

運輸省港湾技術研究所

# 港湾技術研究所 報告

---

---

REPORT OF  
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH  
INSTITUTE  
MINISTRY OF TRANSPORT

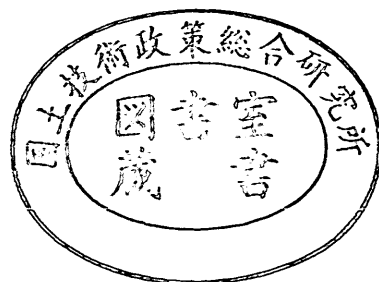
---

VOL. 20

NO. 4

DEC. 1981

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



# 港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第20巻 第4号 (Vol. 20, No. 4), 1981年12月 (Dec. 1981)

## 目 次 (CONTENTS)

1. 地震動の多点同時観測に基づくパイプラインの応力の検討  
……土田 肇・南 兼一郎・清宮 理・倉田栄一・西沢英雄…… 3  
(Stress of Buried Pipe during Earthquakes Based on Two Dimensional Seismometer  
Array Observation……Hajime TSUCHIDA, Ken-ichiro MINAMI, Osamu KIYOMIYA  
Eiichi KURATA and Hideo NISHIZAWA)
  
2. 水との連成を考慮した大型混成式防波堤の振動特性と動水圧  
……上部達生・野田節男・千葉忠樹・檜垣典弘…… 41  
(Coupled Hydrodynamic Response Characteristics and Water Pressures of Large  
Composite Breakwaters  
……Tatsuo UWABE, Setsuo NODA, Tadaki CHIBA and Norihiro HIGAKI)

# 1. 地震動の多点同時観測に基づくパイプラインの応力の検討

土 田 肇\*・南 兼一郎\*\*・清 宮 理\*\*\*  
倉 田 栄一\*\*\*\*・西 沢 英雄\*\*\*\*\*

## 要 旨

地震動によって埋設パイプラインに生じる応力は、地震動の加速度よりもパイプラインの軸方向に沿った地震動の変位の分布に支配される。しかし、現状では、実際に多点に地震計（換振器）を設置して地震動を観測することは、極く少数の例に限られている。港湾技術研究所は、1974年4月より東京国際空港（羽田空港）で延長2500mの測線上に500m間隔で6点に地震計を設置し、地震動の多点同時観測を実施している。

本報告では、その観測で得られた地震記録（1974年～1981年）のうち主要な8個の地震を対象として、次に示す解析を行っている。地震計設置位置を連ねた直線位置にパイプラインが埋設されており、パイプの変形は周辺地盤の変形と全く等しいと仮定する。加速度記録を積分して得られる各測点での変位波形から、各時刻のパイプラインの変位の分布形を求め、それをもとにして、パイプのひずみ、応力度を計算する。それらの値と変位法に基づく既往の計算法（石油パイプライン事業法に基づく省令、告示およびBART・衣浦法）から得られる値とを比較する。主要な結論は、次のとおりである。

① 地表面から工学的基盤面（ $N$ 値50以上、 $V_s \geq 300$  m/s）までの深さがほぼ一定の地盤の場合、石油パイプライン事業法に基づく省令、告示により求めたパイプの軸方向応力度は、観測に基づいて計算した値の4倍以上であった。

② パイプに生じた応力度と地震の震央距離、震源の深さ、マグニチュードおよびパイプラインの軸方向と震源方向とのなす角度との間には密接な関係があった。

---

\* 構造部長  
\*\* 構造部 沈埋構造研究室長  
\*\*\* 構造部 主任研究官（構造解析担当）  
\*\*\*\* 構造部 耐震構造研究室  
\*\*\*\*\* 構造部 沈埋構造研究室

## Stress of Buried Pipe during Earthquakes Based on Two Dimensional Seismometer Array Observation

Hajime TSUCHIDA\*  
Ken-ichiro MINAMI\*\*  
Osamu KIYOMIYA\*\*\*  
Eiichi KURATA\*\*\*\*  
Hideo NISHIZAWA\*\*\*\*\*

### Synopsis

The stress caused in buried pipes by earthquake ground motion is mainly influenced by relative ground displacement along pipelines rather than ground acceleration. Very few field observations which can provide information on relative ground displacement are carried out. The earthquake observation with a seismometer array has been carried out by the Port and Harbour Research Institute. The six accelerometers (each has two horizontal components) have been installed at every 500 m on the straight line in the Tokyo International Airport. Eight records from this observation were selected for the analysis. A pipeline was supposed to be buried along the straight line and its deformation was assumed to be entirely same as that of the ground. The deformation of the ground was calculated by integrating the recorded ground acceleration. The pipe stresses were calculated according with the design code which is Ordinance of Technical Code for Petroleum Pipeline and with the BART-Kinuura method. The stresses by both methods were compared with the pipe stresses based on the observation.

Main conclusions are as follows:

1) The pipe stresses calculated by Ordinance of Technical Code for Petroleum Pipeline were four times as large as the value based on the observation at the place where the ground condition was almost uniform.

2) The pipe stress depended on the epicentral distances, the depths of epicenter, magnitude, azimuth between the longitudinal direction of pipelines and the directions of wave propagation and so on.

---

\* Director of Structures Division

\*\* Chief of Subaqueous Tunnels and Pipelines Laboratory, Structures Division

\*\*\* Senior Research Engineer, Structures Division

\*\*\*\* Member of Earthquake Resistant Structures Laboratory, Structures Division

\*\*\*\*\* Member of Subaqueous Tunnels and Pipelines Laboratory, Structures Division

## 目 次

要 旨	3
1. ま え が き	7
2. 研究の背景と方法	7
2.1 パイプラインの地震時挙動	7
2.2 関連研究と耐震設計法	7
2.3 研究方法の概要	8
3. 多点同時観測システムの概要	9
3.1 観測の概要	9
3.2 土層構成	10
3.3 観測装置	11
3.4 記録の処理	13
4. 対象地震	13
5. 観測地震動に基づいて計算したパイプの応力度	17
5.1 計算方法	17
5.2 計算結果	19
6. 既往の計算法によるパイプの応力度	25
6.1 計算方法	25
6.2 計算結果	29
7. 観測地震動に基づいて計算したパイプの応力度と既往の計算法によるパイプの応力度の比較	31
8. 結 論	34
9. あとがき	35
参考文献	35
付 録	36

## 1. まえがき

地中埋設パイプラインは市民生活および産業活動にとり重要な施設のひとつである。パイプラインによって輸送されるものには、原油、石油精製品、ガス、飲料水、工業用水、排水などがある。港湾・空港との関連に着目して考えれば、パイプラインにより輸送される主なものは、原油、石油精製品、ガス等である。将来は、スラリー状とした石炭等の輸送が実現するかも知れない。現在までに完成したパイプラインおよび現在工事中のパイプラインで港湾・空港に関連するものの2, 3の例を挙げれば、京葉シーバースパイプライン（延長 7668 m）、伊勢湾シーバースパイプライン（延長 8700 m）、新東京国際空港燃料パイプライン（延長 45000 m）、阿賀沖パイプライン（延長 11200 m）などである。将来は、より大規模な海底パイプラインが建設されることも考えられる。

埋設パイプラインの建設において検討される重要な技術項目のひとつは耐震性である。本報告では、地震動により埋設パイプラインに生ずる応力を、実際に観測された地震動にもとづいて計算し、これを現在用いられている設計法により計算される値と比較する。それによって、現行の設計法の適用限界をより詳細に把握し、かつ設計法の改良の途を見出そうとするものである。研究方法の詳細とその背景は次節で説明する。なお、次節以降では、簡単のため埋設パイプラインおよび埋設パイプの埋設は省略する。また、対象とするパイプラインは、直管でかつ材料は鋼材と仮定する。

## 2. 研究の背景と方法

### 2.1 パイプラインの地震時挙動

パイプラインの見掛けの単位体積重量は、その内容物を含めても、土の単位体積重量と大差ない。したがって、パイプラインに作用する慣性力は、同体積の地盤に作用する慣性力と大差ない。また、パイプラインが地盤中に占める体積は小さい。それゆえ、パイプの剛性が程度に大きくない限り、パイプラインの存在が周辺地盤における地震動に与える影響は無視できる。パイプの剛性に関しては、後に詳しく説明するが、現在用いられている設計法による試算ではパイプの変形と地盤の変形が大差ないことが示される。設計法が現象を完全に表現するものではないかも知れないが、前記のことを考慮すると、パイプの存在がその周辺地盤の地震動に及ぼす影響

は無視し得ることがわかる。

逆にパイプの側から現象を考えてみる。パイプに作用する慣性力は同体積の地盤に作用する慣性力と大差なく、その変形も周囲の地盤の変形と大差ないのであるから、パイプが独自に大きな応答を示すことは考えられない。したがって、地震動として地盤が変形すると、パイプもそれにつれて変形し、パイプの剛性によって若干地盤の変形と異なった変形をする。パイプの変形と地盤の変形の差はパイプの剛性と地盤の剛さの相対的關係により変化する。前記のごとく、通常考えられるパイプラインでは両者の差は大きくはない。以上から明らかなように、パイプラインの挙動は、地盤とパイプの相互作用としてとらえることができる。しかも、先に説明したように、パイプに作用する慣性力の影響は小さいので、静的相互作用として取扱うことができる。換言すれば、ある瞬間の地盤の変形が与えられれば、その時のパイプの変形が求まり、一般にはその変形は地盤の変形よりやや小さいと考えられる。したがって、パイプの変形が地盤の変形と同じとすることは、設計という観点からは、安全側の設定である。

パイプの変形は、地盤の各部分間に相対変位があることにより生ずる。相対変位はパイプの軸方向の成分と軸直角方向の成分に分けることができる。前者によってパイプには伸縮が生ずる。これによるパイプの応力は、パイプの軸直角断面内では一様である。後者によってパイプには曲げが生ずる。これによるパイプの応力は、パイプの軸直角断面内では一様でない。これは、はりの曲げ応力と同じである。

以上のことは、力学的考察から導かれるものであるが、実験的にもこれを裏付ける結果が得られている<sup>1)~3)</sup>。

これまでに記したところは、パイプと地盤の間にすべりが生じない状態を想定したものであった。しかし、地盤の変形が大きくなると、パイプと地盤の間にすべりが生ずることが考えられる。その場合には、パイプの変形は地盤の変形よりも顕著に小さいものとなるであろう。したがって、パイプの変形が地盤の変形と同じと考えた設計は余裕を見過ぎた設計となる可能性がある。

### 2.2 関連研究と耐震設計法

パイプラインの耐震性に関する研究のひとつの分野は、地震動を受けるパイプの挙動の把握である。これは、現在のところ、力学理論に基づく考察と実験結果の解析により、前項で説明したように考えられている。このパ

パイプの地震時挙動にもとづいて考えれば、検討を進めるべき研究は次のように大別できる。それは、地盤における地震動、換言すれば地盤の変形を予測するための研究と地盤における地震動が与えられたときにパイプの変形を求める方法についての研究である。このほかに、地震動により液状化現象のように地盤が不安定な状態となることについての研究も必要であるが、それは既に耐震工学の中での独立した1分野として研究されているので、ここではふれない。

地盤における地震動の予測もまた、パイプラインの耐震設計に限らず、すべての構造物の耐震設計に重要な事項で、耐震工学の中の独立した1分野として研究されている。しかし、パイプラインとの関連で重要なことは、地盤の変形を予測したいということである。したがって、地盤上の1点1点における地震動を独立に予測するのではなく、地盤のある範囲内の各点についての地震動を時間的に対応をつけながら予測することが必要なのである。そのための研究は、観測による場合は多測点における地震動の同時観測等であり、解析による場合は地盤内の地震波の伝播あるいは地盤の地震応答の研究である。従来の工学的地震観測は1点ごとに独立した地震動の観測が中心であった。しかし、前記のような認識から多点での同時観測が行われるようになってきた。著者らの所属する港湾技術研究所もこのような観測を実施し、データを蓄積してきた<sup>4)~6)</sup>。多数の地震計を組織的に配置した観測網をアレー (Array) または群列と呼ぶ。時には高密度観測網と表現することもある。

地盤の変形が与えられたときにパイプの変形を求める方法についての研究は、方法そのものの研究とそこで用いる定数についての研究が考えられる。前者については、既に説明したように、地盤とパイプの静的相互作用の考え方で求め得ることが明らかにされた。より具体的には、パイプを弾性支承上のはりとして解析する方法がある。ほかに、有限要素法により解析することも考えられるが、実用性を考えれば、弾性支承上のはりとするほうが便利と思われる。また、現在のパイプラインの耐震設計でもそのような解析方法を用いている。埋設した管状体と地盤の静的相互作用が弾性支承上のはりとして解析できること、およびそのときに用いるべき定数については、青木が室内模型実験により検討している<sup>7)</sup>。

実際にパイプラインの耐震設計を行うための方法は、地盤中の地震波の伝播あるいは地盤の地震応答についての考え方にもとづいて地盤の変形を求めること、および

地盤とパイプの相互作用の考え方にもとづいてパイプの応力を求めることを組合せたものとなる。耐震設計法の研究としては、青木ほかが地表の1点で得られた地震動が地表に沿って進行する地震動によるものであると仮定してパイプの地震時応力度を計算する方法を提案している<sup>8)</sup>。この方法は以後、BART・衣浦法と書く。

耐震設計法の基準化されたものとしては、パイプラインを用いて石油等の輸送事業を営む場合のパイプラインに適用される技術基準がある。これは、石油パイプライン事業法 (昭和47年法律第105号) にもとづくもので、通商産業省、運輸省、建設省、自治省の4省合同の省令および告示となっている<sup>9),10)</sup>。(以下石油パイプライン技術基準と呼ぶ) 港湾区域内に石油等のための荷役施設の一部としてパイプラインが建設されることがある。この場合は、港湾の施設の技術上の基準の適用を受ける<sup>11)</sup>。この基準にもとづいて、運輸省港湾局より通達が出されており<sup>12)</sup>、さらに、通達の解説が刊行されている<sup>13)</sup>。この通達では、パイプラインの設計には地震を考慮すること、および解説では地震動の水平変位振幅からパイプの応力を求める方法が示されている。ただし、水平変位振幅を求める具体的方法は示されていない。また、パイプラインはこれら基準の適用と同時に、消防法 (昭和23年法律第186号) の適用を受ける。その具体的内容は関係する政令により定められている<sup>14)</sup>。

清宮はパイプラインの設計法の相違によって、設計計算結果として求まるパイプの応力がどのように変化するかを3つの仮想パイプラインについてケーススタディ的に検討している<sup>15)</sup>。

以上、パイプラインの耐震性に関する研究と耐震設計法の現況を説明した。関連研究の説明は次に説明する本研究の方法との関連を意識したものであり、この分野の研究を網らすることを意図したものではない。

### 2.3 研究方法の概要

前項までの説明で明らかのように、パイプラインの耐震設計法は既に提案されたものがあり、技術基準となっているものもある。しかし、それらの提案や技術基準の制定がなされた時点ではパイプラインの地震時応力の実測値は得られておらず、計算値と実測値の照合はなされ得なかった。そのため、設計法は相当に慎重を期したものとなっていたと思われる。したがって、パイプラインの地震時応力と設計計算による値を比較することによって設計法が安全なものであることを実証的に示すことは重要なことである。また、もし設計法が必要以上の余裕

## 地震動の多点同時観測に基づくパイプラインの応力の検討

を有するものであれば、適切な耐震性を有したパイプラインをより経済的に設計できるよう改良していくことも望まれるところである。

先に簡単にふれたように、土田、倉田らは、延長 2500 m の測線上に 500 m ごとに地震計を設置して地震動の同時観測を行ってきた。この結果を用いれば、500 m 離れた点の相対変位、すなわち地盤の変形が求まる。先に説明したように、通常、パイプの変形は地盤の変形と同じと考えても大きな誤差はなく、かつ、その誤差は設計という観点からは安全側のものである。そこで、地震動を観測した地点にパイプが埋設されていると仮定し、地震動の観測結果から求まる地盤の変形と同じようにパイプが変形した場合のパイプの応力を計算し、設計計算から求まるパイプの応力と比較することとした。

なお、ここに述べたことは若干の記録が集積された時

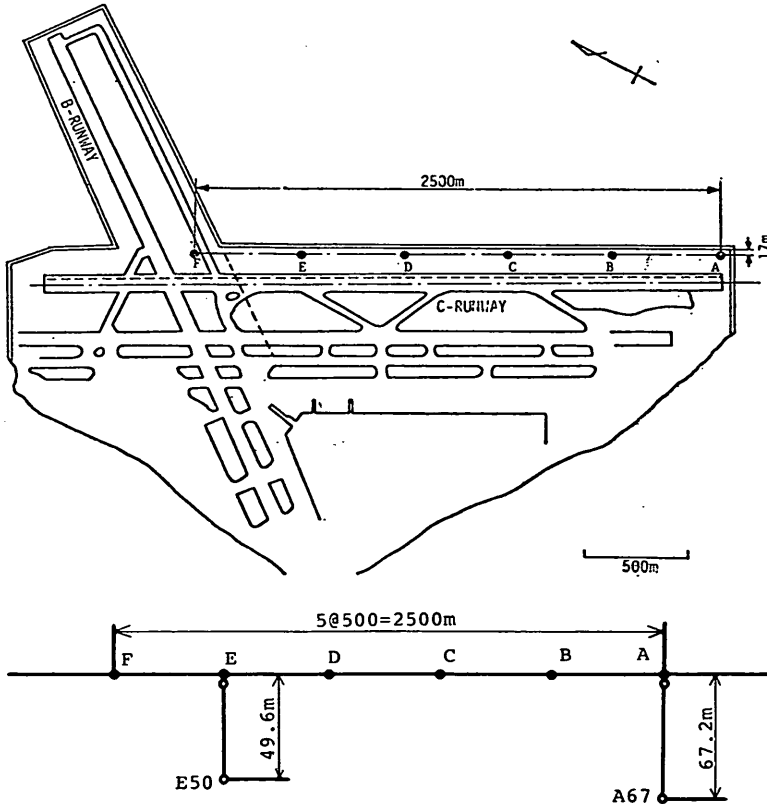
点で実施し、報告した<sup>16),17)</sup>。その後、更に多くの記録も得られ、また、記録の処理方法にも改善があった。それらをふまえ、今回、前記内容について検討することとした。

パイプラインの地震時の挙動は地盤の挙動と不可分であり、パイプラインの耐震性の研究の少なからぬ部分は地盤中の地震波の伝播あるいは地盤の地震応答の研究となってしまう。しかし、本報告における研究では、地盤の地震応答を明らかにするための解析は最小限にとどめた。それらについては、別に詳細な報告が予定されている。

### 3. 多点同時観測システムの概要

#### 3.1 観測の概要

地震計は東京国際空港（羽田空港）のC滑走路に平行に設置されている。地震計の配置を 図-3.1 に示す。地



- 地上地震計（水平2成分）
- 地中地震計（水平2成分・鉛直1成分）

図-3.1 地震計（換振器）配置図



震計は地震動の加速度を記録するものである。図中の地震計の設置位置にA～Fの記号が付されている。以後、各地震計の位置をこの記号を用いて測点Aという工合に記す。また、測点Aから測点Fまでを結ぶ直線を測線と書く。測点AおよびEの下方には地中地震計が設置されているが、これは測点A67およびE50と書く。

