

港湾技研資料

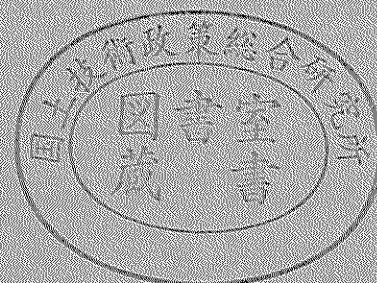
TECHNICAL NOTE OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 728 June 1992

沈埋トンネル柔継手の力学性状

清 宮 理
藤 澤 孝 夫
山 田 昌 郎
本 多 宗 隆

運輸省港湾技術研究所



目 次

要 旨	3
1. まえがき	3
2. 研究の背景	3
2. 1 柔継手の構造	3
2. 2 柔継手の耐震効果	6
3. 柔継手の設計	11
3. 1 柔継手の材料特性	11
3. 2 ばね定数の算定	12
4. 載荷試験	15
4. 1 試験体の構造	15
4. 2 使用材料	15
4. 3 静的試験の方法	17
4. 4 擬似動的載荷試験の方法	19
4. 5 計測項目	21
5. 試験結果	23
5. 1 静的試験の結果	23
5. 2 擬似動的試験の結果	27
6. 結論	31
7. あとがき	31
参考文献	32

Mechanical Properties of Flexible Joint between Submerged Tunnel Elements

Osamu KIYOMIYA*
Takao FUJISAWA**
Masao YAMADA**
Munetaka HONDA**

Synopsis

To cope with un-uniform settlement of surface soft ground and large sectional force due to earthquake load, flexible joints are installed among submerged tunnel elements. The flexible joint consists of the pc cable and the rubber gasket and has capability of absorption of large sectional forces. This type of flexible joint is adopted for a few submerged tunnels.

Mechanical properties of the joint structure are not well known during earthquakes and validity of spring constant used in seismic design is not confirmed, though its material properties are almost known. To study these unknown items, both static loading tests and computer-actuator on-line system loading tests are carried out for 1/4 flexible joint model.

Material non-linear properties of the flexible joint and spring constants for both axial force and bending moment are discussed in this report.

Key Words: Flexible joint, Loading test, Submerged tunnel, Seismic design

* Chief of Structural Mechanics Laboratory, Structural Engineering Division

** Member of Structural Mechanics Laboratory, Structural Engineering Division

沈埋トンネル柔継手の力学性状

清 宮 理*
藤 澤 孝 夫**
山 田 昌 郎**
本 多 宗 隆**

要 旨

PC ケーブルとゴムガスケットより構成される沈埋トンネル用の柔継手の地震時の力学特性を把握し、耐震設計に用いるばね定数を調べるために載荷試験を行った。載荷は静的試験および擬似動的試験により行った。継手の圧縮側のばね定数は主にゴムガスケットの特性で、引張側のばね定数はPC ケーブルのみの特性で設定できる。同一の初期圧縮量における曲げのばね定数はほぼ一定である。ただしゴムガスケットの材料非線形性の影響が大きいことが静的試験よりわかった。八戸波による実地震波形を用いた擬似動的載荷試験から、地震時の動的なばね定数は、静的なばね定数とほぼ同じであることがわかった。

キーワード：柔継手、載荷試験、沈埋トンネル、耐震設計

1. まえがき

臨海部の開発にともない交通網の整備が急がれている。沈埋トンネルは、航路や河川を横断して離れた2地点を連結する交通施設である。沈埋トンネルの建設はここ数年来新潟港、大阪港などで進められている。沈埋トンネルは、見かけの比重が周辺地盤とほぼ同じことから軟弱な海底地盤でも大規模な地盤改良や基礎構造を採用しなくてもよい長所がある。

しかし大規模な地震や軟弱地盤の不等沈下により沈埋トンネルに大きな断面力が生じるので、これらに対する対策が不可欠である。この対策として沈埋トンネルを構成する函体間に柔継手を設けることが有力な方法となる。特に地震により函体に大きな断面力の発生が予想される場合、柔継手を採用しないと相当量の鋼材を函体に配置しなければならず施工性や経済性の面から問題が多い。この観点から新潟港と大阪港の沈埋トンネルでも柔継手の採用が予定されている。

柔継手の構造として種々提案されているが、ゴムガス

ケットとPCケーブルによる柔継手が最も効果的な継手構造の一つである。柔継手の有効性については、材料の強度変形特性や止水性から推定できるものの、構造体として地震時にどのような挙動をするか見解が十分でない。このため耐震設計の際に、軸力や曲げに対する構造体としてのばね定数や許容変位量の設定が問題となっている。

2. 研究の背景

2.1 柔継手の構造¹⁾

沈埋トンネル函体間に配置される柔継手として、各種の構造形式が提案されている。柔継手は、主に地震時の函体断面力を低減できる伸縮性と可撓性を有する。柔継手に求められる機能として、以下の項目がある。

①確実な止水性：周囲から水深に比例した静水圧を受けるので、施工時のみならず完成後においても十分な止水性を有する必要がある。また地震時など一時的な変形を受けても止水性を確保できる必要がある。

* 構造部 構造強度研究室長

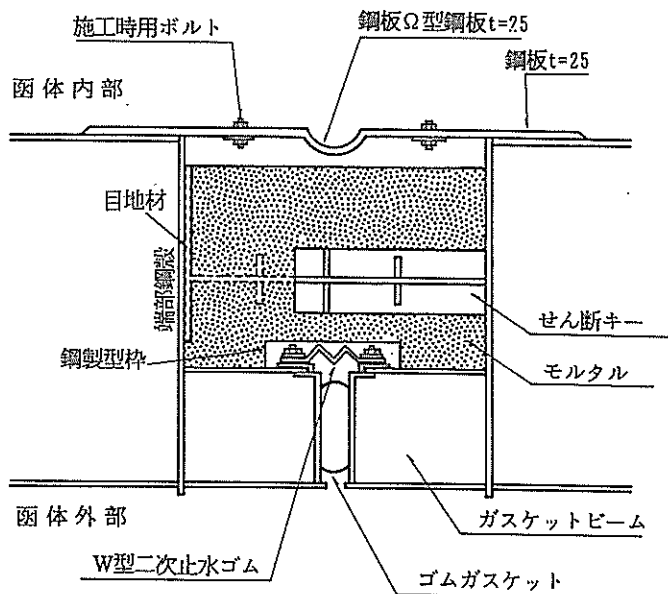
** 構造部 構造強度研究室

- ②段差を生じない：トンネル内の車両の走行性を損なう段差や開きを生じないこと。
- ③容易な施工：作業空間の狭い函体内での連結作業と

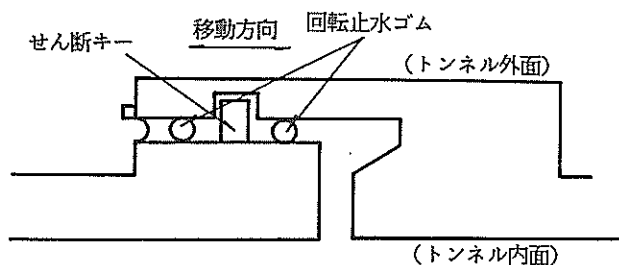
なるので、容易で確実な施工ができる構造を選定する。継手の設置空間は幅1.5m程度である。

- ④施工誤差の吸収：沈設作業中にトンネル軸線に多少

(半固定式)



(スライド式)



(パネ式)

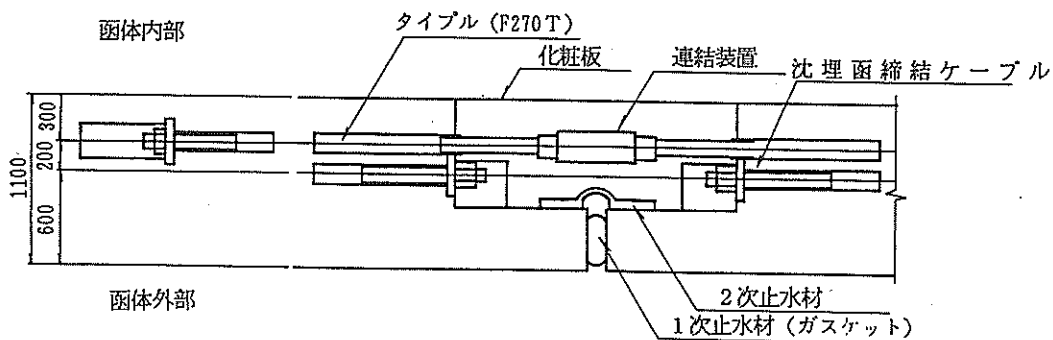


図-1 柔継手の形式

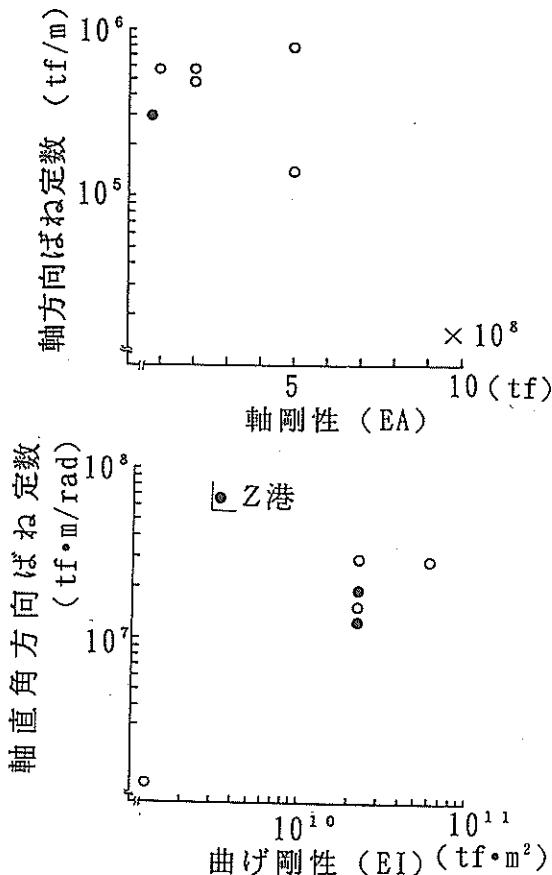


図-2 柔継手のばね性能の実績

のずれが生じて、これを吸収できる構造とする。

50mm程度の施工誤差を吸収できることが望ましい。

- ⑤耐久性：長期間海水あるいは排気ガスにさらされるので、耐海水性、耐化学性、耐生物性に富む材料を用いる。

また地震力だけでなく、地盤の沈下による変形、温度変化による函体の伸縮、上載荷重による変形なども考慮して柔継手の構造形式が選定される。

柔継手の構造としては、半固定式継手、スライド式継手およびばね式継手の3種類に大きく分類される。図-1に各形式の概要を示す。

半固定式継手は、一次止水に用いるゴムガスケットと函体間にモルタルを充填して固定する。函体内部に二次止水用のΩ型の鋼板あるいはゴムを取り付けかつ鉄筋などの鋼材により充填部を補強する。東京港トンネル²⁾などに採用されている。

