大きく常識的である。

〔謝辞〕 本観測は八戸市水道部関係者各位の御協力により遂行されており、紙面を借りてここに深甚なる謝意を表する。

参考文献

- 1) 石原研而：粘性土の動的性質 土木学会第26回年次学術講演会
- 2) たとえば 桜井彰雄：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 昭和46年
- 3) 宮島信雄, 宮内二郎, 上野和栄：埋設導管の地震時応力 第4回日本地震工学シンポジウム
- 4) 宮島信雄, 宮内二郎：静的摩擦に基づく埋設管の地震時応力計算法 埋設管に関するシンポジウム
- 5) 日本道路協会：石油パイプライン技術基準案 1974年