観測装置は1974年3月に完成し、同年4月より観測が開始されている。1981年9月現在で84の地震を記録している。本研究では、それらの記録のうち加速度の振

幅が解析可能な程に大きく、かつ現在までに数字化等の基本的解析が完了しているものを選んで使用した。使用した記録の詳細は次節で説明する。

### 3.2 土層構成

測線位置での土質断面図を 図-3.2 に示す。同図には地震計位置も記入してある。また、 図-3.3 および 3.4 に測点AおよびEにおける測線直交方向の土質断面図を示す。これらの断面図は、1974年3月までに羽田空港で実施された土質調査ボーリング 69 本をもとに作成さ

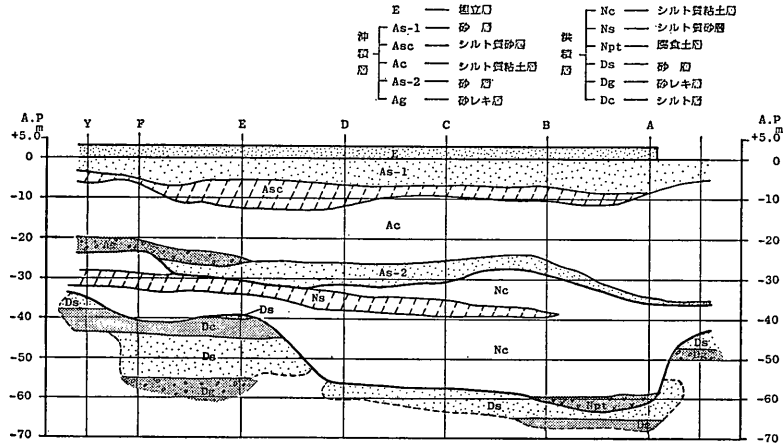


図-3.2 土質断面図 (測線方向)

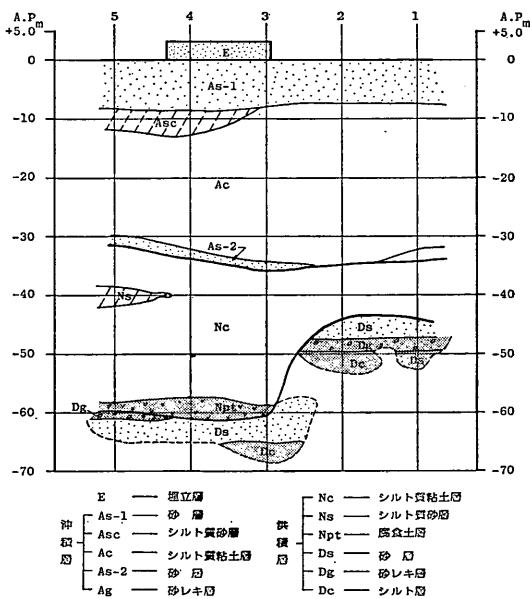


図-3.3 土質断面図 (測点A, 測線直交方向)

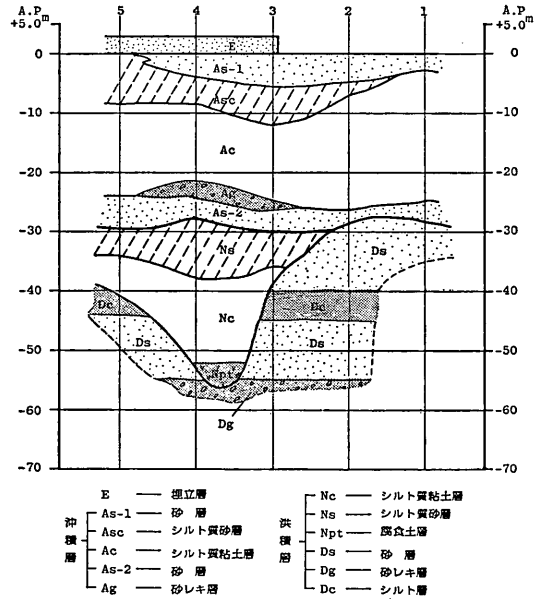


図-3.4 土質断面図 (測点E, 測線直交方向)

地震動の多点同時観測に基づくパイプラインの応力の検討

れたものである。具体的には各ボーリング位置での各土層の境界面の深さを調べ、それに基づいて境界面の等高線図を描き、それをもとに土質断面図を作成した。この方法では個々のボーリング地点の土層境界面の深さは、その周囲で行ったボーリングの結果をも加味した加重平均的なものとなっている。それゆえ、あるボーリング地点を通る土質断面図があった場合でも、土質断面図から求まるその地点の土層構成とその地点でのボーリングから求まっている土層構成とが完全には一致していない。追って説明するが測点AおよびEではボーリングが実施されているが、前記のことは、この両地点にもあてはま

る。この土質断面図は土質コンサルタントの技術者により作成されたものである。

測点AおよびEでは地中地震計が設置されており、そのためにボーリングが行われた。この際に通常の土質調査および速度検層が実施されている。この調査により得られた土質柱状図を図-3.5、3.6に示す。両図には速度検層の結果も示してある。

3.3 観測装置

地震動の観測に用いた装置の構成は図-3.7のとおりである。換振器で地震動の加速度に比例した電気信号が得られる。この信号はケーブルを通じて電磁オシログ

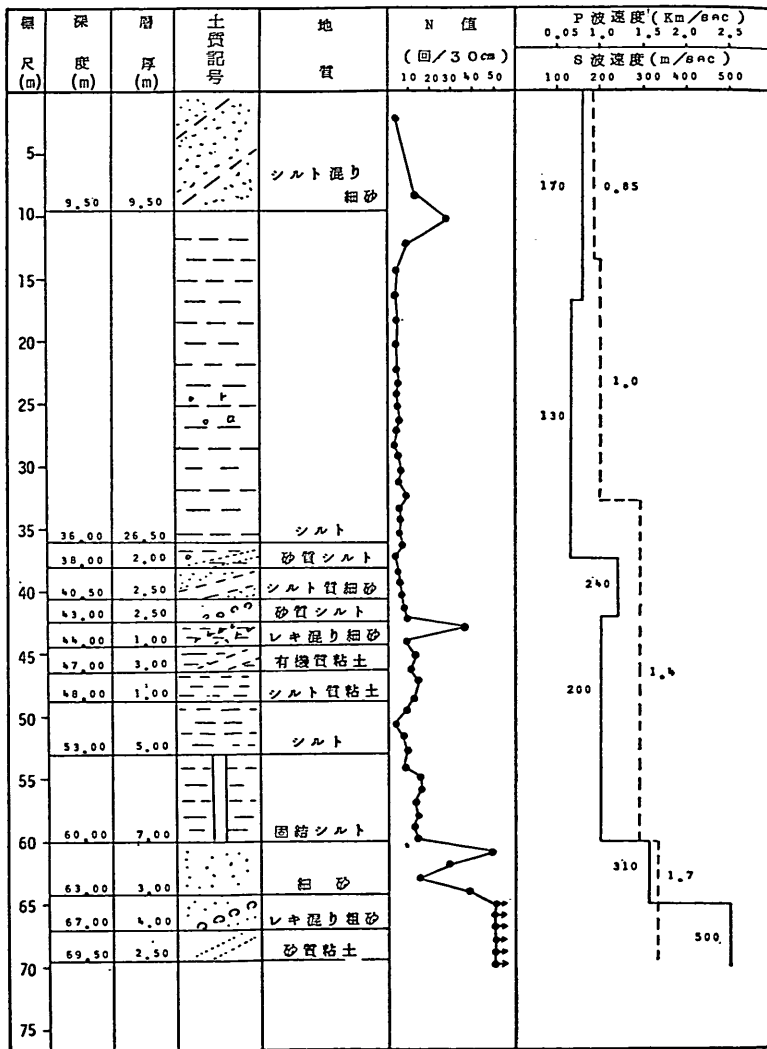


図-3.5 土質柱状図 (測点 A)

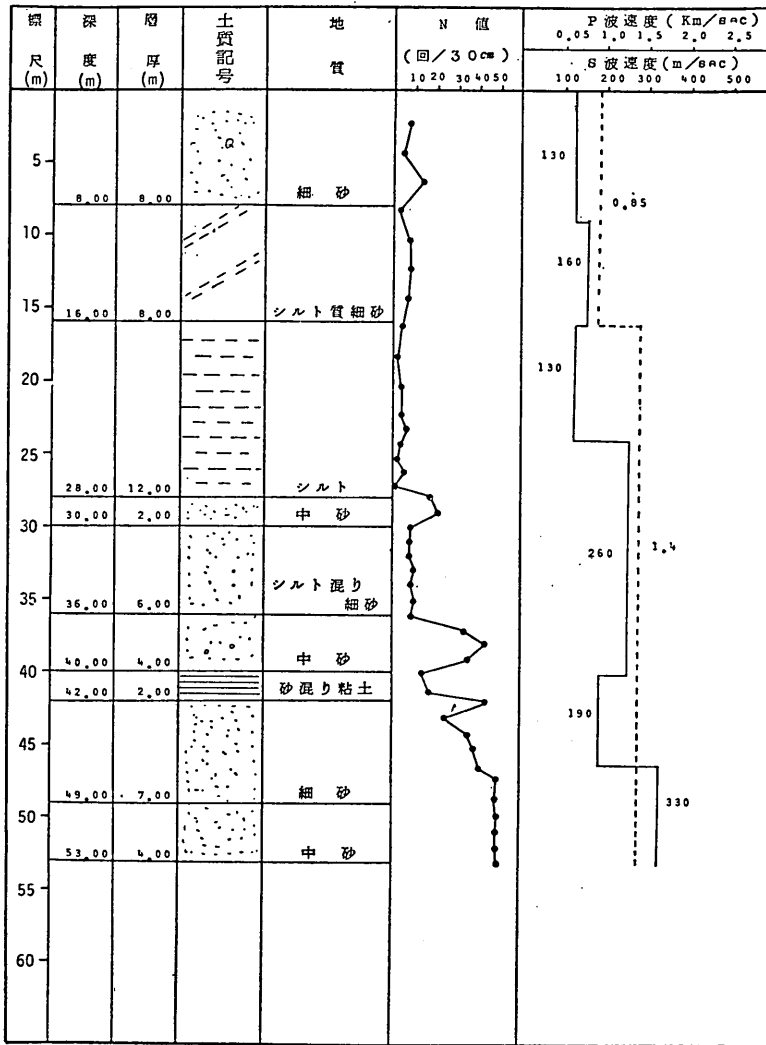


図-3.6 土質柱状図 (測点 E)

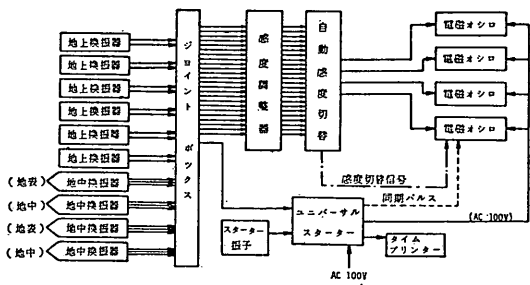


図-3.7 観測装置構成図

ラフに供給され、記録される。換振器と電磁オシログラフのガルバノメータの間には、抵抗器を用いた感度切替回路が挿入されているが、増幅器等のほかの回路は一切挿入されていない。

地上地震計 (換振器) は水平 2 成分のもので、地震動加速度的測線に平行な成分と垂直な成分を観測する。換振器の固有振動数は 2 Hz、減衰定数は 17 以上である。記録器までを含めた地震計の総合感度のほぼ一様な範囲 (感度低下 10% 以内) は、0.1~30 Hz である。地中地震計 (換振器) は水平 2 成分に鉛直成分を加えた 3 成分の

## 地震動の多点同時観測に基づくパイプラインの応力の検討

ものである。その固有振動数は 5 Hz、減衰定数は 10 以上である。総合感度のほぼ様な範囲（感度低下 10% 以内）は、0.5~50 Hz である。測点 A および E には、地上地震計と地中地震計が隣接して設置されている。両地震計の総合感度様な範囲は若干異なるが、得られた波形は実用上同一と考えて支障ないことが確認されている。

電磁オシログラフは 4 台使用されており、同時に記録の取得が開始されるようになっている。また、各オシログラフによる記録の正確な時間の対応をつけるため、各オシログラフで同一の電気パルスを記録するようにしてある。最高感度は約 1 mm/Gal で、大きな振幅の信号が入ると自動感度切替器により感度が低下するようになっている。同一記録中では、感度は復帰しない。時間軸の分解能を高めるよう、記録紙の送り速度は 4 cm/s としてある。

### 3.4 記録の処理

この観測に用いられた地震計は、全体としてチャンネル数が多いこと、および自動感度切替器が装備されていることを除く基本的な内容は、港湾地域強震観測で使用されている ERS-C 強震計と同一である。したがって、記録の処理も全く同一に行った。その処理の概略は以下のとおりである。

原記録を用いて、波形デジタル化装置により 0.01 秒ごとの振幅をデジタル化する。デジタル化された記録のゼロ線補正を行う。このゼロ線補正はほかの多くの研究者が行っているゼロ線補正とは若干性格が異なる。次に記録のフーリエ変換を求め、それに対して地震計特性の補正および積分

を行い、その各段階のもののフーリエ逆変換を求める。このような過程を経て、補正加速度、速度、変位の時刻歴（波形）を得る。

強震観測の記録の処理では、積分の際に 2 種類のフィルタ操作を行い、2 種類の速度と変位の波形を求めている。それらのフィルタは、固定フィルタおよびパラメタ付きフィルタである。前者は常に一定特性のフィルタである。これはすべての記録を同一特性のフィルタで処理することを主眼にしたものである。後者は記録波形ごとにローカットフィルタの遮断振動数 ( $f_c$ ) を変化させるものである。遮断振動数は、得られた記録の低振動数部分が一定量づつ減衰するように選ばれる。したがって、低振動数成分を多く含む記録ほど遮断振動数が低くなる。これは、記録の全振動数成分について、含まれる誤差の比率を一定値以下とすることを主眼にしたものである。

本研究では、パラメタ付フィルタを用いて処理した変位波形を使用した。なお、ここに説明した記録の処理の詳細は別に報告されている<sup>18)</sup>。また、その内容を若干要約したものは、1976 年以降の記録に対する港湾地域強震観測年報にも収録されている<sup>19)</sup>。

## 4. 対象地震

観測装置が設置された 1974 年 4 月から 1981 年 9 月までに、84 の地震記録が取得されている。本報告では 3.1 で述べたように、それらの内の 8 個について検討を行った。検討の対象とした地震の諸元を 表-4.1 に、各々の

表-4.1 対象地震

地震番号	発震年月日	震源地		マグニチュード	深度 (km)	震央距離 (km)
		場所	緯度 経度			
TIA-3	1974. 5. 9	伊豆半島沖	34°34'N 138°48'E	6.9	10	140
TIA-6	1974. 7. 8	茨城県沖	36°25'N 141°12'E	6.3	40	161
TIA-9	1974. 8. 4	利根川中流域	36°01'N 139°55'E	5.8	50	54
TIA-10	1974. 9.27	房総半島南東沖	33°43'N 141°31'E	6.4	60	259
TIA-17	1974.11.16	銚子付近	35°45'N 141°15'E	6.1	40	125
TIA-20	1974.11.30	鳥島近海	30°36'N 138°46'E	7.5	320	558
TIA-41	1977. 6. 4	東京湾北部	35°31'N 140°03'E	4.6	60	26
TIA-50	1978. 3. 7	東海道はるか沖	32°08'N 137°44'E	—	440	424

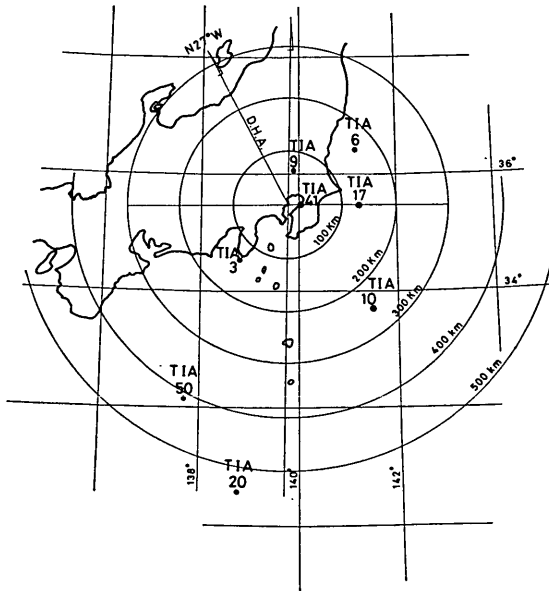


図-4.1 震源地位置

地震の震源と観測地点の位置関係を 図-4.1 に示す。今回検討した地震を、震央距離と震源の深さに着目して分類すると、① 震央距離が短く、震源が比較的深い地震 (TIA-9, 41)、② 震央距離が比較的長く、震源が浅い地震 (TIA-3, 6, 10, 17) および震央距離が長く、震源が深い地震 (TIA-20, 50) の3グループに分けられる。地震時にパイプに生じる応力度は、5. 観測地震動に基づいて計算したパイプの応力度に示すように、震央距離及び震源の深さと密接な関係がある。

1974年8月4日に茨城県南西部で発生したマグニチュード6.3、震央距離161km、震源の深さ40kmの地震 (TIA-6) の加速度記録を 3.4 記録の処理で述べた方法で処理して得た、加速度波形を一例として 図-4.2 に示す。この加速度波形を、3.4 記録の処理で述べた方法で積分して得た変位波形を 図-4.3 に示す。同様に処理して得た加速度波形、速度波形および変位波形の各々の最大値を、地震波ごとおよび測点ごとにまとめて、表-4.2 に示す。

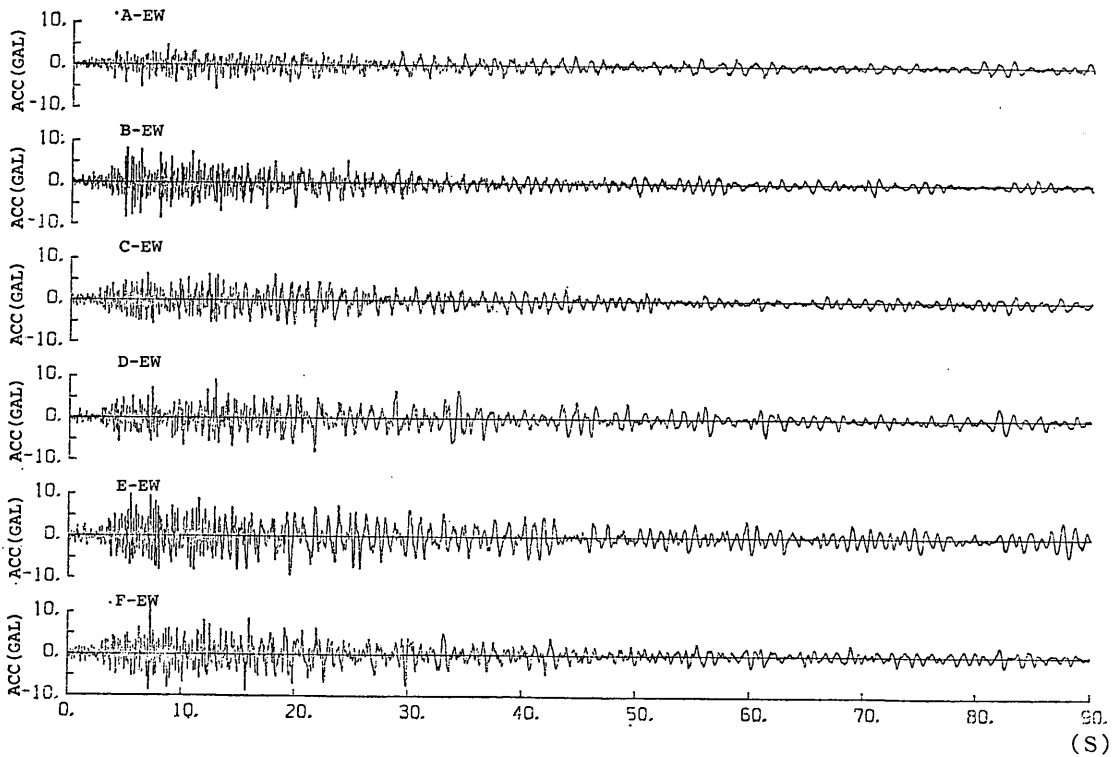


図-4.2 (a) 加速度波形 (TIA-6, EW 成分)