スライド式継手は、荷重がある一定値以上になると、ゴムガスケットが滑ったり回転する構造となっている。

パートトンネル(米国)等に採用されている。

ばね式継手は、ゴムガスケットとPCケーブル等の鋼材により連結した構造である。両材料がばね部材となる。ただし二次止水材はばねとして取り扱わないのが普通である。最近では東京港第二航路海底トンネル³⁾など比較的多くの沈埋トンネルで採用されている。新潟港トンネルと大阪南港トンネルでもこの形式の柔継手の採用が検討されている。

変形能力としては、半固定式、ばね式、スライド式の順に大きい。また剛結合⁴⁾とは、継手部の強度が函体本体と同じ継手をいう。この結合方法では、函体の鋼材を継手部で溶接したり重ねたりして力の伝達を図っている。図-2に国内での柔継手の性能(剛性)を示す。軸方向のばね定数としては10⁵から10⁶tf/mの範囲が、回転ばね定数としては10⁷から10⁸tf·m/radの範囲が国内の実績として多い。

柔継手は強度と変形能力の両者を満たす必要があることから異種材料で製作されるのが普通である。用いられる材料としてコンクリート、鋼材、PCケーブル、ゴムなどがある。

また柔継手の自由度(変形、回転を許容する成分)には、1自由度から6自由度までである。1自由度では軸方向のみ、2自由度では、軸方向と1曲げ方向の計2方向と順次大きな変形回転成分を持つ。表-1に柔継手のこれらの性能の実績を示す。

表-1 柔継手の実績

沈埋トンネル名称	工期	継手性能		区分	自由度	可換性継手の設置目的
東京港トンネル (首都高速道路公団)	1970 ～ 1976	エレメント間 の継手	大規模地震時には 約2cm(引張側)	半固定式継手	1	1.地震 2.温度変化 3.地盤沈下 4.乾燥収縮
		端部の継手	伸縮 大井側170mm 13号地側200mm	ばね式継手	4	
東京港第二航路海底 トンネル (東京都港湾局)	1973 ～ 1980	エレメント間 の継手	収縮60mm引張のみ	ばね式継手	3	1.地震 2.地盤沈下 3.乾燥収縮
		端部の継手	収縮70mm引張のみ			
川崎港海底トンネル (運輸省 第二港湾建設局)	1974 ～ 1979	軸方向±15cm, 軸直角±10cm 鉛直±5cm, 鉛直±20cm		ばね式継手	5	1.地震 2.地盤沈下
京葉線台場トンネル (日本鉄道建設公団)	1976 ～ 1980	伸縮60mm, せん断±5mm 回転角1°		ばね式継手	5	1.地盤沈下 2.地震
アイトンネル (IJ T.)	1961	ゴム継手	伸縮90mm	ばね式継手	5	1.温度変化
	1968	鋼板継手	伸縮15mm			
パートンネル (BART T.)	1966 ～ 1970	伸縮38mm 鉛直せん断101.6mm		スライド式継手	5	1.地震

2.2 柔継手の耐震効果⁵⁾

柔継手を用いた場合、地震時にどの程度函体の断面力が低減できるか、また柔継手に算定される断面力と変位量がどの程度か調べるため試計算⁶⁾を行った。計算の対象としたトンネルは、Z港海底トンネルである。当トンネルは、表層地盤が軟弱で層厚の厚い(約130m)砂層内に建設される。このため地震時の断面力が大きいことが予想され、柔継手の採用の検討がなされている。トンネルの全長は3260mで、この内航路部に位置する850mが、沈埋工法で建設される。沈埋部は8函のコンクリート製の函体で構成されている。トンネル中央部での地盤条件を図-3に示す。この地盤条件が沈埋トンネル沿いにはほぼ一様に連続している。地盤の一次固有振動周期は、2.3～2.7秒とかなり長い。耐震設計は、図-4に示す多質点系モデルを用い動的解析で行う。この動的解析法は、従来から沈埋トンネルの耐震設計に広く用いられている。

計算モデルでは、工学的基盤面より上の表層地盤を65個の質点に、トンネルを77個の梁部材に置換する。函体の断面積は77.35m²、断面2次モーメントは6862m⁴、コンクリートの弾性係数は2.8x10⁶tf/m²と設定する。入力地震波は、八戸波(十勝沖地震)と秋田波(日本海中部地震)で、計算モデルでの基盤面での最大加速度を112Galに設定する。また基盤面での見かけ上の水平方向の伝播速度を2000m/sに設定する。これら地震波の加速度記録を図-5に示す。ただし図中での加速度記録は基盤面の露頭位置での波形であり、計算では波形の振幅を半

分にして入力する。両加速度波形とも比較的長周期の振動が卓越しており、沈埋トンネルに大きな断面力を与えたと推定される。

柔継手の配置条件を図-6に示す。計算ケース1は函体間に柔継手を設けずすべて剛継手の場合、計算ケース2は立坑と函体との間のみ柔継手を配置した場合、計算ケース3は立坑と函体との間およびすべての函体間に柔継手を配置する場合である。柔継手としては、PCケーブルとゴムガスケットで構成されている形式⁷⁾を設定する。この柔継手の設計段階で検討したばね定数を表-2に示す。今回の動的計算での柔継手のばね定数は、水圧圧接時における柔継手の初期剛性を用い、かつ引張側と圧縮側で同一の値を用いている。したがって計算でのばね定数の設定の仕方は実際の挙動とは異なり、かなり簡略化しているといえる。

図-7に函体に発生する断面力と柔継手の効果について示す。全断面剛結の場合は、トンネル軸沿いの最大軸力が100,000tfを超える。この設計軸力に対して鋼材を函体内に配置することは、鋼材量も多く非常に不経済となるだけでなく、配筋も困難となる。立坑と函体との間のみ柔継手を配置すると、最大軸力は3～4割とかなり低減する。ただし、この場合でも鋼材量は依然多い。全函に柔継手を配置すると、軸力は40,000tf以下となり常識的な鋼材量(鋼材比)となる。この傾向は八戸波、秋田波とも同じである。柔継手を採用することにより、最大軸力のみならず最大曲げモーメントを約1/3、最大せん断力を約1/2に低減することができる。このように

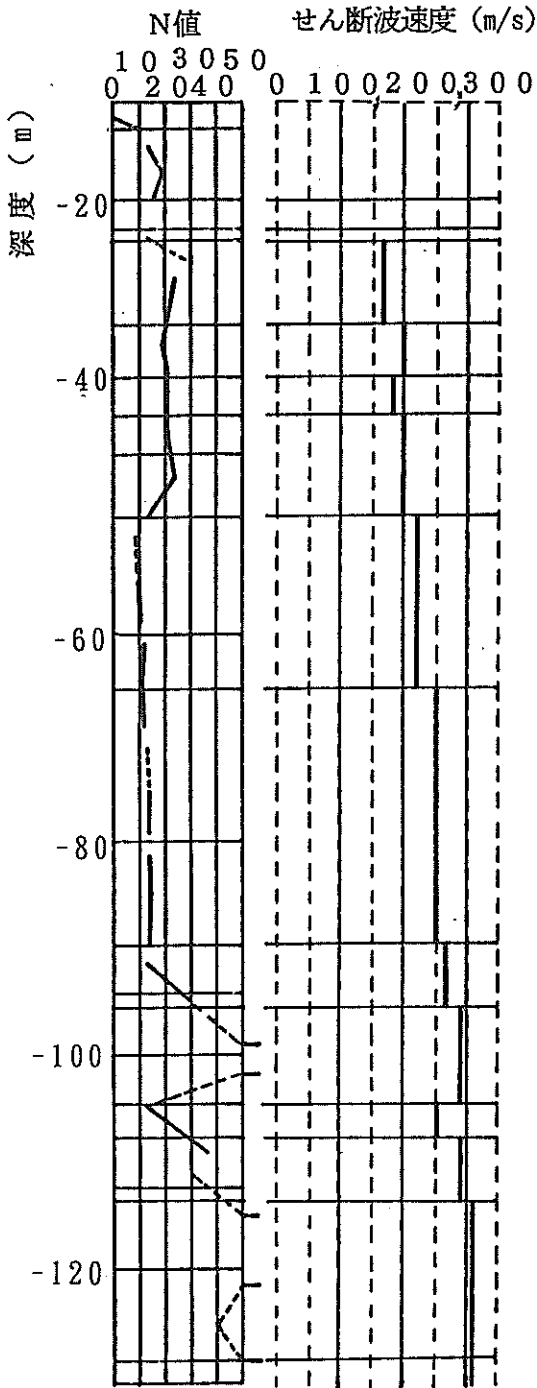
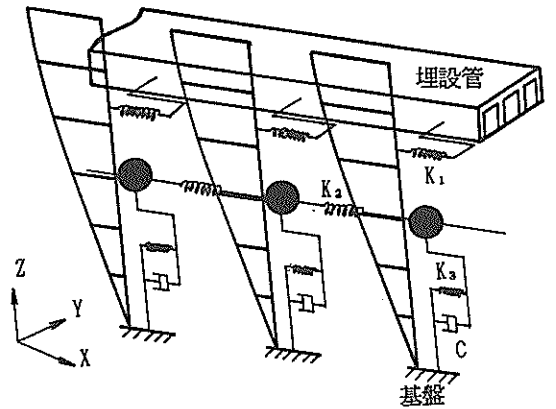