地震動の多点同時観測に基づくパイプラインの応力の検討

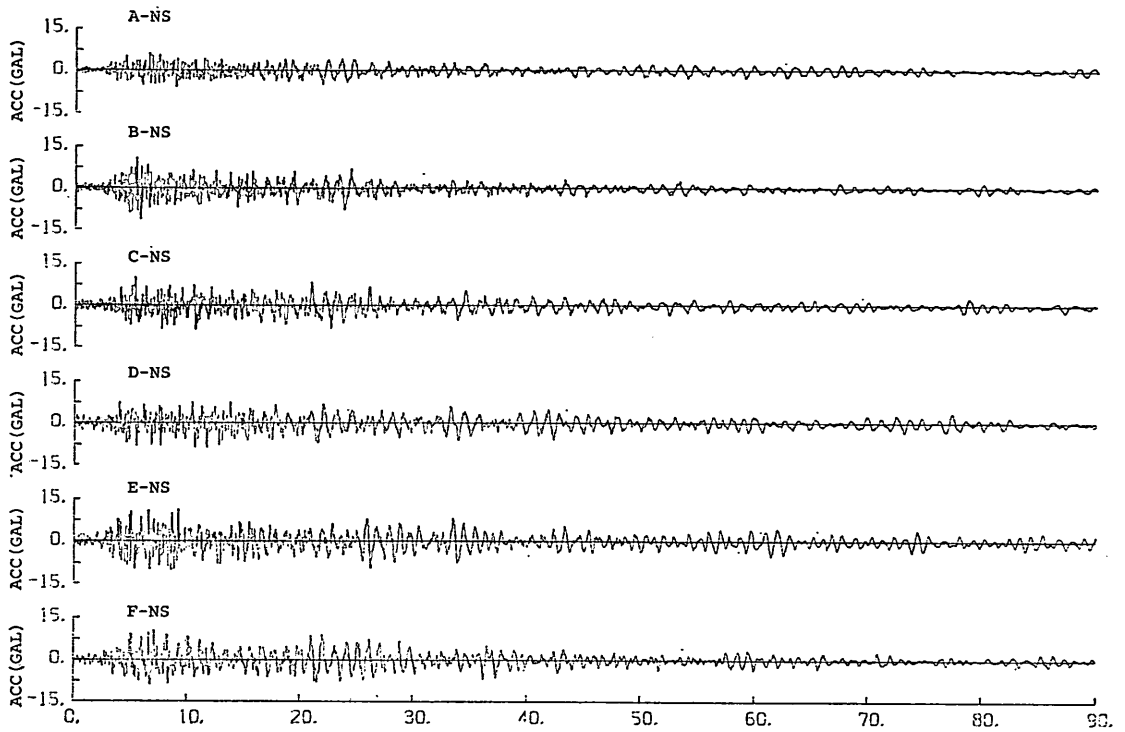


図-4.2 (b) 加速度波形 (TIA-6, NS 成分)

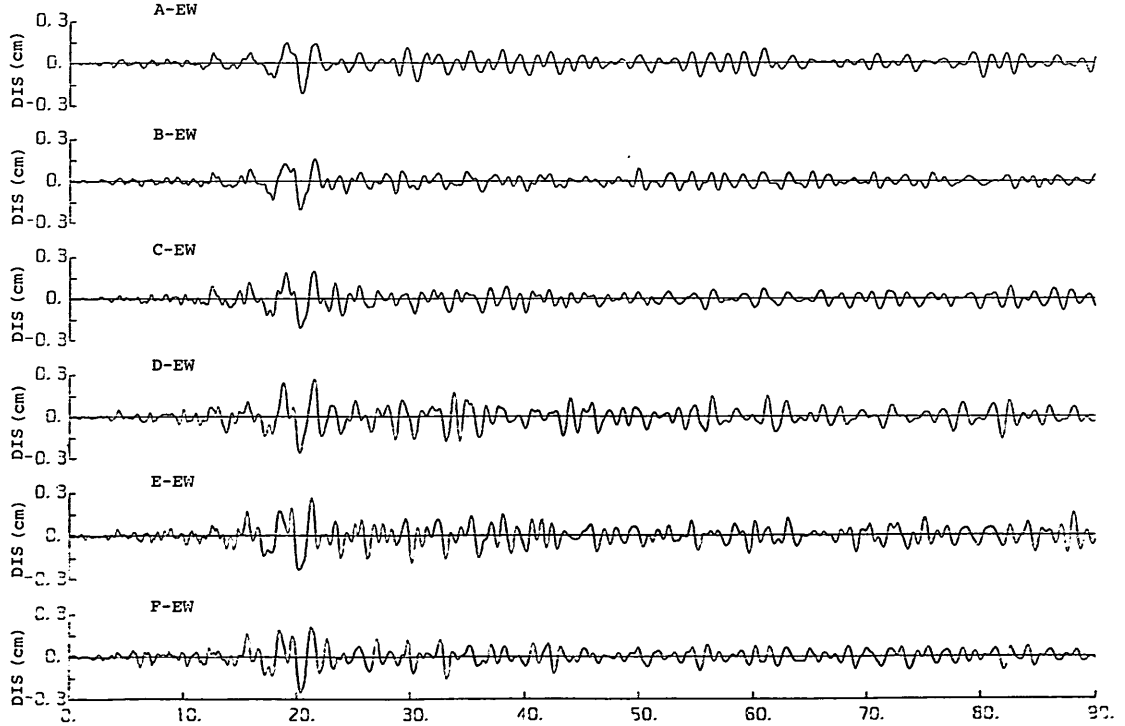


図-4.3 (a) 変位波形 (TIA-6, EW 成分)

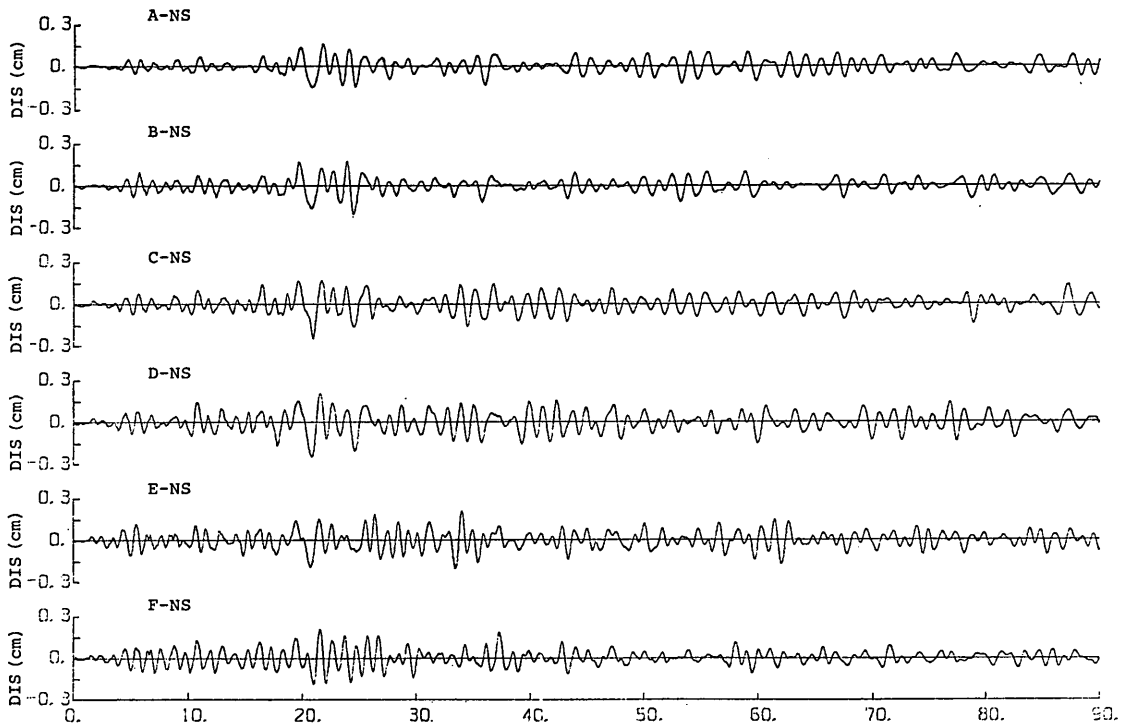


図-4.3 (b) 変位波形 (TIA-6, NS 成分)

表-4.2 (a) 地震波の特性

地震番号	方 向	項 目	観 測 点					
			A	B	C	D	E	F
TIA- 3	測線直交	最大加速度 (Gal)	7.4	9.6	11.6	8.6	17.9	11.6
		最大速度 (cm/s)	1.34	1.30	1.45	1.69	2.40	1.53
		最大変位 (cm)	0.38	0.32	0.34	0.36	0.57	0.32
	測線平行	最大加速度 (Gal)	10.1	12.7	13.2	14.9	20.1	17.5
		最大速度 (cm/s)	2.15	2.27	2.09	3.65	3.56	2.38
		最大変位 (cm)	0.58	0.53	0.53	0.82	0.71	0.53
TIA- 6	測線直交	最大加速度 (Gal)	5.7	8.4	6.4	9.1	9.9	11.1
		最大速度 (cm/s)	0.72	0.84	0.82	1.21	1.25	1.08
		最大変位 (cm)	0.22	0.21	0.21	0.27	0.26	0.25
	測線平行	最大加速度 (Gal)	6.0	11.0	10.1	12.1	11.2	10.5
		最大速度 (cm/s)	0.81	1.01	0.93	1.13	1.33	1.31
		最大変位 (cm)	0.16	0.20	0.24	0.24	0.21	0.21
TIA- 9	測線直交	最大加速度 (Gal)	24.7	35.0	30.4	22.4	32.4	33.3
		最大速度 (cm/s)	1.02	1.51	1.55	1.49	2.40	2.40
		最大変位 (cm)	0.20	0.25	0.23	0.28	0.29	0.23

地震動の多点同時観測に基づくパイプラインの応力の検討

表-4.2 (b) 地震波の特性

地震番号	方 向	項 目	観 測 点					
			A	B	C	D	E	F
TIA- 9	測線平行	最大加速度 (Gal)	22.0	47.1	33.0	30.8	51.0	39.3
		最大速度 (cm/s)	1.20	2.45	1.87	2.04	2.73	3.86
		最大変位 (cm)	0.16	0.22	0.34	0.26	0.46	0.49
TIA-10	測線直交	最大加速度 (Gal)	4.8	5.5	6.0	9.4	8.3	7.6
		最大速度 (cm/s)	0.63	0.62	0.83	1.28	0.92	0.71
		最大変位 (cm)	0.14	0.14	0.15	0.21	0.16	0.14
	測線平行	最大加速度 (Gal)	5.1	6.6	8.3	10.9	8.5	8.9
		最大速度 (cm/s)	0.62	0.71	0.91	0.97	0.85	0.86
		最大変位 (cm)	0.12	0.13	0.16	0.17	0.18	0.18
TIA-17	測線直交	最大加速度 (Gal)	7.1	7.9	9.0	13.2	11.3	9.9
		最大速度 (cm/s)	1.21	1.24	1.56	2.01	1.87	1.31
		最大変位 (cm)	0.29	0.31	0.36	0.45	0.41	0.27
	測線平行	最大加速度 (Gal)	7.8	10.2	13.8	12.6	15.8	11.4
		最大速度 (cm/s)	1.52	1.58	1.77	1.93	2.62	1.66
		最大変位 (cm)	0.39	0.42	0.47	0.47	0.62	0.32
TIA-20	測線直交	最大加速度 (Gal)	13.0	13.8	10.1	14.8	17.8	15.7
		最大速度 (cm/s)	1.01	1.06	1.26	1.40	1.61	1.23
		最大変位 (cm)	0.30	0.31	0.37	0.48	0.46	0.31
	測線平行	最大加速度 (Gal)	8.5	10.6	13.7	12.7	15.3	16.3
		最大速度 (cm/s)	1.03	1.29	1.62	2.19	1.63	1.71
		最大変位 (cm)	0.36	0.43	0.45	0.60	0.58	0.42
TIA-41	測線直交	最大加速度 (Gal)	13.2	8.8	22.9	35.8	19.5	18.1
		最大速度 (cm/s)	0.32	0.24	0.56	0.77	0.61	0.56
		最大変位 (cm)	0.11	0.01	0.02	0.03	0.02	0.02
	測線平行	最大加速度 (Gal)	25.2	18.7	34.1	43.5	28.6	32.3
		最大速度 (cm/s)	0.53	0.42	0.62	1.05	0.63	0.73
		最大変位 (cm)	0.14	0.11	0.02	0.03	0.02	0.02
TIA-50	測線直交	最大加速度 (Gal)	16.5	12.4	16.1	15.7	23.8	21.3
		最大速度 (cm/s)	0.85	0.86	1.12	0.61	1.88	1.50
		最大変位 (cm)	0.11	0.15	0.17	0.11	0.24	0.23
	測線平行	最大加速度 (Gal)	12.3	11.6	18.7	23.6	33.2	27.6
		最大速度 (cm/s)	0.69	0.88	1.10	1.90	2.29	2.00
		最大変位 (cm)	0.11	0.12	0.18	0.25	0.29	0.24

5. 観測地震動に基づいて計算したパイプの応力度

5.1 計算方法

表-5.1 に示す諸元をもつパイプが測線に沿って地表面のごく近傍に埋設されていると想定する。本節では、そのパイプに生じるひずみおよび応力度を計算する方法について述べる。



表-5.1 パイプの断面諸元

外 径	肉 厚	重 量	断 面 積	断 面 2 次 モーメント
355.6 mm	11.1 mm	94.3 kgf/m	120.1 cm <sup>2</sup>	17800 cm <sup>4</sup>

パイプの軸方向応力度を計算するために、地震時の各時刻における測線の変位曲線を求める。地震時の測点 A～F での各時刻ごとの変位は、3.4 記録の処理で述べた方法で加速度波形を 2 回積分することによって計算される。測線の変位曲線は、フーリエ級数あるいは 2 次曲線で表わされると仮定して、それを、測点での変位をもとにして求める。測線の変位曲線を軸方向に微分して、ひずみおよび曲率を求める。パイプの変形は、2.3 研究方法の概要で述べたように、測線の変形とみてよいかからパイプの軸方向応力度は、測線のひずみおよび曲率から計算される。

地震時のパイプの応力度を計算するに当っては、地表面から基盤表面までの深さがほぼ一定で土層構成が変化しないと見なせる区間（測点 A～C 間、以下、地盤条件がほぼ一定な区間と呼ぶ）と、それが変化している区間を含む全区間（測点 A～F、以下、地盤条件が変化している区間と呼ぶ）とに分けて、検討した。なお、ここでいう基盤とは  $N$  値が 50 以上あるいは、せん断波速度が 300 m/s 以上のいわゆる工学的基盤のことをいう。

(1) 地盤条件がほぼ一定な区間（測点 A～C 間）

a) 軸 応 力 度

測線の測線方向の変位が、隣接する二測点間では、直線的に変化すると仮定して、各測点における各時刻ごとの測線方向の相対変位から測線のひずみ、すなわちパイプの軸ひずみを式 (5.1) で求める。パイプの軸応力度は、式 (5.2) で計算される。

$$\epsilon_L = \frac{\delta_{ij}}{d} \quad (5.1)$$

$$\sigma_L = \epsilon \cdot E \quad (5.2)$$

ここに、 $\epsilon_L$  : パイプの軸ひずみ

$\delta_{ij}$  : ある時刻における隣接する二測点間の測線方向の相対変位 (cm)

$d$  : 隣接する二測点間の距離 (cm)

$E$  : パイプのヤング率  
(鋼材,  $2.1 \times 10^6$  kgf/cm<sup>2</sup>)

$\sigma_L$  : パイプの軸応力度 (kgf/cm<sup>2</sup>)

b) 曲 げ 応 力 度

ある時刻における測線（パイプ）の測線に直交する方

向の変位曲線を、二次曲線で表わせると仮定して、それを測点 A, B, C での測線に直交する方向の変位をもとにして求める。測線の変位曲線を測線方向に 2 回微分して、変位曲線の曲率を計算する。二次曲線では曲率は一定であるから、それを、測点 A, B, C 間の平均的な値と見なす。その曲率からパイプの曲げ応力度を計算する。

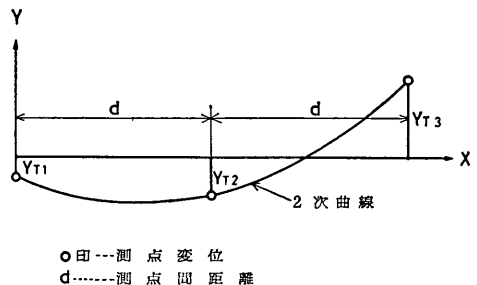


図-5.1 測線の変位曲線の 2 次曲線による近似（測線直交方向）

$$\left. \begin{aligned} y_T &= ax^2 + bx + c \\ a &= \frac{y_{T3} - 2y_{T2} + y_{T1}}{2d} \\ b &= -\frac{y_{T3} - 4y_{T2} + 3y_{T1}}{2d} \\ c &= y_{T1} \end{aligned} \right\} \quad (5.3)$$

ここに、 $y_T$  : 測点 A～C 間の測線の測線直交方向の変位 (cm)

$y_{T1} \sim y_{T3}$  : 測点 A, B, C での測線に直交方向の変位 (cm)

パイプの曲率は、次式で与えられる。

$$\rho = \frac{d^2 y_T}{dx^2} = 2a \quad (5.4)$$

パイプの最大曲げひずみは、次式で与えられる。

$$\epsilon_b = \frac{D}{2\rho} \quad (5.5)$$

ここに、 $\epsilon_b$  : 最大曲げひずみ

$D$  : パイプの直径 (cm)

パイプの最大曲げ応力度は、次式で与えられる。

$$\sigma_B = \epsilon_b \cdot E \quad (5.6)$$

ここに、 $\sigma_B$  : パイプの最大曲げ応力度 (kgf/cm<sup>2</sup>)

各地震について、0.01 秒ごとに a), b) で述べた方法で計算を行い、パイプの最大ひずみ、最大曲率および最大応力度を求める。

地震動の多点同時観測に基づくパイプラインの応力の検討

(2) 地盤条件が変化している区間 (測点 A~F)

a) 軸応力度

ある時刻での測線 (パイプ) の測線方向の変位曲線をフーリエ級数で表わせると仮定して、それを測点 A~F での測線方向の変位をもとに、次式で表わす。

$$y_L = \frac{a_0}{2} + \sum_{i=1}^3 \left\{ a_i \cos \frac{i\pi}{3} \left( \frac{x}{d} \right) + b_i \sin \frac{i\pi}{3} \left( \frac{x}{d} \right) \right\} + \frac{a_3}{2} \cos \pi \left( \frac{x}{d} \right) \quad (5.7)$$

ここに、 $y_L$  : パイプの測線方向の変位 (cm)

$d$  : 隣接する二測点間の距離 (cm)

$a_{0-3}, b_{1,2}$  : フーリエ係数

パイプの軸ひずみは、式 (5.7) を  $x$  について微分して求める。

$$\epsilon_L = \frac{dy_L}{dx} = \sum_{i=1}^3 \left\{ -a_i \left( \frac{i\pi}{3d} \right) \sin \frac{i\pi}{3} \left( \frac{x}{d} \right) + b_i \left( \frac{i\pi}{3d} \right) \cos \frac{i\pi}{3} \left( \frac{x}{d} \right) \right\} - \frac{a_3\pi}{2d} \sin \pi \left( \frac{x}{d} \right) \quad (5.8)$$

パイプの軸応力度は、次式で与えられる。

$$\sigma_L = \epsilon_L \cdot E \quad (5.9)$$

b) 曲げ応力度

曲げ応力度についても軸応力度を求めるのと同様の手法で計算する。ある時刻での測線に直交する方向の測点の変位をもとに、測線 (パイプ) の測線に直交する方向の変位曲線を次式で表わす。

$$y_T = \frac{c_0}{2} + \sum_{i=1}^2 \left\{ c_i \cos \frac{i\pi}{3} \left( \frac{x}{d} \right) + d_i \sin \frac{i\pi}{3} \left( \frac{x}{d} \right) \right\} + \frac{c_3}{2} \cos \pi \left( \frac{x}{d} \right) \quad (5.10)$$

ここで、 $y_T$  : パイプの測線に直交する方向の変位 (cm)

$c_{0-3}, d_{1,2}$  : フーリエ係数

パイプの曲げひずみは次式で与えられる。

$$\epsilon_b = \frac{D}{2\rho} \quad (5.11)$$

ここに、

$$\rho = \frac{d^2 y_T}{dx^2} = - \sum_{i=1}^2 \left\{ \left( \frac{i\pi}{3d} \right)^2 \left\{ c_i \cos \frac{i\pi}{3} \left( \frac{x}{d} \right) + d_i \sin \frac{i\pi}{3} \left( \frac{x}{d} \right) \right\} \right\} - \frac{c_3}{2} \left( \frac{\pi}{d} \right)^2 \cos \pi \left( \frac{x}{d} \right) \quad (5.12)$$

パイプの曲げ応力度は次式で求められる。

$$\sigma_B = \epsilon_b \cdot E$$

以上の計算で問題になるのは、パイプの変位曲線を表わす式 (5.7)、および式 (5.10) が、正弦波と余弦波の項で構成されており、しかも、測点間の間隔が 500 m なので、これらの波長が、最小でも 1000 m までしか考慮できない点である。このことは、地震波の変位波形に波長 1000 m 以下の成分が優勢に含まれている場合、式 (5.7) および式 (5.10) で、地震時のパイプの変位曲線を表わすものは適切でないこと、その場合、パイプのひずみおよび応力とも過少評価になる可能性があることを意味している。次節でこの問題について検討することにした。なお、5.1 (1) 地盤条件がほぼ一定な区間で、パイプの変位曲線として、フーリエ級数による表示式を用いなかったのは、区間内に、測点が 3 点しかなく、フーリエ級数でも、二次曲線による近似と大差ないと考えたためである。

5.2 計算結果

地震時の測線の最大相対変位、それらの記録された時期およびそれらの生じる位置を表-5.2 に示す。TIA-3、

表-5.2 測線の最大相対変位

地震番号	方向	最大相対変位の生じる時刻 (s)	最大相対変位の生じる区間	最大相対変位 (cm)
TIA-3	測線直交	47.20	E-F	0.41
	測線平行	26.72	D-E	-0.68
TIA-6	測線直交	21.72	D-E	-0.23
	測線平行	26.72	E-F	0.25
TIA-9	測線直交	21.83	D-E	0.27
	測線平行	9.43	D-E	-0.40
TIA-10	測線直交	30.54	E-F	-0.16
	測線平行	66.37	E-F	-0.20
TIA-17	測線直交	50.46	C-D	0.43
	測線平行	27.51	D-E	0.54
TIA-20	測線直交	67.37	C-D	-0.41
	測線平行	102.71	D-E	0.64
TIA-41	測線直交	2.68	E-F	-0.03
	測線平行	3.12	E-F	0.03
TIA-50	測線直交	56.13	E-F	-0.20
	測線平行	47.28	C-D	0.29

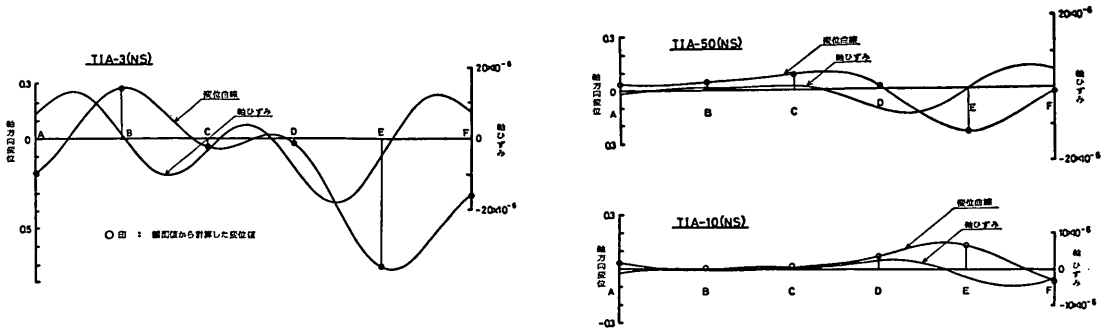


図-5.2 パイプの変位分布及びひずみ分布の近似曲線

10, 50 について, 5.1 (2) 地盤条件が変化している区間で述べた方法で求めた, 測線に最大相対変位が生じる時刻でのパイプの変位曲線を, 図-5.2 に示す。表-5.2 から, 最大相対変位を生じる時期は, 地震によって異っている。すなわち, 震央距離が短くかつ震源の深い地震では, 記録開始後比較的早く, 震央距離が長くかつ震源の比較的浅い地震では, 遅い。

地震時にパイプに生じる軸応力度および曲げ応力度の計算結果を示す前に, 5.1 計算方法で触れたように, 地震波の変位波形に, 測点の最小間隔 500 m では捉えられない波長 1000 m 以下の成分が優勢に含まれているかどうかについて, 検討する。各測点ごとに計算されている変位波形の卓越部分について, 測点 A での波形とほかの各点の波形との相互相関係数を計算し, それを最大に

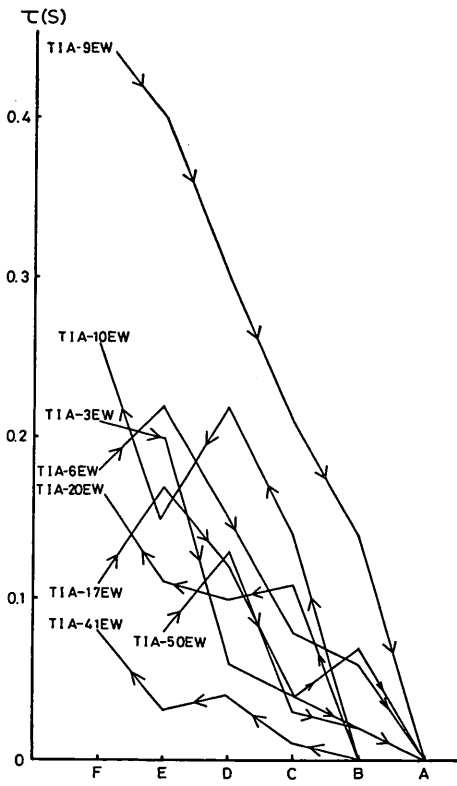


図-5.3 (a) 地震動の時間遅れ (EW 成分)

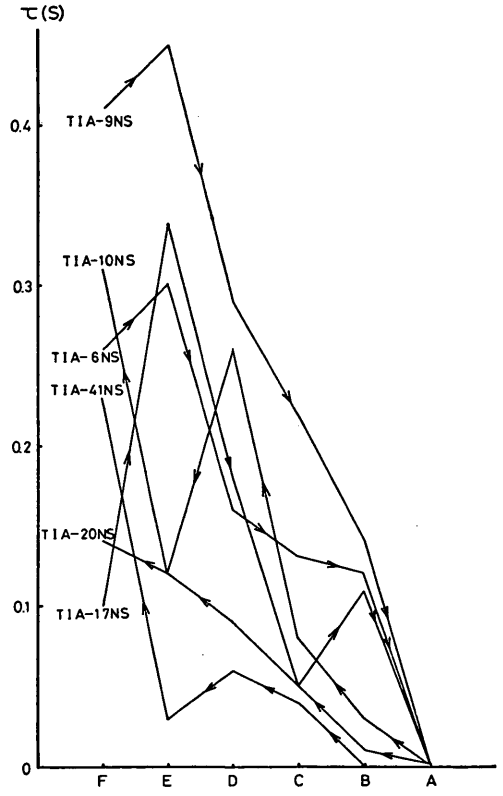


図-5.3 (b) 地震動の時間遅れ (NS 成分)

地震動の多点同時観測に基づくパイプラインの応力の検討

する各々の波形間の時間遅れを求める(図-5.3)。図-5.3では、地震波の伝播方向が必ずしも一方向だけでなく、途中で逆行する場合もあるように見える。これは、地震波の伝播経路が、地表面から基盤面までの深さ、震源と測点の位置関係、震源の深さによって異なるためと考えられる。ここでは、地表面から基盤面までの深さがほぼ一定で土層構成も変化していないE~F間の変位波形の時間遅れから、測線方向の地震波の見かけの伝播速度を計算する。地震波の震源方向からの伝播速度は(以下、地震波の伝播速度と呼ぶ)地震波が平面的に見て、震源から測点に直進しているものとして、見かけの伝播速度に  $\cos \alpha$  を乗じて(図-5.4参照)求められる(表-5.3)。本報告で検討した範囲では、地震波の伝播速度は

1.2~10.1 km/s であり、地表面付近の土層のせん断波速度よりかなり速く、より深い土層のせん断波速度に近い

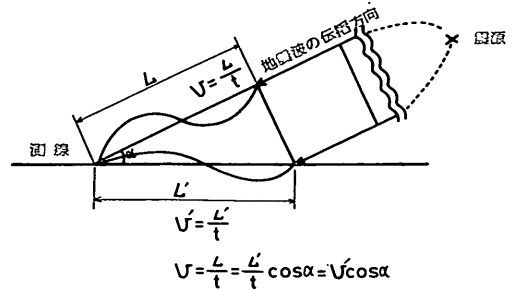
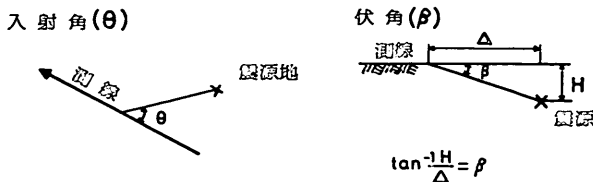


図-5.4 地震波の伝播速度の計算方法

表-5.3 地震波形の解析結果

地震番号	マグニチュード	深度 (km)	震央距離 (km)	入射角 (度)	伏角 (度)	地震波の伝播速度		最大加速度 $\alpha_{max}$ (Gal)	最大変位 $\delta_{max}$ (cm)	$\frac{\epsilon L_{max}}{\alpha_{max}}$ ( $\times 10^{-6}$ /Gal)
						方向	速度 (km/s)			
TIA- 3	6.9	10	140	68°	4°	測線直交	1.2	17.9	0.57	0.79
						測線平行	1.7			
TIA- 6	6.3	40	161	78°	14°	測線直交	2.6	11.1	0.27	0.50
						測線平行	1.3			
TIA- 9	5.8	50	54	36°	43°	測線直交	—	35.0	0.29	0.20
						測線平行	10.1			
TIA-10	6.4	60	259	12°	13°	測線直交	3.2	9.4	0.21	0.43
						測線平行	2.7			
TIA-17	6.1	40	125	63°	18°	測線直交	3.7	13.2	0.45	0.85
						測線平行	1.2			
TIA-20	7.5	320	558	38°	30°	測線直交	3.1	17.8	0.48	0.76
						測線平行	5.0			
TIA-41	4.6	60	26	64°	67°	測線直交	1.4	35.8	0.03	0.02
						測線平行	3.1			
TIA-50	—	440	424	56°	46°	測線直交	4.0	23.3	0.23	0.21
						測線平行	4.7			

・  $\epsilon L_{max}/\alpha_{max}$  ; 観測地震動に基づいて求めた軸ひずみの最大値を最大合加速度で割った値



い。地震波の変位波形の卓越周期とその伝播速度の関係を 図-5.5 に示す。地震波の変位波形の波長 ( $L$ ) は、その伝播速度 ( $c$ ) とその卓越周期 ( $T$ ) より  $L=c \cdot T$  で求められ、 $L=1.4 \sim 11.1 \text{ km}$  程度である。このことから、測点の最小距離 500 m 内にこれより短い波長が卓越している地震波が入る可能性は少ないと考えられる。

地震波の伝播速度と震源の深さの関係について検討した結果、地震波の伝播速度は 図-5.6 に示すように震源

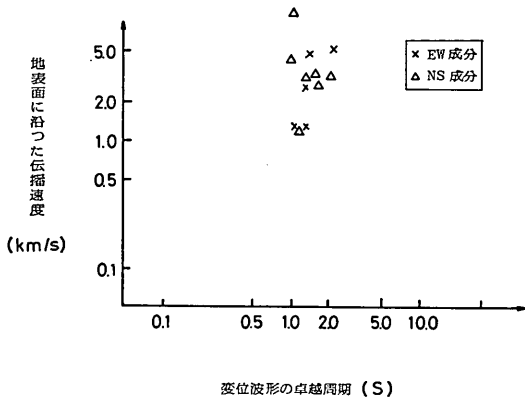


図-5.5 変位波形の卓越周期と地表面に沿った伝播速度

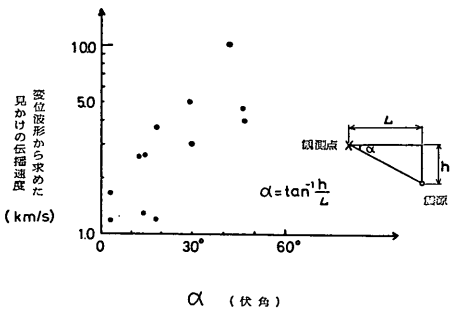


図-5.6 地震波の伝播速度と伏角

と測点を結んだ直線が、地表面となす角 (以下、伏角と呼ぶ) に比例して速くなる傾向があることがわかる。この傾向は、次に述べるような地震波の伝播経路に関する従来からの考え方によくあっている。このことは、逆にいえば、ここで求めた地震波の伝播速度がほぼ妥当なものであることを示していると考えられる。伏角が大きい地震 (震源が深く深い地震 (TIA-20, 50) および震源が近く比較的深い地震 (TIA-9, 41) では、地震波は主としてせん断波速度のより速い深い土層を伝播し、測点の直

下から伝わってくるので、地震波の伝播速度は速い。一方、伏角が小さい地震 (震源が深く浅い地震) では、地震波は主としてせん断波速度の比較的遅い地表近くの土層中を伝わってくるので、地震波の伝播速度は遅い。

4.1 に示した方法で計算した地震時のパイプの軸ひずみおよび曲げひずみを 表-5.4 に、パイプの軸応力度および曲げ応力度を 表-5.5 に示す。最大軸ひずみおよび曲げひずみを生じる時期は、最大相対変位の生じる時期と一致している。軸ひずみと最大合加速度の比の値を表-5.6 に、それらの値をマグニチュードをパラメータにして、震央距離を横軸にとってプロットしたものを 図-5.7 に示す。これらの図表から、本報告で検討の対象とした地震に関しては震央距離およびマグニチュードとパイプの応力度の関係について次のことがいえる。

① パイプに生じる曲げ応力度は軸応力度にくらべて非常に小さい。これは、長大な地中構造物 (例えば、沈埋トンネル<sup>20), 21), 22) など) についての、地震応答観測か</sup>

表-5.4 (a) 観測に基づいて計算したパイプラインの最大ひずみ及び最大曲率 (地盤条件がほぼ一定な区間)

地震番号	位置	軸ひずみ		曲率	
		$\epsilon_L$ ( $\times 10^{-6}$ )	$T$ (s)	$\frac{\rho_s}{L}$ ( $\times 10^{-7}$ ) (1/m)	$T$ (s)
TIA-3	A-B	6.4	37.17	0.22	33.14
	B-C	-7.2	26.91		
TIA-6	A-B	3.4	93.54	0.09	96.60
	B-C	3.2	34.44		
TIA-9	A-B	3.8	9.71	0.12	11.64
	B-C	3.6	10.62		
TIA-10	A-B	2.4	97.23	0.09	87.89
	B-C	-3.2	16.75		
TIA-17	A-B	-5.4	46.26	0.15	99.09
	B-C	-4.4	70.85		
TIA-20	A-B	7.2	97.20	0.20	82.33
	B-C	7.2	100.02		
TIA-41	A-B	$\pm 0.2$	3.46	0.01	2.70
	B-C	$\pm 0.4$	3.48		
TIA-50	A-B	2.4	55.53	0.10	54.80
	B-C	3.0	53.00		

注)  $T$ : 記録開始から最大ひずみあるいは最大曲率を生じるまでの時間 (s)

地震動の多点同時観測に基づくパイプラインの応力の検討

表-5.4 (b) 観測に基づいて計算した最大軸ひずみおよび最大曲率（地盤条件が変化している区間）

地震番号	最大軸ひずみ			最大曲率		
	$\epsilon_L$ ( $\times 10^{-6}$ )	X (m)	T (s)	$\rho_s$ ( $\times 10^{-7}$ ) (1/m)	X (m)	T (s)
TIA-3	-17.2	1700	26.73	0.515	1000	49.20
TIA-6	-6.5	2300	26.23	0.279	1500	34.32
TIA-9	10.2	2300	12.12	0.359	1475	21.80
TIA-10	-4.9	2250	66.37	0.211	50	72.54
TIA-17	13.7	1725	27.50	0.557	1500	50.44
TIA-20	16.4	1800	102.73	0.501	1475	79.81
TIA-41	-0.9	2250	2.80	0.0385	2500	2.67
TIA-50	-6.9	1650	57.87	0.281	2000	55.79

$\epsilon_L$ : 最大軸ひずみ

X: 最大軸ひずみあるいは最大曲率を生じる点までのA点からの距離 (m)

T: 記録開始から最大ひずみあるいは最大曲率を生じるまでの時間 (s)

ら得られている知見と一致している。

② パイプに生じる軸ひずみは、マグニチュードおよび震央距離に比例して大きくなる（図-5.7 参照）。この傾向も、従来からの沈埋トンネル等での観測結果と一致している<sup>20),21)</sup>。