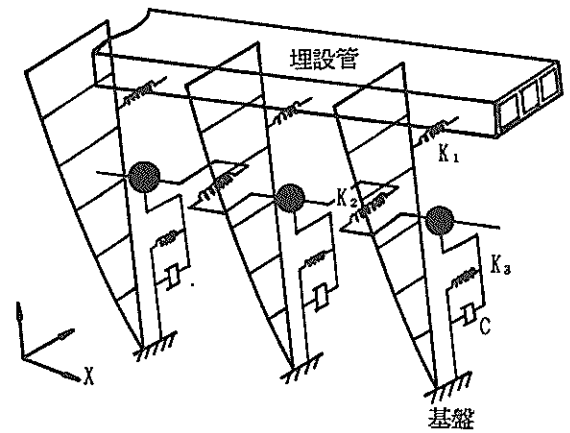
図-3 地盤条件

柔継手を採用することにより、設計断面力を低減することが可能である。

図-8にトンネル軸沿いの軸力と曲げモーメントの分布を示す。この計算ケースでは、最大軸力が図の右側の立坑付近に計算されるが、立坑と函体との間に柔継手を設置することにより、この最大軸力が低減する。しかし中央部ではさほど低減されない。全函に柔継手を採用すると、トンネル軸沿いに全般的に軸力が低減する。一方曲げモーメントは、柔継手を設置した箇所で大きく低減することがわかる。

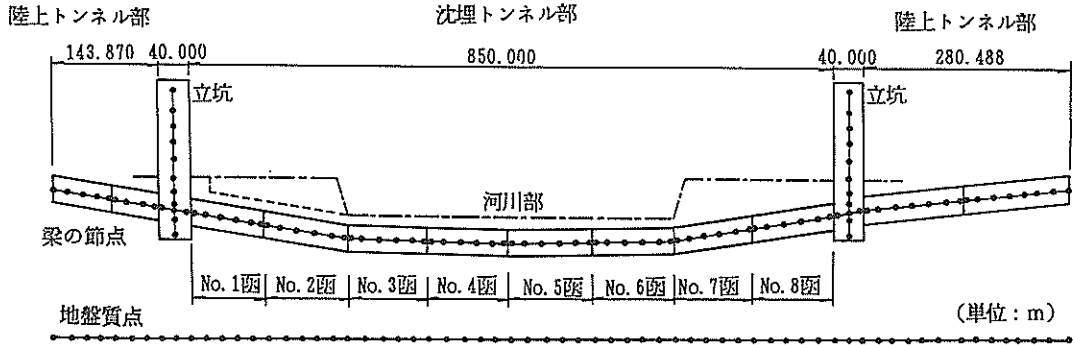


a) トンネル軸方向解析用



b) トンネル軸直角方向解析用

図-4 多質点系モデル



c) Z港海底トンネルのモデル化

図-4 多質点系モデル

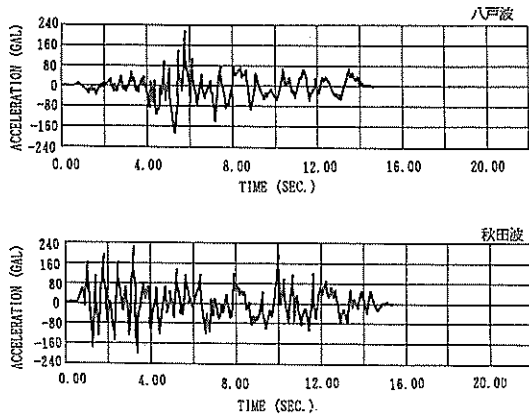


図-5 入力加速度記録

表-2 計算でのばね定数

		1	2	3
エレメント間	圧縮 Kxc	3.67×10^5	4.51×10^5	5.01×10^5
	引張 Kxt	3.67×10^5	4.51×10^5	5.01×10^5
	水平曲げ Kyθ	3.09×10^7	3.43×10^7	3.77×10^7
	鉛直曲げ Kzθ	5.01×10^6	5.58×10^6	6.13×10^6
	水平せん断 Kz	1.35×10^6		
	鉛直せん断 Ky	5.68×10^6		
ねじり Kθx		剛		
エレメント・立坑間	圧縮 Kxc	3.10×10^5	5.36×10^5	6.42×10^5
	引張 Kxt	3.10×10^5	5.36×10^5	6.42×10^5
	水平曲げ Kyθ	1.65×10^7	2.18×10^7	2.43×10^7
	鉛直曲げ Kzθ	2.67×10^6	3.51×10^6	3.88×10^6
	水平せん断 Kz	1.35×10^6		
	鉛直せん断 Ky	5.68×10^6		
ねじり Kθx		剛		

(単位: t/m, t·m/rad)

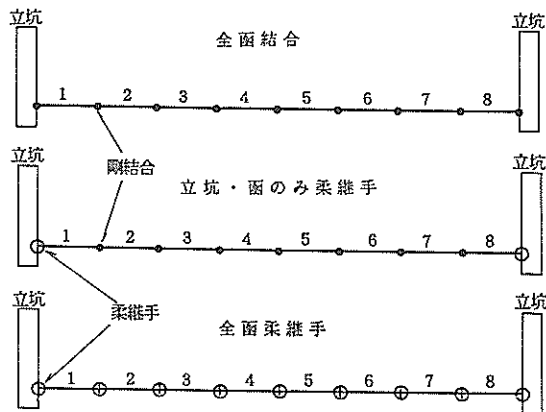
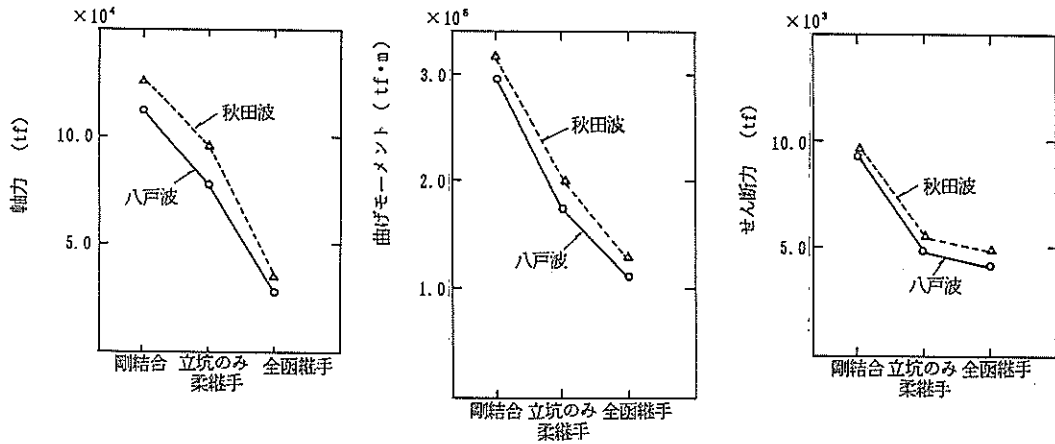


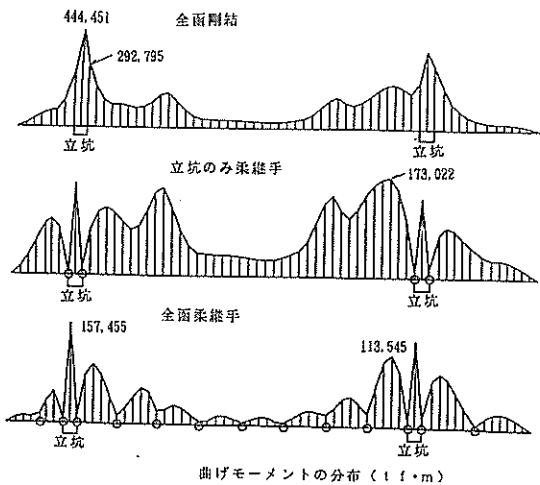
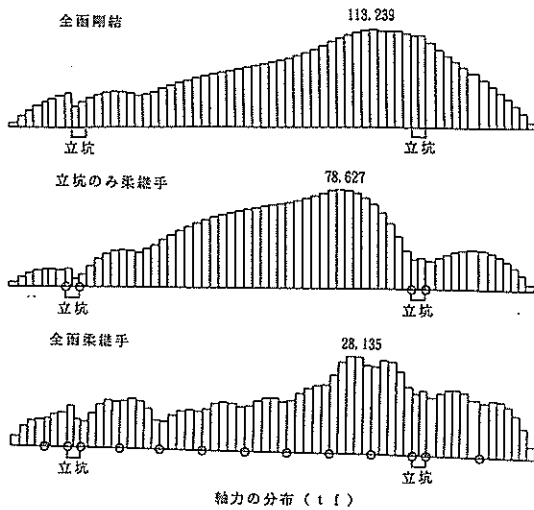
図-6 柔継手の配置状況

図-9に軸方向と水平軸回りの回転に関するばね定数と最大断面力との関係を示す。ここでのばね定数は、今回のトンネルで採用可能な柔継手の能力の範囲内である。ばね定数の値が大きくなると断面力は増加する傾向がある。ただしこの設定範囲では、顕著な断面力の差はないといえる。