③ 最大軸ひずみと最大合加速度の比（以下、 $\epsilon_{Lmax}/\alpha_{max}$ ）

表-5.5 (a) 観測に基づいて計算したパイプの最大応力度（地盤条件がほぼ一定な区間）

地震番号	測点間	最大軸応力度		最大曲げ応力度	
		$\sigma_L$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	T (s)	$\sigma_B$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	T (s)
TIA-3	A-B	13.4	37.97	0.0082	33.14
	B-C	-15.1	26.91		
TIA-6	A-B	7.1	93.54	0.0032	96.60
	B-C	6.7	34.44		
TIA-9	A-B	8.0	9.71	0.0044	11.64
	B-C	7.6	10.62		
TIA-10	A-B	5.0	97.23	0.0034	87.89
	B-C	-6.7	16.75		
TIA-17	A-B	-11.3	46.26	0.0054	99.09
	B-C	-9.2	70.85		
TIA-20	A-B	15.1	97.20	0.0075	82.33
	B-C	15.1	100.02		
TIA-41	A-B	$\pm 0.4$	3.46	0.0002	2.70
	B-C	$\pm 0.8$	3.48		
TIA-50	A-B	5.0	55.53	0.0004	54.80
	B-C	6.3	53.00		

$\sigma_L$ : 最大軸応力度 (kgf/cm<sup>2</sup>)

$\sigma_B$ : 最大曲げ応力度 (kgf/cm<sup>2</sup>)

T: 記録開始時から  $\sigma_L$ ,  $\sigma_B$  がそれぞれ生じるまでの時間 (s)

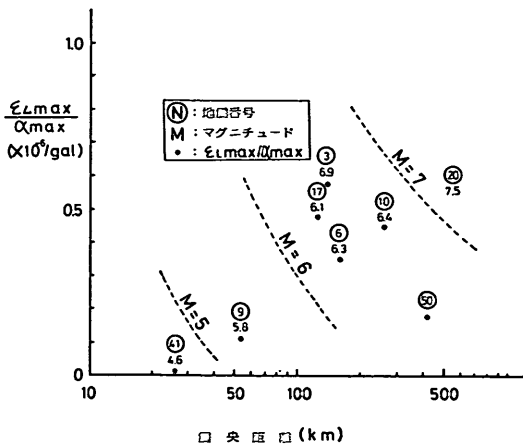


図-5.7 (a)  $\epsilon_{Lmax}/\alpha_{max}$  と震央距離，マグニチュード（地盤条件がほぼ一定な区間）

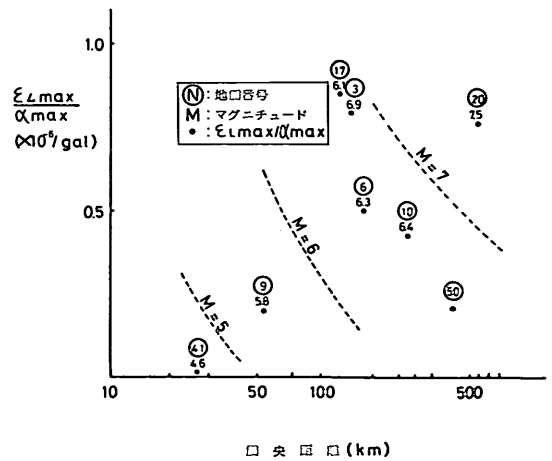


図-5.7 (b)  $\epsilon_{Lmax}/\alpha_{max}$  と震央距離，マグニチュード（地盤条件が変化している区間）

表-5.5 (b) 観測に基づいて計算したパイプの最大応力度(地盤条件が変化している区間)

地震番号	軸応力度			曲げ応力度		
	$\sigma_L$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$X$ (m)	$T$ (s)	$\sigma_B$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$X$ (m)	$T$ (s)
TIA-3	-36.1	1700	26.73	0.019	1000	49.20
TIA-6	-13.6	2300	26.23	0.010	1500	34.32
TIA-9	21.4	2300	12.12	0.013	1475	21.80
TIA-10	10.2	2250	66.37	0.007	50	72.54
TIA-17	28.8	1725	27.50	-0.021	1500	50.44
TIA-20	34.4	1800	102.73	-0.019	1475	79.81
TIA-41	-1.9	2250	2.80	0.001	2500	2.67
TIA-50	-14.5	1650	57.87	0.010	2000	55.79

$\alpha_{max}$  と表わす)の値は、図-4.7に示すように、これまでに衣浦港海底トンネルでの観測で得られた値  $0.87 \sim 1.39 \times 10^{-6}$  に近い<sup>22)</sup>。

④ 震源が近く、深いいわゆる直下型地震(TIA-9, 41)および震源が遠く、深い地震(TIA-20, 50)では、パイプに生じる  $\epsilon_{Lmax}/\alpha_{max}$  の値は比較的小さい。その理由は、図-5.6の説明で述べたように、地震波が、主として鉛直下方から伝播してくるため、相隣れる二測点間の相対変位が小さくなり、パイプに生じる応力も小さくなるためと考えられる。

⑤ 震源が遠く、浅い地震(TIA-3, 6, 10, 17)では、

パイプに生じる  $\epsilon_{Lmax}/\alpha_{max}$  の値は比較的大きい。最大応力度が生じる時期は、比較的遅い。その理由は、図-5.6の説明で述べたように、地震波が、主として、地表面近くを伝播してくるため、伝播速度が比較的遅く、相隣れる二測点間の相対変位が大きく、パイプに生じる応力も大きくなるためと考えられる。地震波が主として地表面に沿って伝播していると見なした理由は、測線と震源のなす角(以下、入射角と呼ぶ)とパイプの応力度について 図-5.8 および 表-5.3 に示すように、測線対

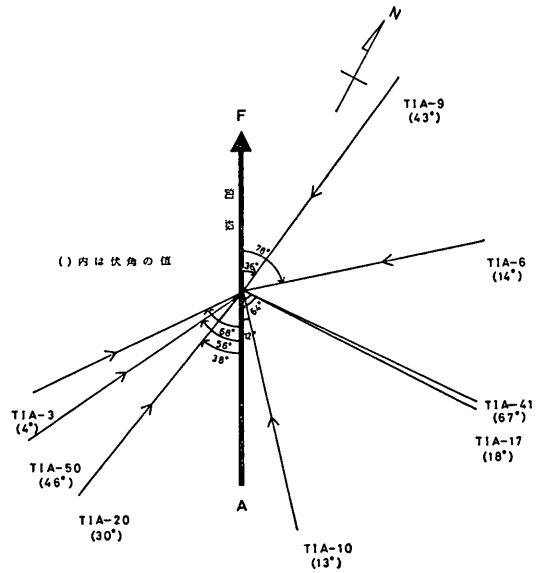


図-5.8 測線(パイプ)の方向と震源方向の関係

表-5.6 最大軸ひずみと最大合加速度の比の値 ( $\epsilon_{Lmax}/\alpha_{max}$ )

地震番号	地盤条件がほぼ一定な区間(測点A~C間)			地盤条件が変化している区間		
	最大合加速度 (Gal)	最大軸ひずみ ( $\times 10^{-6}$ )	$\epsilon_{Lmax}/\alpha_{max}$ ( $\times 10^{-6}/Gal$ )	最大合加速度 (Gal)	最大軸ひずみ ( $\times 10^{-6}$ )	$\epsilon_{Lmax}/\alpha_{max}$ ( $\times 10^{-6}/Gal$ )
TIA-3	12.5	7.2	0.58	18.9	17.2	0.79
TIA-6	9.7	3.4	0.35	12.1	6.5	0.50
TIA-9	36.1	3.8	0.11	42.5	10.2	0.20
TIA-10	7.1	3.2	0.45	10.4	4.9	0.43
TIA-17	11.2	5.4	0.48	13.8	13.7	0.85
TIA-20	13.6	7.2	0.53	17.9	16.4	0.76
TIA-41	26.3	0.4	0.02	35.8	0.9	0.02
TIA-50	16.8	3.0	0.18	28.7	6.9	0.21

地震動の多点同時観測に基づくパイプラインの応力の検討

し、入射角が 45° に近い地震 (TIA-3, 17) の方が、測線に直交する方向からくる地震 (TIA-6) および測線方向からくる地震よりも、パイプに生じる  $\epsilon_{Lmax}/\alpha_{max}$  が大きいからである。このことは、付録 A.1 に示すように、地表面に沿ってくる地震波を正弦波とし、それが測線に  $\alpha$  の角をなして入射してくると仮定する場合、パイプに生じる応力度が、 $\alpha=45^\circ$  のとき最大になることから明らかである。

6. 既往の計算法によるパイプの応力度

6.1 計算方法

パイプラインの耐震設計法としては、変位法と質点系モデルによる動的応答解析法があるが、本報告では、変位法のうち、石油パイプライン技術基準の方法および BART・衣浦法を検討の対象とする。両者の方法ではともに、

- ① 地盤は、等方等質の完全弾性体とする。
- ② 地震時に地盤とパイプラインは、ほぼ同一の挙動を示し、パイプラインは自励振動を起さない。
- ③ 地震波の波形は、正弦波で表わす。地震波は時間的に周期、最大振幅および位相が変化せず地表面と平行に進むものとする。
- ④ パイプラインに発生する断面力として軸応力と曲げ応力を考慮する。

などの仮定を設けている。各々の方法では、「パイプラインを弾性床の上のほりにモデル化し、各時刻ごとの地盤の変位を強制支点変位として与えた場合にパイプに発生する応力の算定を行う点」は、同じ考え方で、同一の式を用いて計算しているが、定数の設定方法に差がある。すなわち、地盤の剛性係数 ( $K_1$  および  $K_2$ )、表層地盤面の水平変位振幅 ( $U_\theta$ )、地震動の波長 ( $L$ ) および合成応力度の計算方法が両者で異っている。両者の相違点を表-6.1 に示す。石油パイプライン技術基準については図-6.1 に、計算の流れを示す。

(1) 石油パイプライン技術基準による方法

式の誘導の詳細については、付録 A.1 に示す。パイプに生じる軸応力度の最大値は、地震波のパイプライン軸に対する入射角  $\phi$  が 45 度の時に生じ次式で与えられる。

$$(\sigma_L)_{max} = \frac{1}{1 + \frac{E_p A_p}{2K_1} \left(\frac{2\pi}{L}\right)^2} \frac{\pi E_p U_\theta}{L} \quad (6.1)$$

曲げ応力度の最大値は、地震波のパイプライン軸に対する入射角  $\phi$  が 0 度の時に生じ、次式で与えられる。

$$(\sigma_B)_{max} = \frac{U_\theta}{1 + \frac{E_p I_p}{K_2} \left(\frac{2\pi}{L}\right)^4} \frac{2\pi^2 D E}{L^2} \quad (6.2)$$

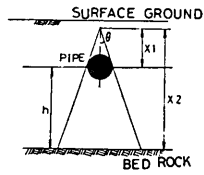
パイプラインに発生する合成応力度 ( $\sigma$ ) は、式 (6.1) と式 (6.2) を用いて式 (6.3) で算定する。

表-6.1 (a) 石油パイプライン技術基準と BART・衣浦法との比較

	石油パイプライン技術基準	BART・衣浦法	備 考
パイプに発生する応力度 $\sigma_L, \sigma_B$	軸応力度 $\sigma_L = \lambda_1 \frac{\pi U_\theta E_p}{L} \quad (\text{kgf/cm}^2)$ 曲げ応力度 $\sigma_B = \lambda_2 \frac{2\pi^2 D U_\theta E_p}{L^2} \quad (\text{kgf/cm}^2)$ $\lambda_1 = \frac{1}{1 + \frac{E_p \cdot A_p}{2K_1} \left(\frac{2\pi}{L}\right)^2}$ $\lambda_2 = \frac{1}{1 + \frac{E_p \cdot I_p}{K_2} \left(\frac{2\pi}{L}\right)^4}$	同 左	$U_\theta$ : 表層地盤面での地震動の水平変位振幅 (cm) $L$ : 表層地盤での地震動の波長 (cm) $D$ : パイプの外径 (cm) $E_p$ : パイプの弾性係数 (kgf/cm <sup>2</sup> ) $\lambda_1, \lambda_2$ : 補正係数 $A_p$ : パイプの断面積 (cm <sup>2</sup> ) $I_p$ : パイプの断面二次モーメント (cm <sup>4</sup> ) $K_1$ : 軸方向の地盤の剛性係数 (kgf/cm <sup>2</sup> ) $K_2$ : 軸直角方向の地盤の剛性係数 (kgf/cm <sup>2</sup> )



表-6.1 (b)

	石油パイプライン技術基準	BART・衣浦法	備 考
表層地盤の基本固有周期 $T^*$	$T = \frac{4H}{V_{1s}} (s)$ 粘性土地盤 $T = \frac{5.23H}{V_{1s}} (s)$ 砂質地盤	同 左	$H$ : 表層地盤の厚さ (cm) $V_{1s}$ : 表層地盤でのせん断弾性波速度 (cm/s) * 常時微動観測等を実施している場合は、 $T$ の値についてこれらの結果を参考にするによい。
地震動の波長 $L$	$L = \frac{2L_1L_2}{L_1+L_2} = \frac{2V_{1s}}{1+V_{1s}/V_{0s}} T$ (cm)	$L$ の長さがある上限値内で変化させて、軸または曲げ応力の最大値を出す。	$V_{0s}$ : 基盤でのせん断弾性波速度 (cm/s)
せん断弾性波速度 表層地盤 $V_{1s}$ 基盤 $V_{0s}$	実測値* から得られたせん断弾性波速度の 1/2 とする または $V_{1s} = 2,000\sqrt{N}$ (cm/s) $V_{0s} = 4,000\sqrt{N}$ (cm/s)	実測値を原則とする	$N$ : $N$ 値 * 弾性波探査、速度検層、動的直接せん断試験、共振法等で得られた結果を考慮する。
地盤の剛性係数 軸方向 $K_1$ 軸直角方向 $K_2$	$K_1 = K_2 = E_s = 3G_s$ $= \frac{3\gamma}{g} V_{1s}^2$ (kgf/cm <sup>2</sup> ) (石油パイプライン地震対策要綱、同解説) 日本道路協会	$K_1 = \frac{4DG_s\pi}{L} \left( \frac{L}{2\pi h} + \frac{\pi h}{L} \right)$ $K_2 = (2K_0 + K_s)$ $K_0 = \frac{E_s}{2(1-\nu^2)I_\nu}$ $K_s = \frac{2G_s \tan \theta}{\log_e x_2/x_1}$	$E_s$ : 表層地盤の弾性係数 (kgf/cm <sup>2</sup> ) $G_s$ : 表層地盤のせん断弾性係数 (kgf/cm <sup>2</sup> ) $\gamma$ : 表層地盤の単位体積重量 (kgf/cm <sup>3</sup> ) $g$ : 重力加速度 ( $9.8 \times 10^2$ cm/s <sup>2</sup> ) $h$ : 基盤面とパイプライン軸との距離 (cm) $\nu$ : 表層地盤のポアソン比 $I_\nu$ : 影響値 $\theta$ :  $x_1$ : 右図参照 $x_2$ : 右図参照
表層地盤面の水平変位振幅 $U_g$	$U_g = \frac{2}{\pi^2} \cdot S_{\nu^*} \cdot T \cdot K_{0h}^*$ (cm)	パイプライン建設地点で得られた応答スペクトル曲線(波長~振幅)を用いる。この曲線が得られない場合には、青木スペクトル又は $U_g = \frac{2}{\pi^2} \cdot S_{\nu^*} \cdot T \cdot K_{0h}$ (cm)	$K_{0h}$ : 設計基盤面における水平震度 $0.15\nu_1$ ( $\nu_1$ : 地域別補正係数) $S_{\nu^*}$ : 応答速度の基準値 石バ基準では建設省土木研究所で、BART・衣浦法では運輸省港湾技術研究所で各々作成したものを用いる。
合成応力度	$\sqrt{3.12\sigma_L^2 + \sigma_B^2}$	$\sqrt{\sigma_L^2 + \sigma_B^2}$	* 軸方向に 4 成分、軸直角方向に 1 成分の計 5 成分の地震動を考慮している。

地震動の多点同時観測に基づくパイプラインの応力の検討

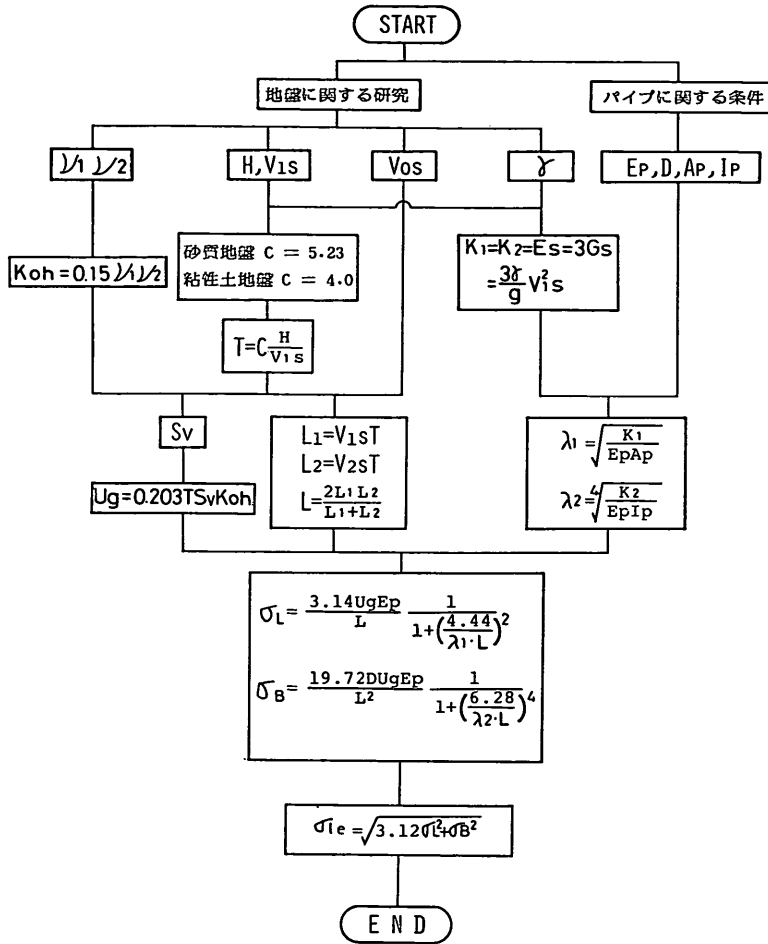


図-6.1 石油パイプライン技術基準による地震時軸方向応力度の計算方法 (記号については、付録参照)

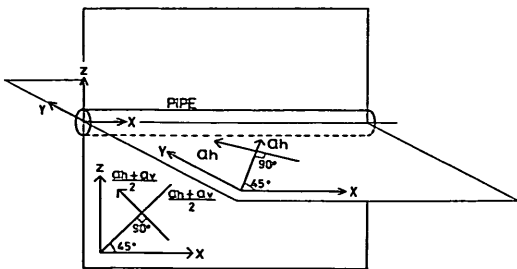


図-6.2 入力地震波の合成

$$\sigma_{ie} = \sqrt{3.12\sigma_L^2 + \sigma_B^2} \quad (6.3)$$

式 (6.3) は、パイプラインの軸方向応力度に関して、  
図-6.2 に示すようにパイプラインに 5 方向から地震波

が入射すると仮定して導びかれている。すなわち、地表面に水平な面内でかつパイプライン軸に対して 45 度と 135 度の角度から、2つの地震波が同時にパイプラインに入射し、かつ、地表面に対して鉛直な面内で、パイプライン軸に対して、45 度と 135 度の角度から、地盤の水平変位振幅と鉛直変位振幅の平均の振幅をもった 2つの地震波が同時にパイプラインに入射するものとして導びかれている。

なお、本報告では、地盤の変形とパイプラインの変形を等しいと見なしているため、 $(\sigma_L)_{max}$ 、 $(\sigma_B)_{max}$  は、簡単に次式で表される。

$$(\sigma_L)_{max} = \frac{\pi E_p U_g}{L} \quad (6.4)$$

$$(\sigma_B)_{\max} = \frac{2\pi^2 DE_p U_g}{L^2} \quad (6.5)$$

表層地盤面の水平変位振幅 ( $U_g$ ) は式 (6.6) で算定する。

$$U_g = \frac{2}{\pi^2} S_V \cdot T \cdot K_{0h} \quad (\text{cm}) \quad (6.6)$$

応答速度 ( $S_V$ ) は、石油パイプライン技術基準では

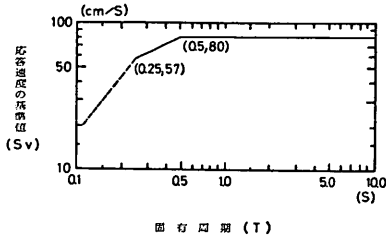


図-6.3 応答速度の基準値

80 cm/s を基準値としている。設計基盤面における水平震度 ( $K_{0h}$ ) は式 (6.7) で求めることになっている。

$$K_{0h} = \nu_1 \cdot \nu_2 \cdot K_0 \quad (6.7)$$

観測に基づいて計算したパイプの応力度と石油パイプライン技術基準の方法による値を比較するためには、観測された地震動の加速度から、設計基盤面での水平震度を求める必要がある。これには、多くの議論があるが、本報告では、各測点の水平最大加速度（水平2成分を時間的に合成したものの最大値）と重力の加速度の比の値を地表面における設計震度とし、これを地盤種別係数 (=1.6) で割ったものを設計基盤面における水平震度とする。なお、次項で述べる BART・衣浦法の場合には、各測点の水平最大加速度を、設計加速度値とする。

表層地盤の固有周期 ( $T$ ) は、式 (6.8) で算定する。

$$T = C \frac{H}{V_{1s}} \quad (6.8)$$

ここで、表層地盤を粘性土地盤と見て  $C$  として 4.0 を用いる。

表層地盤のせん断波速度 ( $V_{1s}$ ) は、測点 A, B で実施された速度検層 (PS 検層) で求められた各土層のせん断波速度  $V_{st}$  から式 (6.9) で算定する。

$$V_{1s} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{H_i}{V_{st}}} \quad (6.9)$$

ここで、 $H_i$ : 第  $i$  層の層厚 (cm)

$V_{st}$ : 第  $i$  層のせん断波速度 (cm/s)

なお、石油パイプライン技術基準では特に定められていないが、石油パイプラインが道路敷を占有する場合には、「石油パイプライン地震対策要綱、同解説」(昭和49年3月、日本道路協会<sup>23)</sup>)では、計算に用いるせん断波速度は、原則として、弾性波探査等で得られた実測値の1/2を用いることとしている。しかし、本報告で検討の対象とした地震では、地盤に生じるせん断ひずみは小さく、 $10^{-5}$ 程度であり、この程度のひずみに対しては、従来の研究成果<sup>24)</sup>から、土は弾性体とみてよいと考えられる。したがって、せん断波速度として速度検層での実測値をそのまま用いている。

地震動の波長 ( $L$ ) は、表層地盤での地震動の波長 ( $L_1$ ) と基盤での地震動の波長 ( $L_2$ ) の調和平均として算定する。

$$L = \frac{2L_1 \cdot L_2}{L_1 + L_2} \quad (\text{cm}) \quad (6.10)$$

表層地盤での地震動の波長 ( $L_1$ ) は、 $L_1 = V_{1s} \cdot T$ 、基盤で地震動の波長 ( $L_2$ ) は、 $L_2 = V_{os} \cdot T$  で各々算定する。

#### (2) BART・衣浦法

パイプラインに生じる応力度の算定は、石油パイプライン技術基準の方法と同じで、式 (6.1) および式 (6.2) を用いる。合成応力度 ( $\sigma_{ie}$ ) は、石油パイプライン技術基準の方法と異なって、軸応力度と曲げ応力度との二乗和の平方根として求められる。(式 (6.11))

$$\sigma_{ie} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_B^2} \quad (\text{kgf/cm}^2) \quad (6.11)$$

表層地盤面の水平変位振幅は、青木<sup>8)</sup>によって提案された等価正弦波振幅スペクトルを用いて算定する(誘導方法を付録 A.2 に示す)。青木は、表層地盤を軟弱な状態 (C)、堅い状態 (A)、中間の状態 (B) に区分し、更に、マグニチュードをも考慮して、設計スペクトルを作成している。今回の検討では、当該地盤が、 $N$  値3程度のゆるいシルトで構成されているので、中間の状態とみて (B) を選定するが、青木の提案しているように、スペクトルを求める際の変動を考慮して、 $(B) + \sigma$  ( $\sigma$  は標準偏差) のスペクトルを使用する (図-6.4)。

BART・衣浦法では、地盤の固有周期と水平変位振幅に関する等価正弦波振幅スペクトルを、地震動の波長と水平変位振幅に関するスペクトルに変換する。この変換は  $L = V_{1s} \cdot T$  の関係を用いて行う。

BART・衣浦法では、パイプに生じる応力度を算定する際には、地震動の波長を適宜変えながら、パイプライ

地震動の多点同時観測に基づくパイプラインの応力の検討

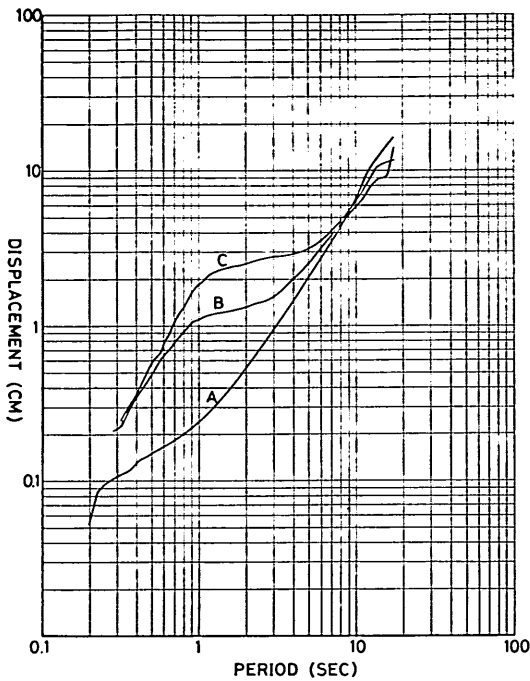


図-6.4 等価正弦波振幅スペクトル

ンに発生する最大の断面力を見つける手順を踏んでいる。

以上、(1)、(2)の計算を行う際に用いた土質条件は、  
 3.2 土層構成で述べたボーリング孔を利用した速度検層  
 結果に基づいて、図-6.5 のとおり設定した。

6.2 計算結果

設計震度あるいは設計加速度の設定に用いた各測点の最大加速度の値を表-6.2に示す。地盤条件がほぼ一定な区間の最大加速度としては、測点A~Cの平均値を、地盤条が変化している区間の最大加速度としては、測点D~Fの平均値を用いた。各区間ごとの平均最大加速度は、測点D~Fの値の方が測点A~Cの値よりも大きかった。これは、地震の振動特性と地震波の特性の差によるものと考えられる。

パイプラインに生じる応力度を、地震ごと、測点 A、E ごとに、6.1 計算方法に示す方法で計算したものを表-6.3に示す。計算結果では、合成応力度については、石油パイプライン技術基準による値と BART・衣浦法による値は、同程度であったが、軸応力度および曲げ応力度については、BART・衣浦法の方が大きい値を与えた。この原因は、応力度を計算するのに用いた波長の求め方の差にあると考えられる。すなわち、BART・衣浦法では地表層の  $V_{1s}$  を用いて  $L=V_{1s} \cdot T$  で波長を計算しているのに対して、石油パイプライン技術基準では、 $L=2L_1L_2/(L_1+L_2)$ 、 $L_1=V_{1s}$ 、 $L_2=V_{0s}T$  ( $V_{0s}$  は基盤層でのせん断波速度) と地表層での波長と地表層での波長との調和平均をとっており、結果的に BART・衣浦法での波長 ( $L$ ) より長い波長をとっていることになる。したがって式 (6.4) で計算される  $(\sigma_L)_{max}$  が石油パイプライン技術基準のものより小さくなる。式 (6.4) では、 $U_g$  も  $T$  によって変化するが、その変化の度合より  $L$  の変化の度合は大きい。

A 点

深 (m)	層厚 (m)	層号	土質名	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	せん断波速度 (m/s)
0.00					
9.50	9.50	As-1	砂	1.90	170
28.00	28.00	Ac	シルト質粘土	1.50	130
37.50					
43.60	5.60	As-2	砂	1.60	240
60.10	16.50	Ac	シルト質粘土	1.55	200
					310

$$T = \frac{64}{V_{1s}} = 1.52 \text{ s}$$

E 点

深 (m)	層厚 (m)	層号	土質名	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	せん断波速度 (m/s)
0.00					
7.20	7.20	As-1	砂	1.90	130
15.60	8.40	Asc	シルト質砂	1.75	160
28.00	12.40	Ap	シルト質粘土	1.60	130
37.00	9.00	As-2	砂	1.70	260
39.50	2.50	As	砂	2.00	260
42.00	2.50	As	シルト質粘土	2.10	190
46.00	4.00	As	砂	2.05	190
					330

$$T = \frac{64}{V_{1s}} = 1.13 \text{ s}$$

図-6.5 計算に用いた土質条件

表-6.2 地表面での最大加速度

単位: Gal

地震番号	測点	合成最大加速度		地震番号	測点	合成最大加速度	
		$\alpha_{max}$	平均値			$\alpha_{max}$	平均値
TIA- 3	A	10.3	12.5	TIA-17	A	9.2	11.2
	B	13.1			B	10.5	
	C	14.2			C	13.9	
	D	15.9	D		13.7		
	E	21.8	E		16.2		
	F	19.1	F		11.6		
TIA- 6	A	6.3	9.7	TIA-20	A	13.2	13.6
	B	12.4			B	13.8	
	C	10.3			C	13.7	
	D	12.9	D		15.5		
	E	11.9	E		21.5		
	F	11.5	F		16.6		
TIA- 9	A	26.4	36.1	TIA-41	A	25.5	26.3
	B	48.6			B	19.2	
	C	33.2			C	34.2	
	D	33.8	D		44.3		
	E	51.3	E		29.9		
	F	42.4	F		33.3		
TIA-10	A	5.8	7.1	TIA-50	A	17.4	16.8
	B	6.9			B	13.7	
	C	8.4			C	19.2	
	D	11.4	D		24.0		
	E	9.2	E		33.4		
	F	10.6	F		29.1		

表-6.3 パイプラインの応力度 (既往の計算法による計算値)

単位: kgf/cm<sup>2</sup>

地震記録	測点	軸 応 力 度		曲 げ 応 力 度		合 成 応 力 度	
		石油パイプライン技術基準	BART・衣浦法	石油パイプライン技術基準	BART・衣浦法	石油パイプライン技術基準	BART・衣浦法
TIA- 3	A-C	41	69	0.29	1.05	72	69
	A-F	59	101	0.54	1.49	105	101
TIA- 6	A-C	32	53	0.22	0.81	56	53
	A-F	38	65	0.34	0.96	67	65
TIA- 9	A-C	118	199	0.82	3.03	208	199
	A-F	133	227	1.21	3.36	236	227
TIA-10	A-C	23	39	0.16	0.59	41	39
	A-F	33	56	0.30	0.82	58	56
TIA-17	A-C	37	62	0.26	0.94	65	62
	A-F	43	74	0.39	1.09	77	74
TIA-20	A-C	44	75	0.31	1.14	78	65
	A-F	56	96	0.51	1.41	99	96
TIA-41	A-C	86	145	0.60	2.21	151	145
	A-F	112	191	1.02	2.83	199	191
TIA-50	A-C	55	92	0.38	1.41	97	92
	A-F	90	154	0.82	2.28	160	154

地震動の多点同時観測に基づくパイプラインの応力の検討

7. 観測地震動に基づいて計算したパイプの応力  
度と既往の計算法によるパイプの応力度の比  
較

5.2, 6.2 で示したパイプの応力度をまとめて表-7.1,  
図-7.1 に示す。

(1) 地盤条件がほぼ一定な区間 (測点A~C)

軸応力度について石油パイプライン技術基準による値  
( $\sigma_L'$ ) と観測に基づいて計算した値 ( $\sigma_L$ ) を比較すると,  
 $\sigma_L'$  は  $\sigma_L$  の 2 倍以上である。BART・衣浦法による値

( $\sigma_L$ ) は,  $\sigma_L$  の 4 倍以上となっている。

曲げ応力度について石油パイプライン技術基準による  
値 ( $\sigma_B'$ ) と観測に基づいて計算した値 ( $\sigma_B$ ) を比較す  
ると,  $\sigma_B'$  は,  $\sigma_B$  の 10 倍以上である。BART・衣浦  
法による値 ( $\sigma_B'$ ) は,  $\sigma_B$  の 100 倍以上となっている。

合成応力度について石油パイプライン技術基準による  
値 ( $\sigma_{ie}'$ ) と観測に基づいて計算した値 ( $\sigma_{ie}$ ) を比較す  
ると,  $\sigma_{ie}'$  は  $\sigma_{ie}$  の 4 倍以上である。BART・衣浦法によ  
る値 ( $\sigma_{ie}''$ ) は,  $\sigma_{ie}$  の 4 倍以上となり, 石油パイプライン  
技術基準による値と同じ程度である。

表-7.1 (a) パイプラインの応力度 (地盤条件がほぼ一定な区間)

単位: kgf/cm<sup>2</sup>

地震番号	軸 応 力 度		曲 げ 応 力 度		合 成 応 力 度	
	観 測	石油パイプ ライン技術基準	観 測	石油パイプ ライン技術基準	観 測	石油パイプ ライン技術基準
TIA- 3	15	41	0.0082	0.29	15	72
TIA- 6	7	32	0.0032	0.22	7	56
TIA- 9	8	118	0.0044	0.82	8	208
TIA-10	7	23	0.0034	0.16	7	41
TIA-17	11	37	0.0054	0.26	11	65
TIA-20	15	44	0.0075	0.31	15	78
TIA-41	1	86	0.0002	0.60	1	151
TIA-50	6	55	0.0004	0.38	6	97

表-7.1 (b) パイプラインの応力度 (地盤条件が変化している区間)

単位: kgf/cm<sup>2</sup>

地震番号	軸 応 力 度			曲 げ 応 力 度			合 成 応 力 度		
	観 測	石油パイ プライン 技術基準	BART・ 衣 浦 法	観 測	石油パイ プライン 技術基準	BART・ 衣 浦 法	観 測	石油パイ プライン 技術基準	BART・ 衣 浦 法
TIA- 3	-36	59	101	0.019	0.54	1.49	36	105	101
TIA- 6	-14	38	65	0.010	0.34	0.96	14	67	65
TIA- 9	21	133	227	0.013	1.21	3.36	21	236	227
TIA-10	10	33	56	0.007	0.30	0.82	10	58	56
TIA-17	29	43	74	0.021	0.39	1.09	29	77	74
TIA-20	34	56	96	0.019	0.51	1.41	34	99	96
TIA-41	- 2	112	191	0.001	1.02	2.83	2	199	191
TIA-50	-14	90	154	0.011	0.82	2.27	15	160	154

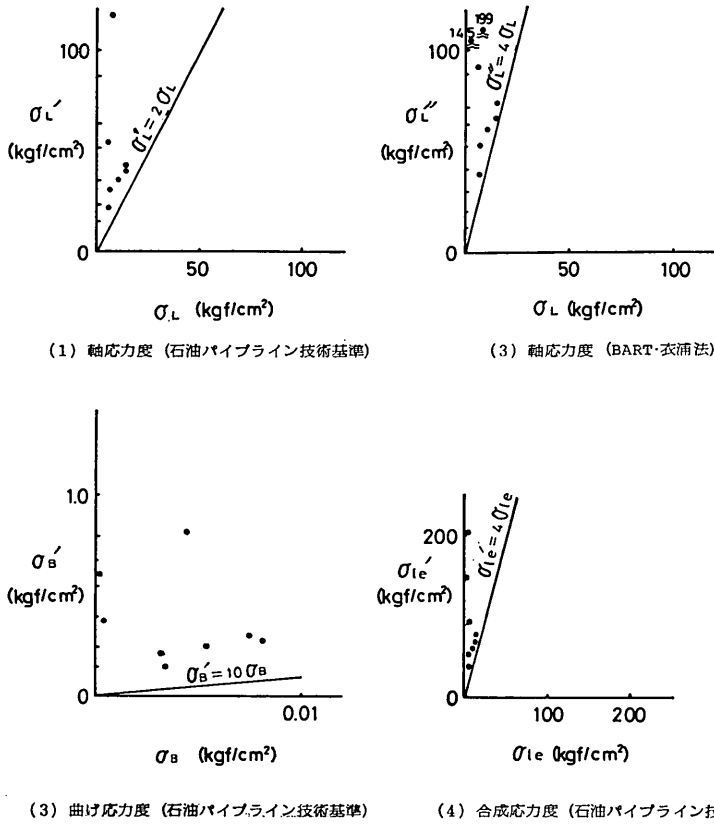


図-7.1 (a) 観測地震動に基づいて計算したパイプの応力度と既往の計算法による応力度の関係 (地盤条件がほぼ一定な区間)

(2) 地盤条件が変化している区間 (測点A~F)

軸応力度について石油パイプライン技術基準による値 ( $\sigma_L'$ ) と観測に基づいて計算した値 ( $\sigma_L$ ) を比較すると、 $\sigma_L'$  は  $\sigma_L$  の 1.2 倍以上である。BART・衣浦法による値 ( $\sigma_L''$ ) は、 $\sigma_L$  の 2 倍以上となっている。

曲げ応力度について石油パイプライン技術基準による値 ( $\sigma_B'$ ) と観測に基づいて計算した値 ( $\sigma_B$ ) を比較すると、 $\sigma_B'$  は  $\sigma_B$  の 10 倍以上である。BART・衣浦法による値 ( $\sigma_B''$ ) は、 $\sigma_B$  の 50 倍以上となっている。

合成応力度について、石油パイプライン技術基準による値 ( $\sigma_{Le}'$ ) と観測に基づいて計算した値 ( $\sigma_{Le}$ ) を比較すると、 $\sigma_{Le}'$  は  $\sigma_{Le}$  の 2 倍以上である。BART・衣浦法による値 ( $\sigma_{Le}''$ ) は、 $\sigma_{Le}$  の 2 倍以上となり、石油パイプライン技術基準による値と同じ程度である。

以上の結果から、地盤条件がほぼ一定な区間では、石油パイプライン技術基準による軸方向応力度 (合成応力度) は、観測に基づいて計算した値の 4 倍以上となり、パイプラインの経済的、合理的な耐震設計という見地からすれば、また検討の余地があるといえよう。地盤条件が変化している区間では、石油パイプライン技術基準による軸方向応力度 (合成応力度) は、観測に基づいて計算した値の 2 倍以上となる。