図-10に柔継手での軸方向変位量および水平軸回りの回転角とばね定数との関係を示す。軸方向変位量は60~70mmである。この変位量に対してゴムガスケットが静水圧下で止水性を確保する必要がある。これ以上の変形量

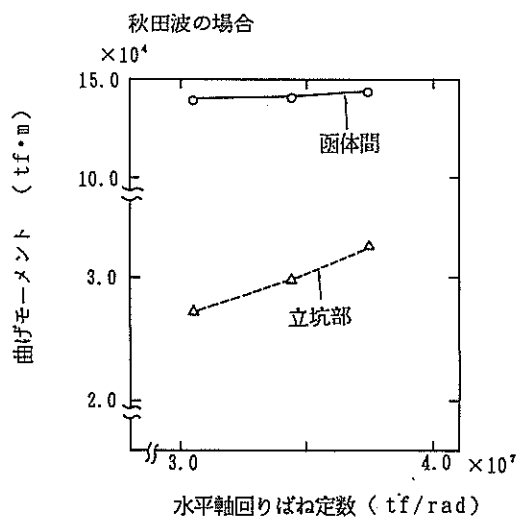
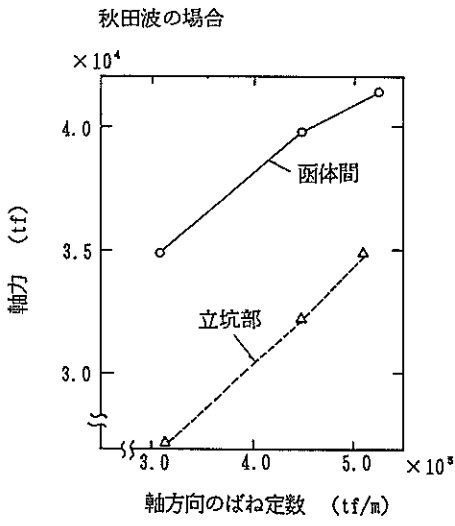


図一七 柔継手の断面力低減効果



図一八 軸力と曲げモーメントの分布

ではゴムガスケットと函体端部とが離れてしまう。ただし地震時の一時的な離れに対しては二次止水材に対応することになるので、大量の水がトンネル内に入ることはないと考えられる。しかしながら、設計では十分な安全性をみてゴムガスケットでの一次止水を設計外力に対して確保している。柔継手の引張側の許容変位は、このゴムガスケットの変位量にもとづき設定される。



柔継手ばね定数と断面力との関係 (全函柔継手)

図-9 ばね定数と断面力の関係

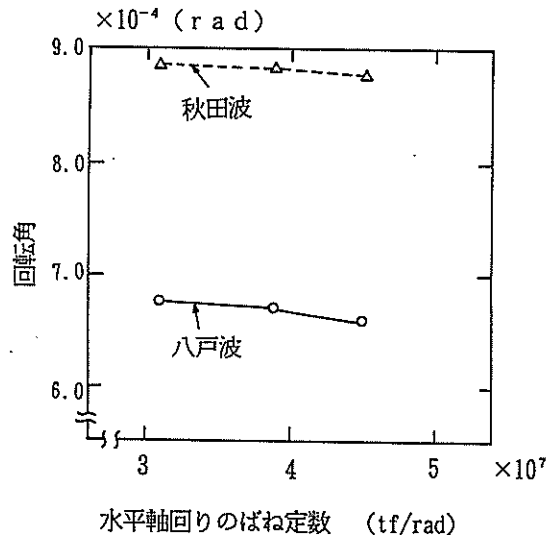
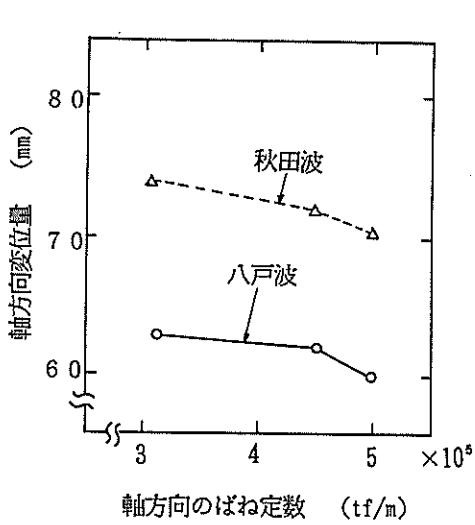


図-10 ばね定数と変位および回転角の関係

3. 柔継手の設計

ガスケットの形状

3.1 柔継手の材料特性

柔継手の構成材料としてゴムガスケットとPCケーブルとをここでは選定する。以下にこれらの材料の特性とばね定数の設定について述べる。

(1) ゴムガスケット

ゴムガスケットは、函体端部の横断面内の外周に設置される。図-11に示すように函体同志を水圧圧接するときの止水材としての機能と接合後の柔継手の圧縮ばねとしての機能が求められる。

ゴムガスケットの形状と材質として、幾種類か提案されている。図-12に各地の沈埋トンネルで今までに使用されたゴムガスケットの形状を示す。ゴムガスケットの上端には舌状の突起がでているが、これは施工時の止水性を容易に確保するためのものである。この中でジーナ型のゴムガスケットが広く用いられている。この形式はヨーロッパで開発されたものである。ジーナ型の実物の形状寸法を図-13に示す。ゴムガスケットの材質は天然ゴムである。

図-14にこのゴムガスケットの圧縮載荷試験により得られる荷重と変位の関係を示す。荷重の増加とともに変位の増加量は減少し、かなりの材料非線形性を示す。あ

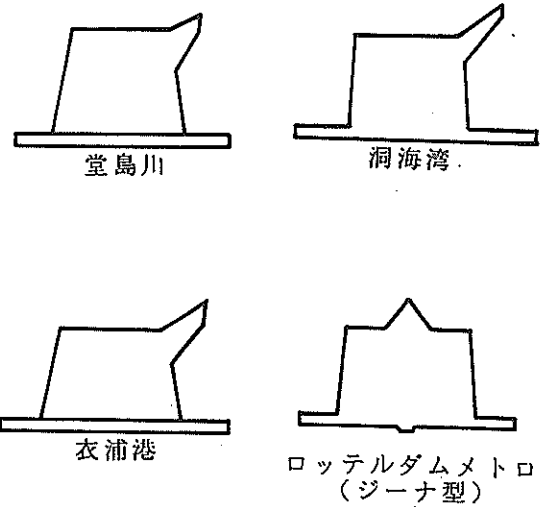


図-12 各種のゴムガスケット

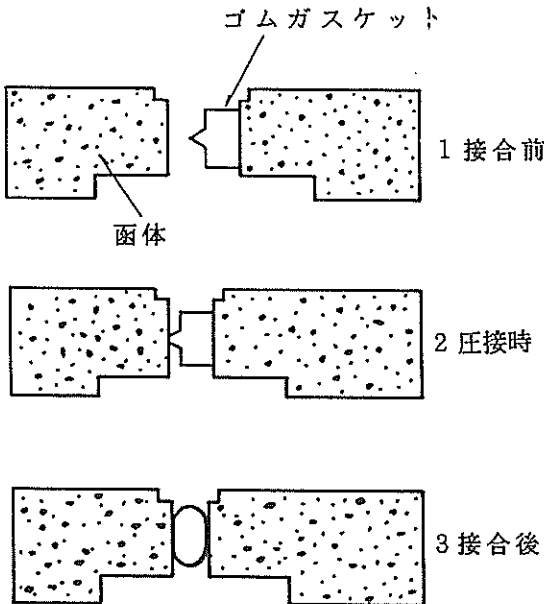
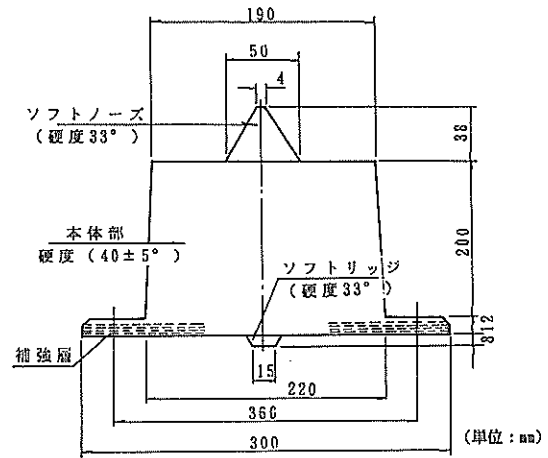


図-11 水圧圧接の状況

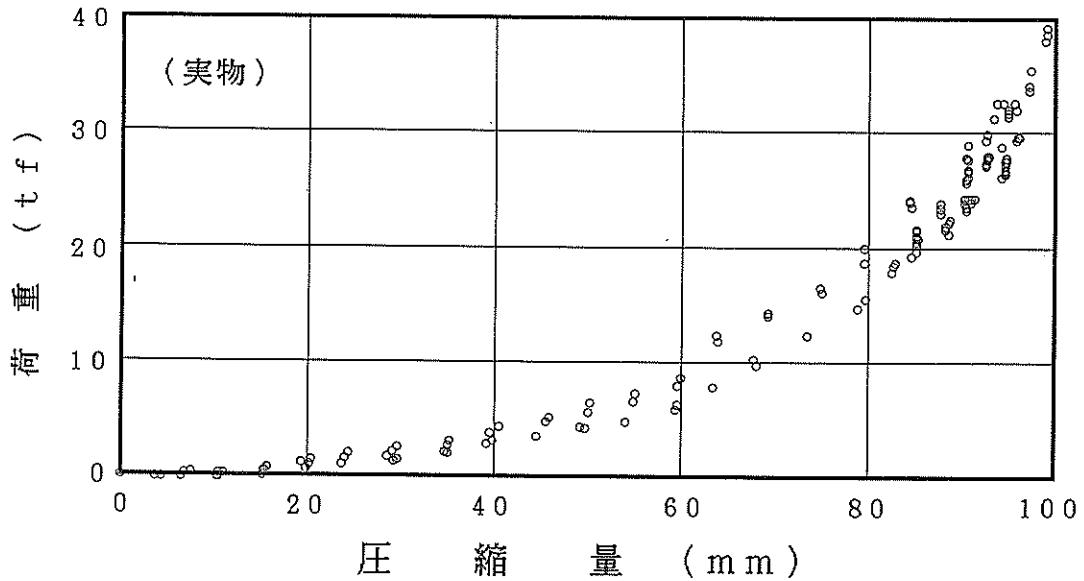


実物ガスケットの概略寸法

図-13 ゴムガスケットの形状

る荷重でのばね定数はそこでの荷重と変位の比すなわち勾配として求められる。図に見られるようにこのゴムガスケットのばね定数は、荷重段階毎に異なる。圧縮量が100mmを超えると荷重が増加しても変位はほとんど増加せず、ばね定数は非常に大きな値となる。

また図-15に変位振幅が26mm~34mmで10回繰り返して載荷したときの荷重と変位の関係を示す。載荷時と除荷



荷重とゴムガスケットの圧縮量との関係

図-14 実物のゴムガスケットの荷重変位関係

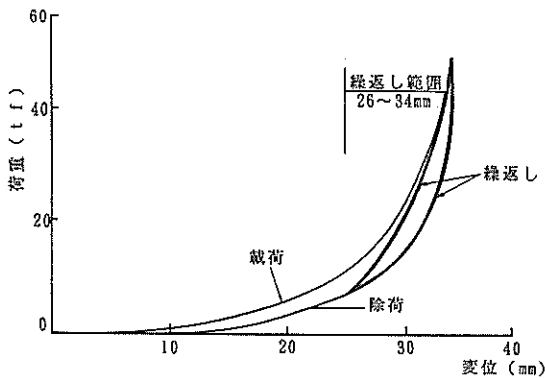


図-15 繰り返し載荷での荷重変位関係

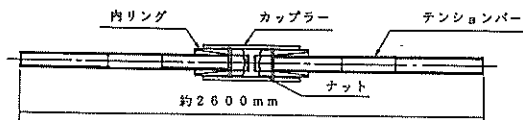


図-16 カプラーの構造 (一例)

時でループを描き履歴減衰が認められる。しかしこの程度の載荷繰返し数ではゴムの力学的性状(ループの形状)はほとんど変わらない。

(2) PC ケーブル

函体同志の引張に対しては PC ケーブル (もしくは PC 鋼棒) で抵抗する。PC ケーブルは、何本かの PC 鋼より線を束ねたものである。PC ケーブルの中央には、図-16に示すようなカプラーと呼ばれる連結装置が取り付けられる。この装置は、2本の PC ケーブルを連結するほか、円錐状の定着コーンにより偏心力に対しても軸引張力を円滑に伝達する機能を保持しており、約10度以内の傾きに対して十分な機能を発揮できる。カプラー本体の引張強度は、PC ケーブルより少し大きめに設計する。

図-17に実物の PC ケーブル (FT 270 : 公称の破断荷重270tf) の引張載荷試験での荷重と変位 (伸び率) の関係を示す。降伏荷重は257tf、破断荷重は273tf、破断時の伸びは2.1%であった。ここで降伏荷重とは除荷した際の永久ひずみが0.2%になるときの荷重である。

PC ケーブルの両端は、函体のコンクリート内に定着される。また、わずかな初期引張力を PC ケーブルに導入してたるみ無くし、函体の使用時での温度変化などによる柔継手の離れを防止する。また継手部には、雨水、清掃水などが停滞しやすいので、錆の発生への対策が必要である。

3.2 ばね定数の算定⁸⁾

(1) 構成要素

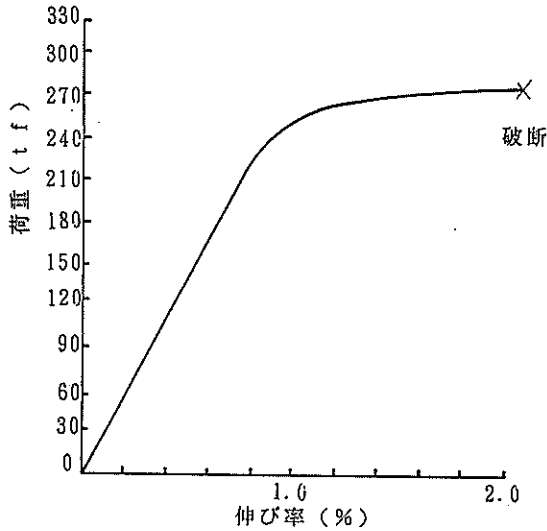


図-17 実物の PC ケーブルの荷重変位関係

継手部の座標軸を図-18のように設定する。継手部には、軸力、曲げモーメントおよびせん断力が作用すると仮定すると、それぞれの抵抗要素は、表-3に示すようにゴムガスケット、PC ケーブルおよびせん断キーである。各座標に関して複数の抵抗要素で外力に抵抗する。ただし函体に作用するねじりモーメントは、通常小さいのでここでは無視する。またせん断キーとは、函体の隔壁や底版に設けられるコンクリート版の凹凸構造によりせん断力に抵抗するものである。

(2) 軸方向のばね定数

軸方向の抵抗要素は、引張側で PC ケーブルとゴムガスケット、圧縮側でゴムガスケットである。まず圧縮側のばね定数を説明する。図-19にゴムガスケットの圧縮の時の荷重と変位との関係を示す。水圧圧接時のゴムガスケットの圧縮量を δ_0 、反力を P_0 とする。この反力は沈設時に函体水平方向に働く静水圧の合計と等価である。この状態が柔継手の初期状態である。また地震時の最大の圧縮量を δ_{max} 、反力を P_{max} とする。この圧縮領域間で材料非線形性が顕著でないと仮定すると、圧縮時の平均的なばね定数 (K_c) は次式で求められるものとする。

$$K_c = \frac{P_{max} - P_0}{\delta_{max} - \delta_0} \quad (1)$$

もし材料非線形性が顕著であるときにはゴムガスケットの荷重変位関係を次式のように指数関数で近似する。

$$P = \alpha \delta^\beta \quad (2)$$

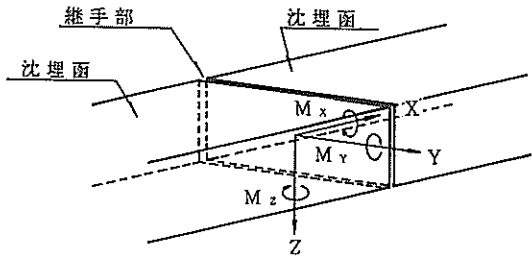


図-18 継手部の座標軸

表-3 ばねの抵抗要素

力の方向		抵抗要素
X方向	圧縮側	ガスケット
	引張側	ガスケット + PCケーブル
X軸の回転 (ねじれ)		ガスケット + せん断キー
Y方向	水平せん断	ガスケット (+せん断キー)
	Y軸の回転	ガスケット + PCケーブル
Z方向	垂直せん断	ガスケット (+せん断キー)
	Z軸の回転	ガスケット + PCケーブル

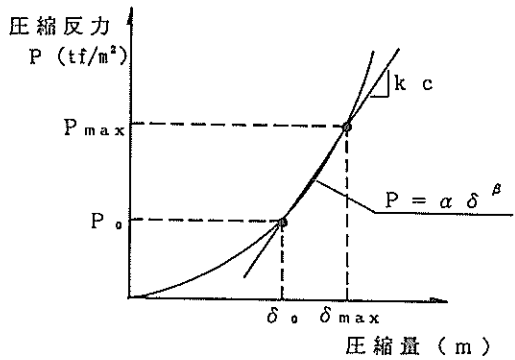


図-19 ゴムガスケットの荷重変位関係

このときのばね定数は、前述した通り接線勾配で与えられる。

次に継手に地震などの外力により軸引張力 (N) が作用するとき PC ケーブルの必要本数 (n) は、PC ケーブル 1 本当たりの降伏荷重を F_y とすると $n = N/F_y$ で求められる。PC ケーブルは、ほぼ等間隔で函体周囲に配置される。PC ケーブルの長さ (l) は、軸引張力が作用したときのゴムガスケットの変形量が許容変形量内に納まるように設定する。この許容変形量 (δ_0) は、函体同志を水圧圧接したときのゴムガスケットの圧縮量からゴムガスケット上部に取り付けられているノーズの高さを

差引いた量とする。ゴムガスケットの圧縮量は、水圧圧接時の函体断面への水平方向の作用水圧をゴムガスケットの全長（周長 L ）で除して得られる 1 m 当たりの反力を基に求められる。したがって必要な PC ケーブルの長さ (l) は、次式で得られる。

$$l = E_p \cdot n \cdot A_p \cdot \delta_a / N \quad (3)$$

ここで E_p : PC ケーブルのヤング率
 n : PC ケーブルの本数
 N : 継手に作用する軸引張力
 A_p : PC ケーブルの断面積
 δ_a : 許容変形量

材料の弾性域での軸引張方向のばね定数 (K_p) は、次式で得られる。

$$K_p = E_p \cdot n \cdot A_p / l \quad (4)$$

次に静水圧により圧縮したゴムガスケットの反力を考慮した場合の軸引張方向のばね定数を求める。

PC ケーブルが引っ張られることにより、ゴムガスケットの反力が減少する。この状況を図-20に示す。PC ケーブルの引張反力 (P_s) とゴムガスケットの反力 ($P_R - P_{R0}$) は、それぞれ次式で得られる。

$$P_s = K_p \delta_p \quad (5)$$

$$P_R - P_{R0} = \alpha (\delta_o - \delta_p)^\beta - \alpha \delta_o^\beta \quad (6)$$