地盤条件がほぼ一定な区間で、石油パイプライン技術基準によって計算したパイプの地震時軸方向応力度が、今回、羽田空港での観測に基づいて計算した値に比べてかなり大きい原因のうち、主なものとして、次の 2 点が考えられる。① パイプの応力度を計算するときに想定する地震波の波長  $L$  を、地表層のせん断波の波長 ( $L_1$

地震動の多点同時観測に基づくパイプラインの応力の検討

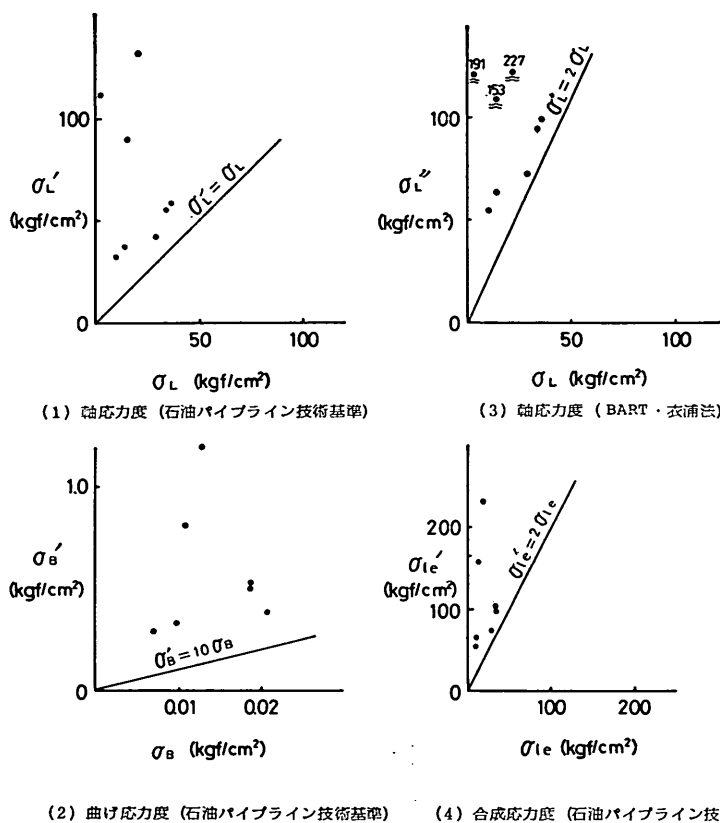


図-7.1 (b) 観測地震動に基づいて計算したパイプの応力度と既往の計算法による応力度の関係 (地盤条件が変化している区間)

$=V_{1s} \cdot T$  と基盤層におけるせん断波の波長 ( $L_2 = V_{0s} \cdot T$ ) の調和平均としていること。② パイプの軸方向応力度を計算する場合、図-6.2 に示すように 5 方向からの地震波を合成していること。これらの方法は、石油パイプライン技術基準が、制定された時点では、地震波の伝播等について、実測等の十分なデータがなく、それに関する知見も蓄積されていなかったため、安全をみて、決定されたものと考えられる。そう考えれば、今回の観測に基づいて計算された応力度が、石油パイプライン技術基準で計算したものよりも小さな値を与えるのも納得できる。今回の観測結果をもとに、上記の 2 点について以下に考察する。① については、既に 5.2 で検討を行っている。② については、ここでは、パイプの軸応力度だけに着目する。図-6.2 に示すように、石油パイプライン技術基準では、水平面内でパイプライン軸に、各々 45

度の角度をなして入射する 2 成分の地震波と、鉛直面内で、パイプラインの軸に各々 45 度の角度をなして入射する 2 成分の計 4 成分の地震波を合成している。今、各々の方向の地震波を単一の周期をもつ正弦波と仮定し、その振幅、周波数、位相が相互に全く同じであると考えると、合成された地震波は定在波となって、パイプラインの軸上で、地震波は、伝播していないように見えるはずである。各々の地震波の周期だけが異なるとしても、地震波はパイプライン軸上を進行していないように見える。各々の地震波の位相が異なっていると、地震波はパイプラインの軸上を進行しているように見えるが、その伝播速度は、成分波の速度を越えることはない。今回、観測された地震波は、パイプラインの軸に沿って、より深い土層のせん断波速度程度の速度で伝播していることから、4 方向からの入射はないと考えられる。



表-7.2 観測に基づいて計算した応力度と既往の計算法による応力度の比較

地震番号	マグニ チュード	震 央 距 離 (km)	深 度 (km)	地盤条件が一定な区間				地盤条件が変化している区間			
				石油パイプ ライン技術基準		BART・衣浦法		石油パイプ ライン技術基準		BART・衣浦法	
				$\sigma_L/\sigma_L'$	$\sigma_B/\sigma_B'$	$\sigma_L/\sigma_L''$	$\sigma_B/\sigma_B''$	$\sigma_L/\sigma_L'$	$\sigma_B/\sigma_B'$	$\sigma_L/\sigma_L''$	$\sigma_B/\sigma_B''$
TIA- 3	6.9	140	10	0.37	0.028	0.22	0.0078	0.61	0.035	0.36	0.013
TIA- 6	6.3	161	40	0.22	0.015	0.13	0.0040	0.36	0.029	0.21	0.010
TIA- 9	5.8	54	50	0.07	0.005	0.04	0.0015	0.16	0.011	0.09	0.004
TIA-10	6.4	259	60	0.29	0.021	0.17	0.0058	0.31	0.023	0.18	0.009
TIA-17	6.1	125	40	0.31	0.021	0.18	0.0057	0.67	0.054	0.39	0.019
TIA-20	7.5	558	320	0.34	0.024	0.20	0.0066	0.61	0.037	0.36	0.013
TIA-41	4.6	26	60	0.01	0.000	0.01	0.0001	0.02	0.001	0.01	0.000
TIA-50	—	424	440	0.11	0.001	0.07	0.0003	0.16	0.013	0.10	0.005

$\sigma_L$  : 最大軸応力度 (観測)  
 $\sigma_L'$  : 最大軸応力度 (石油パイプライン技術基準による計算値)  
 $\sigma_L''$  : 最大軸応力度 (BART・衣浦法による計算値)  
 $\sigma_B$  : 最大曲げ応力度 (観測)  
 $\sigma_B'$  : 最大曲げ応力度 (石油パイプライン技術基準による計算値)  
 $\sigma_B''$  : 最大曲げ応力度 (BART・衣浦法による計算値)

観測に基づいて計算したパイプの応力度と石バ基準に

よる計算値の比の値を 表-7.2 に示す。地盤条件がほぼ一定な区間について、それらの比の値と震央距離およびマグニチュードの関係を 図-7.2 に示す。図-7.2 から、観測に基づいて計算したパイプの応力度と石油パイプライン技術基準による計算値の比の値は、マグニチュードおよび震央距離に比例して大きくなるのがわかる。この傾向は、図-5.7 の  $\varepsilon_{Lmax}/\alpha_{max}$  と震央距離、マグニチュードの関係と同じである。石油パイプライン技術基準では、上に示したような地震動のマグニチュードおよび震央距離とパイプの応力度の関係を考慮せず、単に、計算を行う地点の情報だけでパイプの応力度を評価している。この点も、今後の検討課題の一つであると考えられる。

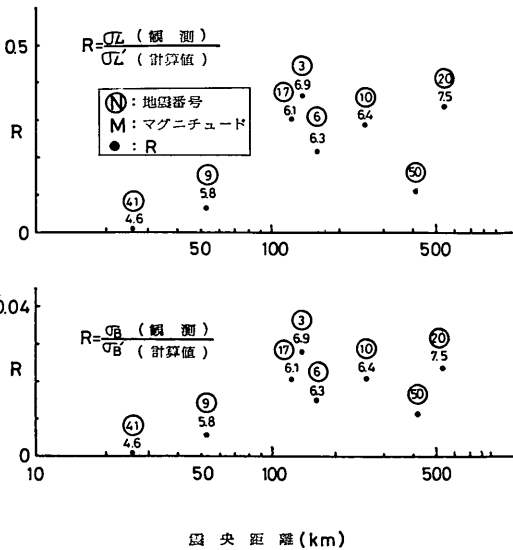


図-7.2 観測地震動に基づいて計算したパイプの応力度と既往の計算法による応力度の比の値と、震央距離、マグニチュードの関係 (地盤条件がほぼ一定な区間)

## 8. 結 論

本報告で解析の対象とした羽田空港における地震動の多点同時観測結果の解析により、測線に沿って埋設された仮想のパイプラインに生じる地震時の応力度ならびに、それらと石油パイプライン技術基準およびBART・衣浦法による応力度との関係について、以下に示す主要な結論が得られた。

① 地盤条件がほぼ一定と見なせる場所では石油パイプライン技術基準で求めたパイプの軸方向応力度は、観測に基づいて計算した値の4倍以上であった。このような場所では、石油パイプライン技術基準の方法は、経済的、合理的設計法という見地からすれば、パイプラインの耐震設計法としてまだ検討の余地があるといえよう。

② 地盤条件が変化している場所では、石油パイプライン技術基準で計算した軸方向合成応力度は、観測に基づいて計算した値の2倍程度であり、地盤条件がほぼ一定の場所に比べて2倍程度であった。

③ 地盤条件がほぼ一定と見なせる場所で石油パイプライン技術基準で計算したパイプの地震時軸応力度が観測に基づいて計算した値よりもかなり大きくなる原因のひとつは、軸方向応力度を求める際石油パイプライン技術基準では、5方向からの地震波を想定し応力度を合成しているところにある。今回の観測では、地震波は、見かけ上一方向からパイプラインに入射するように見えた。

④ 地表面での地震波の伝播速度は、1.2~10.1 km/sであった。地震波の変位波形で卓越する成分の波長は、それらの伝播速度と、卓越周期1~2秒から求まり1.4~11.1 kmとなった。したがって、測点の間隔(500 m)よりも短い波長を持つ地震波は、卓越していなかったと考えられる。

⑤ 地表面での最大加速度とパイプに生じる軸ひずみの比の値は、地震の震央距離、震源の深さ、マグニチュードおよびパイプライン軸と震源方向のなす角などと密接な関係があった。震源が遠く浅い地震では、パイプライン軸とほぼ45度をなす角度から地震波が入射した場合、ほかの角度よりも大きな応力度をパイプに与えた。

⑥ 今回対象とした地点についてはBART・衣浦法でのパイプの軸方向応力度の計算値は、石油パイプライン技術基準での値と同程度であった。

## 9. あとがき

本報告は、羽田空港における地震動の多点同時観測資料に基づいて、パイプラインの既往の耐震設計法(石油パイプライン技術基準およびBART・衣浦法)の検討を行うことを目的としたものである。羽田空港で行われているような大規模な多点同時観測は、ほかに例が少なく、この観測資料に基づいて検討した結果は、今後の同種構造物の耐震設計法を検討するに当たっての貴重な資料となると考える。将来とも羽田空港での地震観測を継続実

施し、更に、情報を得る予定である。パイプラインの地震時の挙動については、実験や観測によりかなり把握されているものの未説明の部分もあるのが現状である。パイプの応力度に大きな影響を与える条件の一つに地盤の急変部がある。羽田空港の地盤は、ほぼ一樣と考えられているが、更に、地盤が急変すると思われる場所については、より詳細な検討が必要となろう。動的応答計算法によるパイプの応力度の検討を行うことも必要となろう。(1980年9月30日受付)

## 謝 辞

東京国際空港における地震観測網は、新関西国際空港の技術調査の一環として設置されたものである。地震計の設置に当っては、東京航空局東京空港事務所の御協力を得た。これら関係機関並びに関係各位に感謝の意を表します。

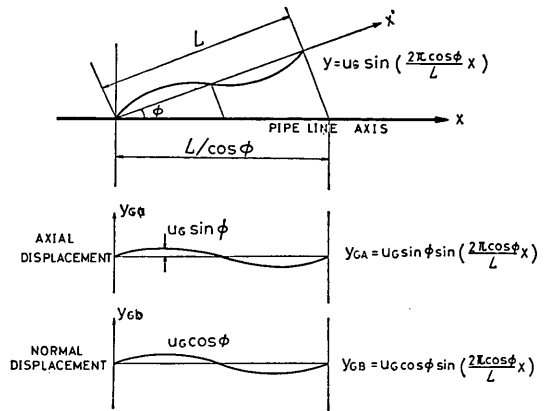
計算の一部は、野瀬達哉氏(元豊橋技術科学大学生)が夏季実習生として当所に滞在中実施した。ここに当氏の努力に敬意を表する。

## 参 考 文 献

- 1) 青木義典・土田 肇・林 聰: 沈埋トンネルの野外模型振動実験, 港湾技術研究所報告, Vol. 11, No. 3, 1972年9月, pp. 261~307.
- 2) 那須信治: 沈埋管の振動実験, 土と基礎, Vol. 29, No. 1, 1972年1月, pp. 21~30.
- 3) 桜井彰雄・高橋 忠・栗原千鶴子・矢島 浩: 地震時土の歪より見た埋設パイプラインの耐震性(超高圧地中電線路埋設管路の耐震研究 その2), 電力中央研究所技術研究所報告, No. 69087, 1970年2月.
- 4) Hajime Tsuchida, Eiichi Kurata, and Satoshi Hayashi: "Observation of earthquake response of ground with horizontal and vertical seismometer arrays," Proc. of the Sixth World Conference on Earthquake Engineering, Vol. 1, January 1977, pp. 509~514.
- 5) Hajime Tsuchida, Setsuo Noda, Susumu Iai, and Eiichi Kurata: "Observation of earthquake response of ground with horizontal and vertical seismometer arrays (2nd report)," Proc. of the Seventh World Conference on Earthquake Engineering, Vol. 2, September 1980, pp. 475~482.
- 6) 野田節男・倉田栄一・土田 肇: 港湾における高密度強震観測, 土木学会第16回地震工学研究発表会講演概要, 1981年7月, pp. 37~40.
- 7) 青木義典・田淵民雄: 沈埋トンネルと地盤の相互作用に関する実験的研究, 港湾技術研究所報告, Vol. 11, No. 4, 1972年12月, pp. 271~290.
- 8) 青木義典・丸山 浩: 沈埋トンネル耐震設計用ス

ベクトルについて、港湾技術研究所報告, Vol. 11, No. 4, 1972年12月, pp. 291~314.

- 9) 石油パイプライン事業の事業用施設の技術上の基準を定める省令, 昭和47年通商産業省, 運輸省, 建設省, 自治省令第2号.
- 10) 石油パイプライン事業の事業用施設の技術上の基準を定める告示, 昭和48年通商産業省, 運輸省, 建設省, 自治省告示第1号.
- 11) 港湾の施設の技術上の基準を定める省令, 運輸省令第30号, 官報14263号, 昭和49年7月16日, pp. 5~7.
- 12) 運輸省港湾局, 港湾の施設の技術上の基準を定める省令について (局長通達), 昭和53年10月16日.
- 13) 運輸省港湾局監修: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, I 超大型石油タンカー用施設, II 海上貯油基地施設, 日本港湾協会, 1980年9月.
- 14) 危険物の規制に関する政令, 昭和34年9月26日政令第306号.
- 15) 清宮 理: 海底パイプラインの耐震設計法の検討 港湾技研資料, No. 307, 1978年12月.
- 16) 土田 肇, 倉田栄一, 中山茂雄, 林 聰: 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, 土木学会第14回地震工学研究発表会講演概要, 1976年7月, pp. 197~200.
- 17) Hajime Tsuchida and Eiichi Kurata: "Observed earthquake ground displacements along a 2500 meter line," Proc. of U.S.-Japan Seminar on Earthquake Engineering Research with Emphasis on Lifeline Systems, November 1976, pp. 29~42.
- 18) 井合 進・倉田栄一・土田 肇: 強震記録の数字化と補正, 港湾技研資料, No. 286, 1978年3月.
- 19) (例えば) 倉田栄一・井合 進・土田 肇: 港湾地域強震観測年報 (1976・1977), 港湾技研資料, No. 287, 1978年3月.
- 20) 清宮 理・藤沢孝夫: 衣浦港沈埋トンネルでの地震応答観測, 第14回土質工学研究発表会昭和54年度発表講演集, 1979年, pp. 1509~1512.
- 21) 南 兼一郎・清宮 理・藤沢孝夫: 川崎港海底トンネルにおける地震観測, 第16回地震工学研究発表会講演概要, 1981年, pp. 69~72.
- 22) 青木義典: 沈埋トンネルの耐震設計について, 1977年9月, 東京都立大学学位論文.
- 23) 日本道路協会: 石油パイプライン地震対策要綱, 同解説, 昭和49年3月.
- 24) Seed, H. B. and Idriss, I. M.: Influence of Soil Conditions on Ground Motions during Earthquakes, Proc. ASCE, SM1, pp. 99~137, (1969).