力の釣合から外力 (P_e) は、PC ケーブルの力 (P_s) からゴムガスケットの力 ($P_R - P_{R0}$) を差し引いて次式で求められる。

$$P_e = P_s - (P_R - P_{R0}) \quad (7)$$

式(5)および式(6)を式(7)に代入し δ_p で微分すると変位が δ_p のときのばね定数 (K_l) が得られる。

$$K_l = K_p + \alpha \beta (\delta_o - \delta_p)^{\beta-1} \quad (8)$$

(3) 曲げのばね定数

曲げに関するばね定数には、水平軸 (Y 軸) 回りと鉛直軸 (Z 軸) 回りとがある。図-21に鉛直軸回りの曲げモーメントが作用するときの柔継手位置での回転状況を示す。函体軸方向に P_o の圧縮力が作用しゴムガスケットが δ_o だけ圧縮されている状況を初期状態とする。ただしこの軸力はモーメントが作用しているときに一定と仮定する。このときに柔継手部に Z 軸回りの曲げモーメント (M_z) が作用するとする。

まず中立軸の位置 (X_o) を求める。曲げモーメントが作用するときの軸方向の力の釣合は次式で表される。

$$2P_o(H+B) = 2 \int_{-B/2}^{B/2} \alpha |\delta_o - \theta_z(y+B/2-X_o)|^\beta dy + (P_1+P_2)H - P_s H - P_s(B-X_o) \quad (9)$$

ここで H : 函体の高さ

B : 函体の幅

θ_z : z 軸まわりの回転角

P_1, P_2 : 圧縮縁、引張縁における単位長さあたりのゴムガスケットの反力

次に中立軸回りの抵抗モーメント (M_z) を計算する。

$$M_z = -2 \int_{-B/2}^{B/2} \alpha \{\delta_o - \theta_z(y+B/2-X_o)\}^\beta y dy + (P_2 - P_1)H \cdot B/2 + P_s H \cdot (B/2) + 2 \int_{-B/2+X_o}^{B/2} \{P_s/(B-X_o)\} (y+B/2-X_o) y dy \quad (10)$$

最大回転能力 θ_{zmax} を設定すれば、中立軸位置と最大抵抗曲げモーメント (M_{zmax}) が順次得られる。この時の平均的な回転バネ ($K_{\theta z}$) は以下の式で得られる。

$$K_{\theta z} = M_{zmax} / \theta_{zmax} \quad (11)$$

同様に y 軸回りのばね定数も得られる。

$$K_{\theta y} = M_{ymax} / \theta_{ymax} \quad (12)$$

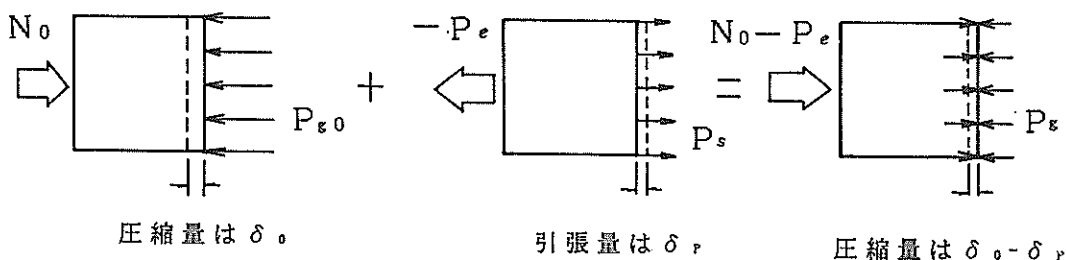


図-20 PC ケーブルとゴムガスケットの力の釣合

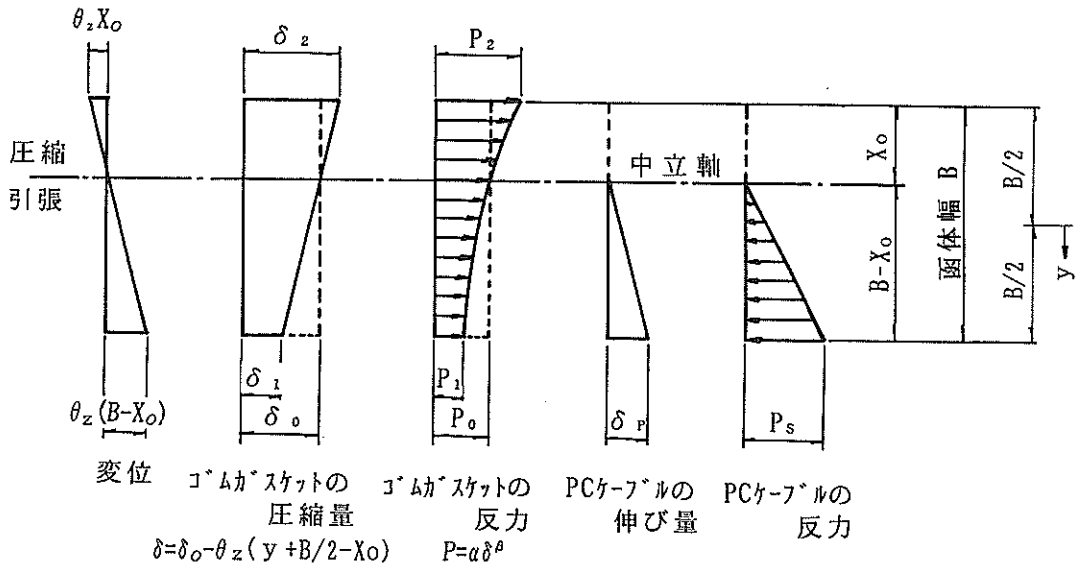


図-21 柔継手の回転の状況

4. 載荷試験

4.1 試験体の構造

Z港海底トンネルでの実物の諸元と今回の実験での諸元を表-4に示す。同一材料を用いた実物と模型との静的載荷試験での基本的な相似則は次式である。

$$\frac{P_m}{P_p} = \frac{l_m^2}{l_p^2} \quad (13)$$

ここで P : 外力

l : 寸法

m, p : 模型と実物

函体の寸法に関しては、今回約1/15の縮尺である。ただしゴムガasketの模型製作上の制約およびPCケーブルの規格の制約から必ずしも厳密に相似則は満足されていない。ゴムガasketに関しては、材料の性質は同じで寸法的には1/4となっている。

図-22に試験体での柔継手構造を示す。試験体断面の幅は2010mm、高さは1010mmである。試験体の内部は中空で、壁厚は305mmである。試験体の函体部はコンクリートと鋼板とで製作する。ゴムガasketを試験体断面の周辺全周に配置する。PCケーブルは、ゴムガasketの内側に20cm間隔で合計22箇所に配置する。PCケーブルの定着は片側200mmで、端部にセンターホールジャッキを取り付ける。このセンターホールジャッキは各PCケーブルの軸力を測定するものである。

函体本体の断面を図-23に示す。周囲は厚さ6mmの鋼板で被覆し、内側に設計基準強度240kgf/cm²の普通コン

表-4 実物と模型の諸元

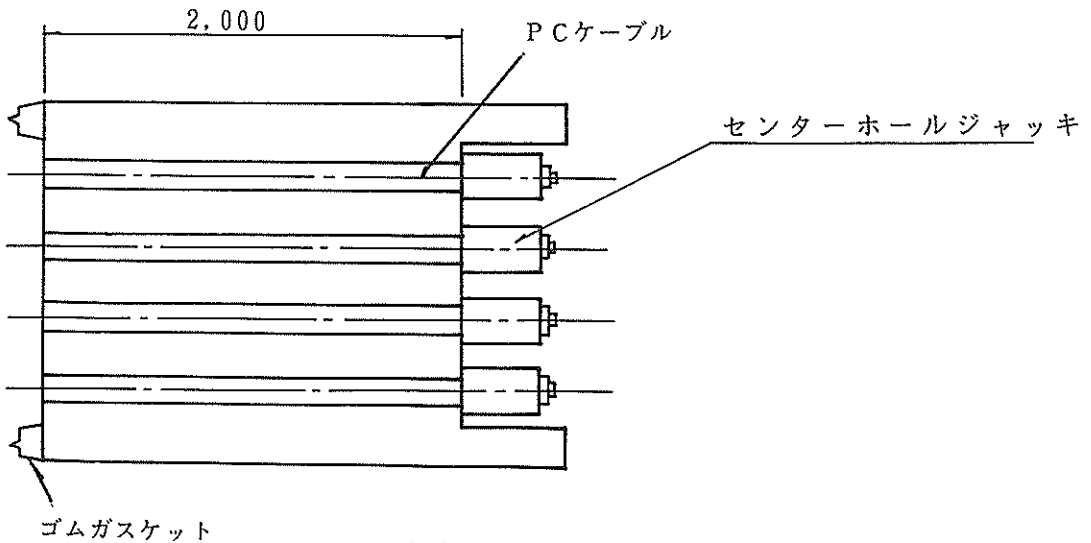
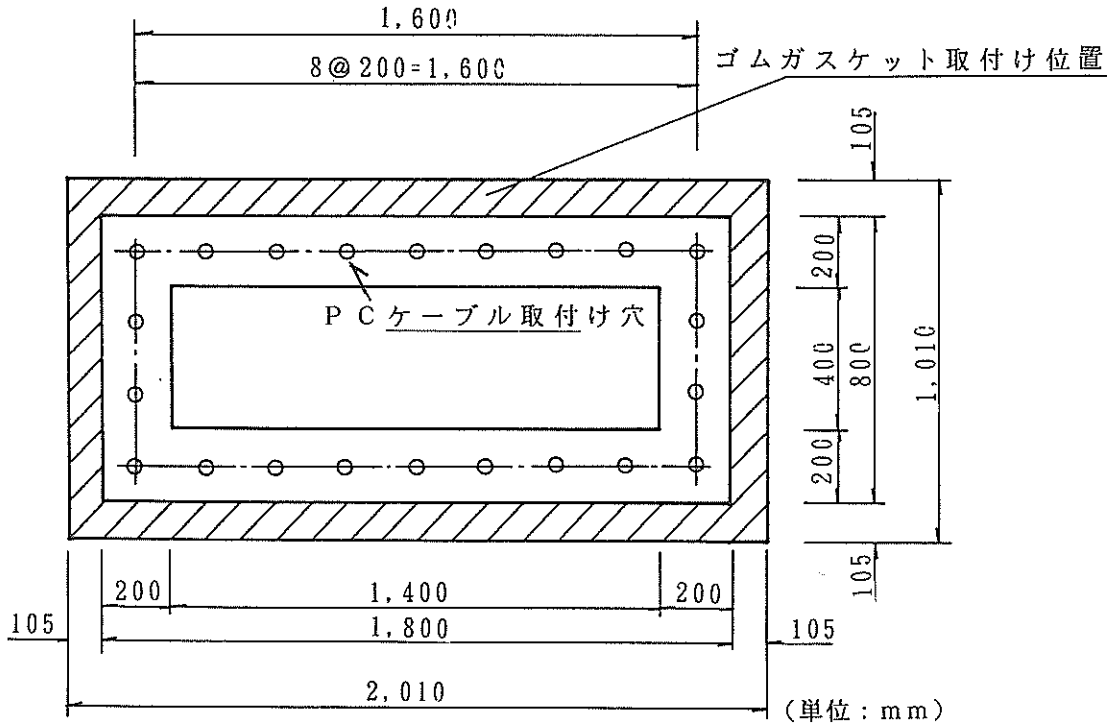
	実物	模型
設計断面力		
軸力 (tf)	26265	350
曲げモーメント (tf・m)	226900	140
Z軸回り		
ばね定数		
軸方向ばね (tf/m)	310000	9900
圧縮		25000
引張		
回転ばね		
Z軸回り	2.96×10^7	6400
Y軸回り	4.87×10^6	2400
(tf・m/rad)		
継手の許容変位量(mm)		
圧縮 (mm)	110	13
引張	80	10
PCケーブル	TP275 100本 全長 15m	F30T 22本 全長 4m
ゴムガasket (ジーナ型)	Y190-200-40	Y47.5-90-40
寸法		
幅	28.6m	2m
高さ	8.76m	1m