付図-A-1.1 パイプラインに入射する地震波

図-A.1 にパイプラインと地震波との関係を示す。地震波は、パイプライン軸に対して  $\phi$  度の角度で入射し、その波形は正弦波とする。パイプラインに発生する軸応力度と曲げ応力度は、次に示す方法で算定される。

(1) 軸応力度の算定法

パイプラインを弾性床上の梁と仮定すると軸方向に関する基本式は、式 (A-1.1) で示される。

$$E_p A_p \frac{d^2 y_{p1}}{dx^2} + K_1 (y_{\sigma 1} - y_{p1}) = 0 \quad (A-1.1)$$

パイプライン軸方向に関する表層地盤面の水平変位振幅 ( $y_{\sigma 1}$ ) は、式 (A-1.2) で、同じく、パイプラインの水平変位振幅 ( $y_{p1}$ ) は、式 (A-1.3) で各々示される。

$$y_{\sigma 1} = U_G \sin \phi \sin \left( \frac{2\pi \cos \phi}{L} x \right) \quad (A-1.2)$$

$$y_{p1} = U_p \sin \phi \sin \left( \frac{2\pi \cos \phi}{L} x \right) \quad (A-1.3)$$

ここで、

$U_G$  : 表層地盤面の水平変位振幅 (cm)

$U_p$  : パイプの水平変位振幅 (cm)

$L$  : 表層地盤の地表面近傍における地震動の波長 (cm)

$E_p$  : パイプの弾性係数 ( $\text{kg}\cdot\text{f}/\text{cm}^2$ )

$A_p$  : パイプの断面積 ( $\text{cm}^2$ )

$K_1$  : パイプの軸方向の変位に関する地盤の剛性係数 ( $\text{kg}\cdot\text{f}/\text{cm}^2$ )

$\phi$  : 地震波のパイプライン軸への入射角 (度)

式 (A-1.2) および式 (A-2.3) を式 (A-2.1) に代入して整理するとパイプライン軸方向に関するパイプラインの水平変位振幅と表層地盤面での水平変位振幅の関係が得られる。

付 録

A.1 石油パイプライン事業法 (石油パイプライン技術基準) による方法

$$U_p = \frac{1}{1 + \frac{E_p A_p}{K_1} \left( \frac{2\pi \cos \phi}{L} \right)^2} \cdot U_g \quad (\text{A-1.4})$$

パイプラインに発生する軸ひずみ ( $\epsilon_L$ ) は、 $\epsilon_L = \frac{\partial y_{p1}}{\partial x}$  で算定されるので、軸応力度 ( $\sigma_L$ ) は、式 (A-1.5) で求めることができる。

$$\sigma_L = \epsilon_L \cdot E_p = \frac{U_g \cdot E_p}{1 + \frac{E_p A_p}{K_1} \left( \frac{2\pi \cos \phi}{L} \right)^2} \cdot \frac{2\pi}{L} \times \cos \phi \sin \phi \cos \frac{2\pi \sin \phi}{L} x \quad (\text{A-1.5})$$

式 (A-1.5) で地震波の入射角 ( $\phi$ ) が 45 度の場合に軸応力度が最大となる。この最大値 ( $\sigma_L$ )<sub>max</sub> は式 (A-1.6) で示される。

$$(\sigma_L)_{\max} = \frac{1}{1 + \frac{E_p A_p}{2K_1} \left( \frac{2\pi}{L} \right)^2} \cdot \frac{\pi E_p U_g}{L} \quad (\text{kgf/cm}^2) \quad (\text{A-1.6})$$

(2) 曲げ応力度の算定法

パイプライン軸直角方向に関する基本式は、式 (A-1.7) で示される。

$$E_p I_p \frac{d^4 y_{p2}}{dx^4} - K_2 (y_{p2} - y_{g2}) = 0 \quad (\text{A-1.7})$$

ここで、

$y_{g2}$ : パイプラインの軸直角方向に関する表層地盤面の水平変位振幅 (cm)

$y_{p2}$ : パイプラインの軸直角方向に関するパイプラインの水平変位振幅 (cm)

$K_2$ : パイプライン軸直角方向の変位に関する地盤の剛性係数 (kg·f/cm<sup>2</sup>)

$I_p$ : パイプの断面 2 次モーメント (cm<sup>4</sup>)

パイプライン軸直角方向の表層地盤面の水平変位振幅 ( $y_{g2}$ ) を式 (A-1.8) に、同じくパイプラインの水平変位振幅 ( $y_{p2}$ ) を式 (A-1.9) に各々示す。

$$y_{g2} = U_g \cdot \cos \phi \sin \left( \frac{2\pi \cos \phi}{L} x \right) \quad (\text{A-1.8})$$

$$y_{p2} = U_p \cdot \cos \phi \sin \left( \frac{2\pi \cos \phi}{L} x \right) \quad (\text{A-1.9})$$

式 (A-1.8) および式 (A-1.9) を式 (A-1.7) に代入すると表層地盤の水平変位振幅 ( $U_g$ ) とパイプラインの水平変位振幅 ( $U_p$ ) との関係を示す式 (A-1.10) が得られる。

$$U_p = \frac{U_g}{1 + \frac{E_p I_p}{K_2} \left( \frac{2\pi \cos \phi}{L} \right)^4} \quad (\text{A-1.10})$$

パイプラインに発生する曲げひずみ ( $\epsilon_B$ ) は、したがって式 (A-1.11) で算定される。

$$\epsilon_B = -\frac{d^2 y_{p2}}{dx^2} \cdot \frac{D}{2} = \frac{U_g}{1 + \frac{E_p I_p}{K_2} \left( \frac{2\pi \cos \phi}{L} \right)^4} \cdot \frac{D}{2} \times \cos \phi \left( \frac{2\pi \cos \phi}{L} \right)^2 \cdot \sin \left( \frac{2\pi \cos \phi}{L} x \right) \quad (\text{A-1.11})$$

ここで、 $D$ : パイプラインの外径 (cm)

曲げ応力度 ( $\sigma_B$ ) は、 $\sigma_B = \epsilon_B \cdot E_p$  で示される。また、式 (A-1.11) で明らかなように地震波の入射角 ( $\phi$ ) が 0 度するとき、曲げ応力度は最大となる。曲げ応力度の最大値 ( $\sigma_B$ )<sub>max</sub> は、式 (A-1.12) で算定される。

$$(\sigma_B)_{\max} = \frac{U_g}{1 + \frac{E_p I_p}{K_2} \left( \frac{2\pi}{L} \right)^4} \cdot \frac{2\pi^2 D E_p}{L^2} \quad (\text{kgf/cm}^2) \quad (\text{A-1.12})$$

式 (A-1.6) および式 (A-1.12) で、

$$\left. \begin{aligned} \lambda_1 &= \frac{1}{1 + \frac{E_p A_p}{2K_1} \left( \frac{2\pi}{L} \right)^2} \\ \lambda_2 &= \frac{1}{1 + \frac{E_p I_p}{K_2} \left( \frac{2\pi}{L} \right)^4} \end{aligned} \right\} \quad (\text{A-1.13})$$

と置けば、パイプラインに発生する軸応力度および曲げ応力度の最大値は、最終的に式 (A-1.14) および式 (A-1.15) で示される。

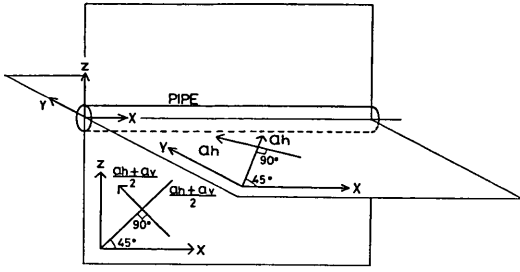
$$(\sigma_L)_{\max} = \lambda_1 \frac{\pi U_g E_p}{L} \quad (\text{kgf/cm}^2) \quad (\text{A-1.14})$$

$$(\sigma_B)_{\max} = \lambda_2 \frac{2\pi^2 D U_g E_p}{L^2} \quad (\text{kgf/cm}^2) \quad (\text{A-1.15})$$

石油パイプライン技術基準に示される方法では、パイプラインに発生する合成応力度 ( $\sigma_{te}$ ) は、式 (A-1.14)、式 (A-1.15) を用いて式 (A-1.16) で算定することになっている。

$$\sigma_{te} = \sqrt{3.12\sigma_L^2 + \sigma_B^2} \quad (\text{kgf/cm}^2) \quad (\text{A-1.16})$$

式 (A-1.16) は、パイプライン軸方向に関して、図 A-1.2 に示すとおりパイプラインに 4 方向から地震波が入射すると仮定して求められている。すなわち、地表面に水平でありかつパイプライン軸に対して 45 度と 135



付図-A-1.2 入力地震波の合成

度の角度でもって、2つの地震波が同時にパイプラインに入射し、かつ、地表面に対して鉛直でパイプライン軸に対して、45度と135度の角度でもって地盤の水平変位振幅と鉛直変位振幅の平均の変位振幅をもった2つの地震波が同時にパイプラインに入射するものとしている。

### A.2 等価正弦波振幅スペクトルの誘導<sup>2)</sup>

等価正弦波振幅スペクトルの誘導にあたり、前提として用いたものは、次のとおりである。

- ① トンネルの動的応答（自励振動等）は考慮せず、静的に計算する。
- ② トンネルを弾性床の上のりとする。
- ③ 強震記録を一定の速度で水平に伝播している波動のものであると考える。

いま、沈埋トンネルの曲げ剛性を  $E_p I_p$ 、地盤のパネ定数を  $K_2$ 、トンネルのトンネル軸直角方向の変位を  $u_t$  および地盤のトンネル軸直角方向の変位を  $u$  とし、トンネル軸にそって  $x$  軸をとれば、弾性床の上のり基本式から、式 (A-2.1) が成り立つ。

$$E_p I_p \frac{d^4 u_t}{dx^4} = K_2 (u - u_t) \quad (A-2.1)$$

$u$  として振幅  $U$  の正弦波を考え、トンネルの変形も、波形の同じ正弦波を考えると、無限に長いはりに対して、式 (A-2.1) から式 (A-2.2) の関係が得られる。

$$u_t = \frac{u}{\frac{E_p I_p}{K_2} \left(\frac{2\pi}{L}\right)^4 + 1} = \frac{U}{\frac{E_p I_p}{K_2} \left(\frac{2\pi}{L}\right)^4 + 1} \sin \frac{2\pi}{L} x \quad (A-2.2)$$

ここで、 $L$  は、地盤およびトンネルが変形している時の波長である。式 (A-2.2) を  $L = V \cdot T$  および  $x = V \cdot t$  として変形すれば、式 (A-2.3) を得る。ただし、 $V$  は速度、 $T$  は周期である。

$$u_t = \frac{U}{\frac{E_p I_p}{K_2} \left(\frac{2\pi}{V}\right)^4 \frac{1}{T^4} + 1} \sin \frac{2\pi}{T} t \quad (A-2.3)$$

ここで、

$$\tau = \frac{2\pi}{V} \sqrt{\frac{E_p I_p}{K_2}} \quad (A-2.4)$$

とおき、この  $\tau$  を剛比周期と呼ぶことにする。剛比周期は、トンネルと地盤の剛性から定まるもので、特定のトンネルに対しては固有の値で時間の単位を持っている。剛比周期を使って式 (A-2.3) を次のように書き直すことができる。

$$u_t = G(\tau, T) \cdot u = \frac{U}{\left(\frac{\tau}{T}\right)^4 + 1} \sin \frac{2\pi}{T} t \quad (A-2.5)$$

ここで、 $G(\tau, T) = 1 / [(\tau/T)^4 + 1]$  は地盤変形のトンネルへの伝達関数で、トンネルの剛比周期と地盤の振動周期によって定まる値である。トンネルの剛比周期が大きくなる（即ち、トンネルの剛性が土にくらべて大きくなる）と、0 に近づき、その逆の場合は、1 に近づく性質をもっている。

正弦波形で変形しているトンネルの曲率、 $\rho$  は次式で表わすことができる。

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{d^2 u_t}{dx^2} \\ &= \frac{1}{V^2} \frac{d^2 u_t}{dt^2} \\ &= -G(\tau, T) U \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \frac{1}{V^2} \sin \frac{2\pi}{T} t \quad (A-2.6) \end{aligned}$$

地盤振動の加速度振幅を  $a$  とすれば  $a = U \cdot \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2$  であるから式 (A-2.6) は、次のようにも書ける。

$$\rho V^2 = -G(\tau, T) \cdot a \sin \frac{2\pi}{T} t \quad (A-2.7)$$

一方、地震の加速度記録をフーリエ級数に展開して次のように表わすことができる。

$$a_e(t) = \sum_n a_n \sin \left( \frac{2\pi}{T_n} t + \phi_n \right) \quad (A-2.8)$$

ここで、 $a_e(t)$  は地震の加速度波形、 $a_n$  は、周期  $T_n$  の成分波の加速度振幅である。 $\phi_n$  はその成分の位相角である。式 (A-2.8) で表わされる各々の成分に対して、式 (A-2.7) が成り立つのであるから、 $a_e(t)$  なる地震波に対する剛比周期  $\tau$  のトンネルの変形は、各々の成分にその成分の周期に対する伝達関数をかけて位相を考慮して加え合わせるによって求めることができる。すなわち、

地震動の多点同時観測に基づくパイプラインの応力の検討

$$\rho V^2 = - \sum_n G(\tau, T_n) \cdot a_n \sin\left(\frac{2\pi}{T_n}t + \phi_n\right) \quad (A-2.9)$$

$\rho V^2$ は加速度の単位をもった値であり、剛比周期  $\tau$  を仮定すれば、数値化した加速度の地震記録から電子計算機によって式 (A-2.9) で、容易に計算することができかつ最大値  $|\rho V^2|_{\max}$  をも求めることもできる。曲率  $\rho$  の最大値は、 $\rho V^2$  の最大値を  $V^2$  (地盤内の地震波の波速) で割ることにより求められる。数多くの  $\tau$  の値に対して、 $|\rho V^2|_{\max}$  を計算すれば、特定の地震波に関するトンネルの曲げ曲率の設計スペクトルが  $\tau$  の関数として求まる。すなわち、曲率に対するこの値を、 $H_\rho(\tau)$  で表わせば、次のようになる。

$$H_\rho(\tau) = |\rho V^2|_{\max} = \left| -G(\tau, T_n) \cdot a_n \sin\left(\frac{2\pi}{T_n}t + \phi_n\right) \right|_{\max} \quad (A-2.10)$$

この  $H_\rho(\tau)$  を曲率応答スペクトルと呼ぶことにする。まったく同様の方法でせん断力についても応答スペクトルを求めることができる。

軸ひずみについても類似の手法を式 (A-2.11) に適用することによって、軸ひずみ応答スペクトル、式 (A-2.12) を求めることができるが、詳細については省略する。

$$E_p A_p = \frac{d^2 u_t'}{dx^2} = K_1 (u' - u_t') \quad (A-2.11)$$

$$H_\rho(\tau) = |\varepsilon_t \cdot V'|_{\max} = \left| \sum_n G'(\tau', T_n) \cdot a_n \frac{T}{2\pi} \cos\left(\frac{2\pi}{T_n}t + \phi_n\right) \right|_{\max} \quad (A-2.12)$$

ここで、

$u'$  : 地盤変位のトンネル軸方向成分

$u_t'$  : トンネルの変形の軸方向成分

$V'$  : 波速をトンネル軸方向に投影した値

$\tau'$  : 軸方向剛比周期

$$= \frac{2\pi}{V'} \sqrt{\frac{E_p A_p}{K_1}} \quad (A-2.13)$$

$G'(\tau', T)$ : 軸方向変位の周波数伝達関数

$$= \frac{1}{\left(\frac{\tau'}{T}\right)^2 + 1} \quad (A-2.14)$$

$E_p A_p$ : トンネルの軸方向剛性

$K_1$  : トンネルの軸方向の地盤反力係数

現在までに観測されている主要な強震記録について、

各種の断面力の応答スペクトルを計算して標準的なスペクトルを求めておけば、これを使用して沈埋トンネル等の地中構造物の耐震設計を行うことができる。しかしながら、各種の断面力の応答スペクトルを求めることははんだ雑であるので、これらの応答スペクトルを、これらと同じ値を与える単一の正弦波の振幅のスペクトルに変換した上で、平均をとり、一本の等価正弦波スペクトルとすることと考える。

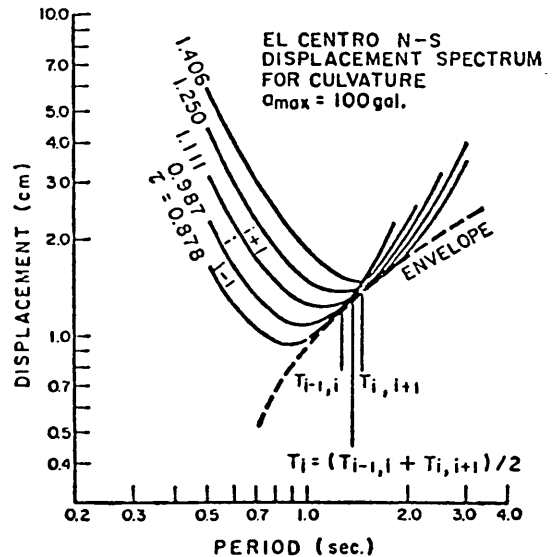
式 (A-2.6) は、単一正弦波によるトンネル変形を与える式である。振幅だけを取扱うことにすれば次のように書き改めることができる。

$$U_\rho = \frac{\rho V^2}{G(\tau, T)} \left(\frac{T}{2\pi}\right)^2 \quad (A-2.15)$$

式 (A-2.10) を代入することによってさらに次のようにも書ける。

$$U_\rho = \frac{H_\rho(\tau)}{G(\tau, T)} \left(\frac{T}{2\pi}\right)^2 \quad (A-2.16)$$

式 (A-2.16) は、 $U_\rho$  と  $T$  の座標上で  $\tau$  をパラメータとする下に凸の曲線群を表す。すなわち、 $T$  が  $\infty$  に近づけば、地盤の変形とトンネルの変形は全く一致し ( $G(\tau, T)$  は 0 に近づく)、そのとき  $U_\rho$  は、 $\infty$  となる。一方、 $T$  が 0 に近づけば、トンネルの変形は、地盤の変形に追従できにくくなり ( $G(\tau, T)$  は 0 に近づく) そのとき  $U_\rho$  はやはり  $\infty$  となる。図-A-2.2 にその関係を示す。図-A-2.2 に示すように、式 (A-2.16) で表



付図-A-2.1 変形と周期の関係

わされる曲線群の包絡線を引くことができる。この包絡線は次のような意味をもって来る。すなわち、この包絡線上の関係を満足する一連の  $U_p$  と  $T$  との組を式 (A-2.6) に代入して、ある特定のトンネルの曲率を計算すると、そのトンネルの  $\tau$  で表わされる式 (A-2.16) の曲率と包絡線が接している点で式 (A-2.10) と同じ値 (その地震波によってトンネルに発生する最大曲率) が得られる。包絡線上のそのほかの点では、式 (A-2.16) で表される曲線より下側、つまり小さい  $U_p$  を使用して計算することになるので曲率は、地震記録から式 (A-2.10) を用いて計算したものより小さくなってしまふ。

したがって、ある地震記録から、以上のような方法で式 (A-2.16) の包絡線を求め、その包絡線に沿って  $U_p$  と  $T$  を読みとりながら、式 (A-2.15) で曲率を計算してその最大値を求めると、直接地震記録から式 (A-2.10) を用いて計算した値と一致する。この包絡線は1つの地震記録から1つ得ることができ、トンネルに与える曲率に関して強震記録と等価な単一正弦波の周期と振幅との関係を示している。この包絡線を曲率に対する等価正弦波振幅スペクトルと呼ぶ。このスペクトルの基本的な性質として、周期が大きくなると対応する等価正弦波振幅スペクトルも増大することが挙げられる。

等価正弦波振幅スペクトルは、断面力ごとに求められるのであるが、設計に応用する際の便宜上、各断面力に対するスペクトルの概ね中央に位置する曲率に対する等価正弦波振幅スペクトルで代表させている。標準スペクトルとして与えられているものは、数多くの地震波について上記の曲率に対する等価正弦波スペクトルを求め、それを、地盤の種類、マグニチュードを考慮してクラス分けを行い、それぞれのクラス毎に統計処理を行って作

成したものである。

#### フローチャート中の諸記号の説明

- $H$  : 表層地盤の厚さ (cm)
- $V_s$  : 表層地盤のせん断波速度 (cm/s)
- $T$  : 表層地盤の固有周期 (s)
- $\nu_1$  : 地域別補正係数
- $\nu_2$  : 土地利用区分別補正係数
- $K_{0h}$  : 設計基盤面における水平震度
- $S_r$  : 応答速度の基準値 ( $T$  が 0.5 秒以上の地盤の場合は、80 cm/s とし、 $T$  が 0.5 秒未満の地盤の場合は、 $T$  に応じて、減らすことができる。)
- $U_g$  : 表層地盤面 (地表面) の水平変位振幅 (cm)
- $\gamma_c$  : 表層地盤の単位体積重量 (kgf/cm<sup>3</sup>)
- $g$  : 重力加速度 (cm/s<sup>2</sup>)
- $E_g$  : パイプのヤング係数 (kgf/cm<sup>2</sup>)
- $A_p$  : パイプの断面積 (cm<sup>2</sup>)
- $I_p$  : パイプの断面 2 次モーメント (cm<sup>4</sup>)
- $D$  : パイプの外径 (cm)
- $L$  : 表層地盤の地表面近傍における地震動の波長 (cm)
- $K_1$  : 軸方向の変位に関する地盤の剛性係数 (kgf/cm<sup>2</sup>)
- $K_2$  : 軸直角方向の変位に関する地盤の剛性係数 (kgf/cm<sup>2</sup>)
- $\lambda_1$  : 係数
- $\lambda_2$  : 係数
- $\sigma_L$  : パイプの軸応力度
- $\sigma_B$  : パイプの曲げ応力度
- $\sigma_{lc}$  : パイプの軸方向合成応力度