クリートを充填する。試験体の全長は5040mmで、両端部は鋼材で補強する。この鋼材には、油圧ジャッキおよび反力ブロックと試験体を固定するためのPC鋼棒用の穴が開けられている。

4.2 使用材料

(1) ギュムガasket

試験体に使用するゴムガasketの諸元を図-24に示す。使用材料は実物と同じ天然ゴムである。本体の高さ



実験供試体概略寸法

図-22 試験体の柔継手の状況

は50mm, 上辺の幅は47.5mm, 下辺の幅は55mmである。上辺には、三角状の小さな突起が、下辺には固定用の薄版が取り付けられている。突起の硬さは、本体より若干柔らかくしてある。図-25にこのゴムガスケットの圧縮載荷試験の結果を示す。ゴムガスケットの材料試験から得られ

た荷重 $P(tf)$ と圧縮量 $\delta(cm)$ の関係を式(2)の指数関数で表示すると次式となる。

$$P = 3.22 \delta^{3.17}(tf) \quad (14)$$

また上式から試験体での軸方向の圧縮ばね定数を求める

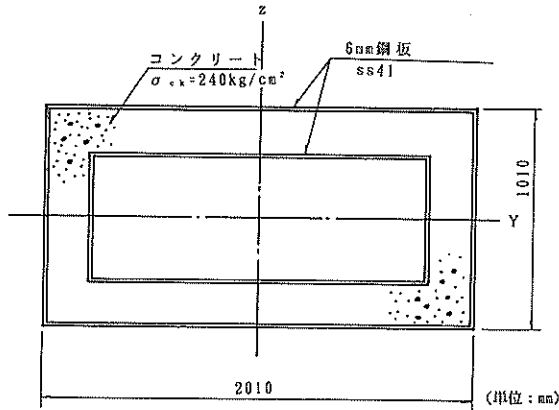


図-23 試験体本体の断面

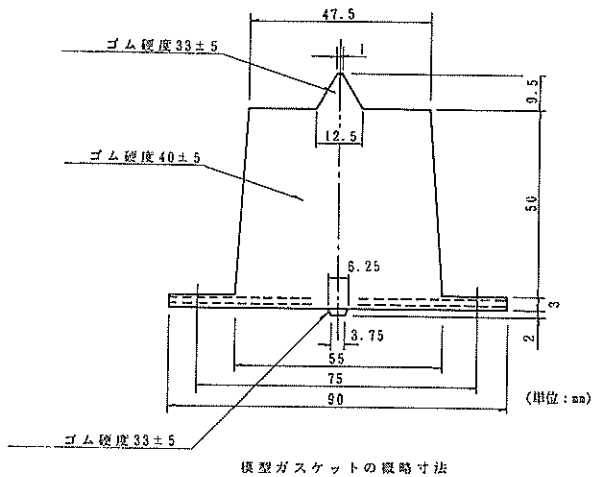


図-24 模型ゴムガasketの諸元

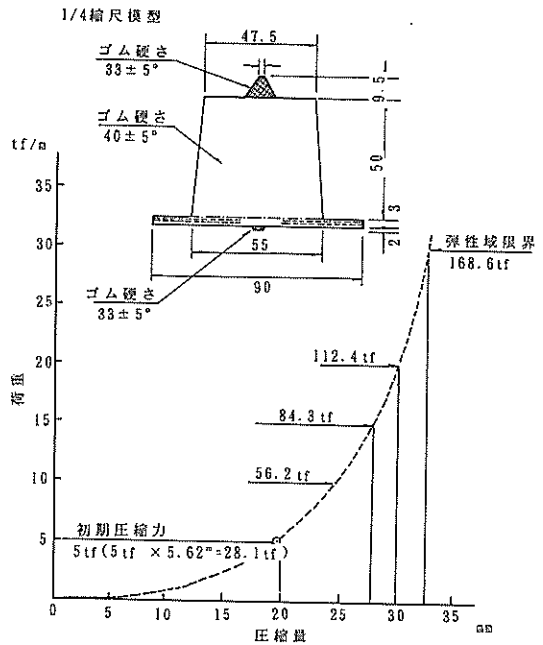
と次式となる。

$$K_r = 1020 \delta^{2.17} (\text{tf/m}) \quad (15)$$

上式から得られる各圧縮量でのばね定数の値を表-5に示す。

(2) PC ケーブル

PC ケーブルは、直径17.8mmで降伏強度15437kgf/cm²である。この機械的性質を表-6に示す。試験体には長さ4mの22本のPCケーブルを配置する。中央にはカプラーが取り付けられている。このPCケーブルの引張試験を図-26に示す方法で実施する。カプラーなしの場合の試験結果を図-27に示す。降伏荷重は29.5tf、破断荷重は37.1tf、破断時の伸びは3.2%である。カプラーありの場合については、カプラーの破壊はみられず終局は



ゴムガasketの荷重-圧縮量の関係

図-25 模型ゴムガasketの圧縮試験結果

表-5 ゴムガasketのばね定数

圧縮量	cm	2.5	2.75	3.0	3.5
荷重	tf	56.2	84.3	112.4	168.6
ばね定数	tf/m	7450	9160	11070	15460

PC ケーブルの破断である。カプラーの有無によらず所定の保証引張強度が得られる。PC ケーブルの弾性係数を $2.06 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ とすると、PC ケーブルの引張のばね定数は式(4)より21640tf/mとなる。またゴムガasketの反力を考慮して、ゴムガasketが試験体端部より離れるまでのばね定数を計算すると24500tf/mとなり、PC ケーブル本体よりもやや大きな値となる。

4.3 静的試験の方法

載荷の状況を写真-1に示す。静的載荷試験は、軸方向およびY軸回りとZ軸回りについて行う。載荷試験は、港湾技術研究所内の大型構造実験施設⁹⁾で行う。試験体を反力床に水平に設置する。試験体の端部を反力壁と反力ブロックにPC鋼棒で固定する。試験体が上下方向にずれないように固定台を試験体下端に配置する。

表-6 PCケーブルの機械的性質

項目	構成	断面積	重 量		引張荷重 (破断荷重)	降伏点 荷 重	許容引張荷重	
			PC鋼より線	PC鋼より線 + 高レフレ			常 時	地震時
単 位	—	mm ²	kgf/m	kgf/m	tf	tf	tf	tf
呼 名	1×φ17.8	191.1	1.53	1.85	37.1	29.5	8.8	13.4
F30T								
		弾性係数 (kg/cm ²)	降伏強度 (kg/cm ²)	破断強度 (kg/cm ²)				
模型ケーブルカプラー無し		1983000	15437	19403				

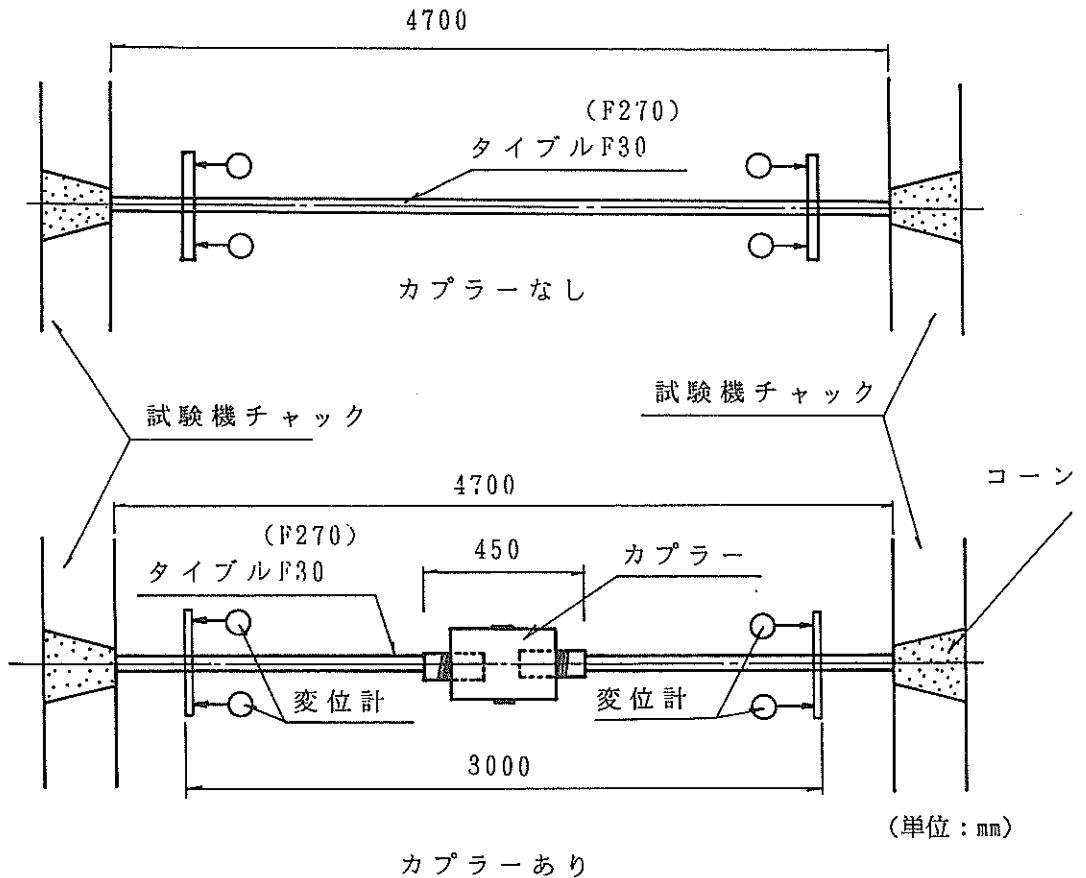


図-26 PCケーブルの引張試験方法

固定台には多数の硬球（ボールベアリング）を置いてあり試験体が水平方向に自由に移動できる。載荷は、4台

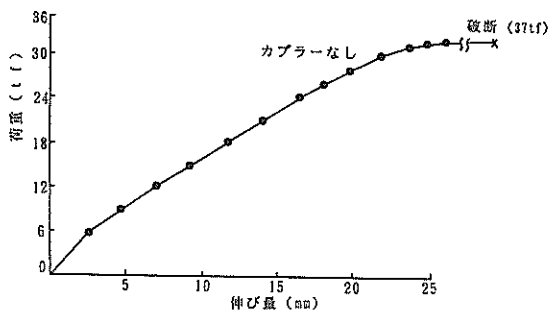


図-27 模型 PC ケーブルの引張試験結果

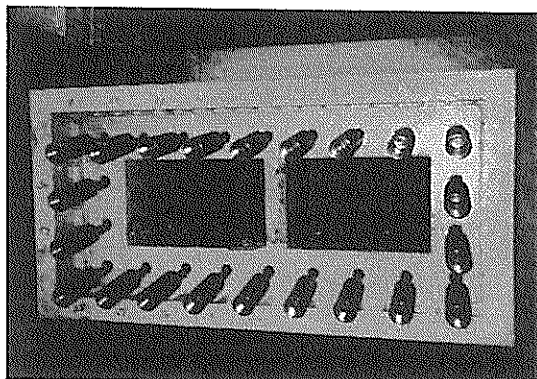


写真-2 PC ケーブルの配置状況

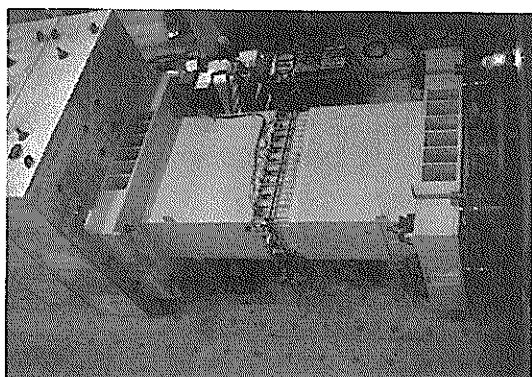


写真-1 荷重試験状況

の油圧ジャッキを反力壁と試験体間に設置し油圧ポンプを用い人力で操作して行う。油圧ジャッキの1台当たりの容量は200tfである。初期状態としてゴムガスケットに20mmの圧縮量をPCケーブルを締め付けて与える。PCケーブルの試験体での配置状況を写真-2に示す。ただし今回の荷重試験では材料や柔継手の構造体としての破壊状況を把握することはせず、設計荷重内での柔継手の挙動とばね定数の把握を目的としている。

軸方向荷重では、これら4台の油圧ジャッキを同時に操作して軸引張力と圧縮力を柔継手に与える。荷重は、変位制御で行う。荷重パターンを図-28に示す。ゴムガスケットの変位量が弾性限界の圧縮変位量(約30mm)(II)に達するまで2mmピッチで荷重し、その後ゴムガスケットの引張限界(ゴムガスケット上部の突起が延び始めるまでの約10mm)(III)まで除荷する。この操作を何回か繰り返す。

曲げ荷重試験は、2台の油圧ジャッキで試験体を押し、残りの2台で引っ張る方式で行う。荷重の手順は、軸方向荷重と同じく変位制御であるが、荷重中のゴムガスケットの平均圧縮量(軸力)を一定に保持する。この軸

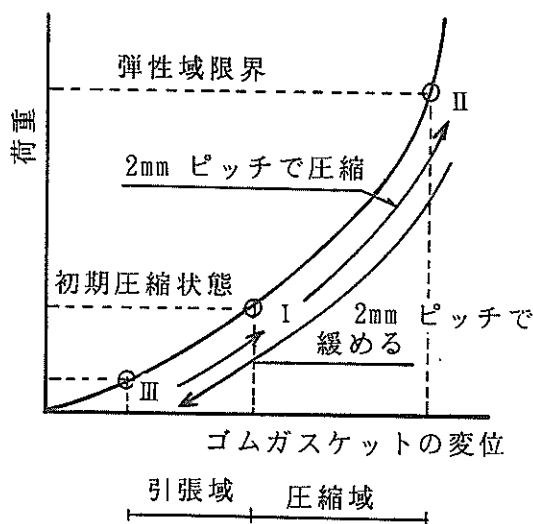


図-28 荷重パターン

力は、試験体内のPCケーブルを締め付けることにより保持する。

4.4 擬似動的荷重試験の方法^{10) 11)}

構造物の地震時の挙動を詳細に調べたいときには、振動台で模型を加振する試験がある。この方法では、大型の試験体での破壊時までの挙動を再現するのは振動台の容量から困難である上、破壊時のひびわれ状況などの情報を確実に得ることができない。一方静的荷重試験のように荷重時間を遅くした場合には、破壊までの挙動を容易に把握できるが、慣性力や減衰力などの動的な影響を考慮できない。そこで大型の試験体に対して、地震時に受ける外力を時間軸を伸ばした形で、かつ地震時の振動方程式を満足するように荷重する方法に擬似動的荷重試験がある。

この載荷システムは図-29に示すように、電気油圧サーボ制御方式の加振機による加力実験装置と計算機による地震応答計算とをオンラインで結合する載荷システムである。図中では2階建ての建物での耐震性を調べる擬似動的載荷試験の状況を示しており、ここでは2個の加振機を用いて2質点系の振動方程式を解いている。試験体の振動方程式を次式に示す。

$$[M] \{\ddot{X}\} + [C] \{\dot{X}\} + [K] \{X\} = - [M] \{e\} \quad (16)$$

ここで $[M]$: 質量マトリックス
 $[C]$: 減衰マトリックス
 $[K]$: 剛性マトリックス
 $\{\ddot{X}\} \{\dot{X}\} \{X\}$: 順に加速度, 速度, 変位ベクトル
 $\{e\}$: 入力加速度ベクトル

この方法によれば、破壊時の挙動を十分観察できるだけでなく、材料の非線形性を振動方程式内の剛性を変えることにより容易に再現追跡できる。この載荷方法は建物や原子炉格納容器などの構造物の耐震性の検討に広く用いられている。

入力地震波として今回は十勝沖地震の際に八戸港で取

得された加速度記録を用いる。次に前述した多質点系モデルによる動的応答計算で柔継手部位位置での加速度を計算する。この加速度波形を加振機への入力地震波とする。数値積分は線形加速度法あるいは中央差分法を用いる。一般的に試験体の剛性が試験中に大きく変わる場合には中央差分法で、弾性的な挙動の時は線形加速度法で解く場合が多い。今回中央差分法を用いる。この方法では、 $n, n-1$ ステップでの変位と復元力(実測)がわかれば、次の $n+1$ ステップでの変位が計算できる。 n ステップでの復元力 $[K_n] \{X_n\}$ は荷重計から得られる。変位が求められれば、速度と加速度が時間間隔(Δt)毎に順次次式で得られる。

$$\dot{X}_n = (X_{n+1} - X_{n-1}) / 2 \Delta t \quad (17)$$

$$\ddot{X}_n = (X_{n+1} - 2X_n + X_{n-1}) / \Delta t^2 \quad (18)$$

今回の試験では、質量として試験体の片半分の質量、減衰として0.1、初期のばね定数としてゴムガスケットの初期圧縮量でのばね定数を用いる。なお質量と減衰については今回十分に吟味せず仮に設定した。これらの値の設定については今後の課題である。

質点の個数は1個であり1質点系モデルをここでは解

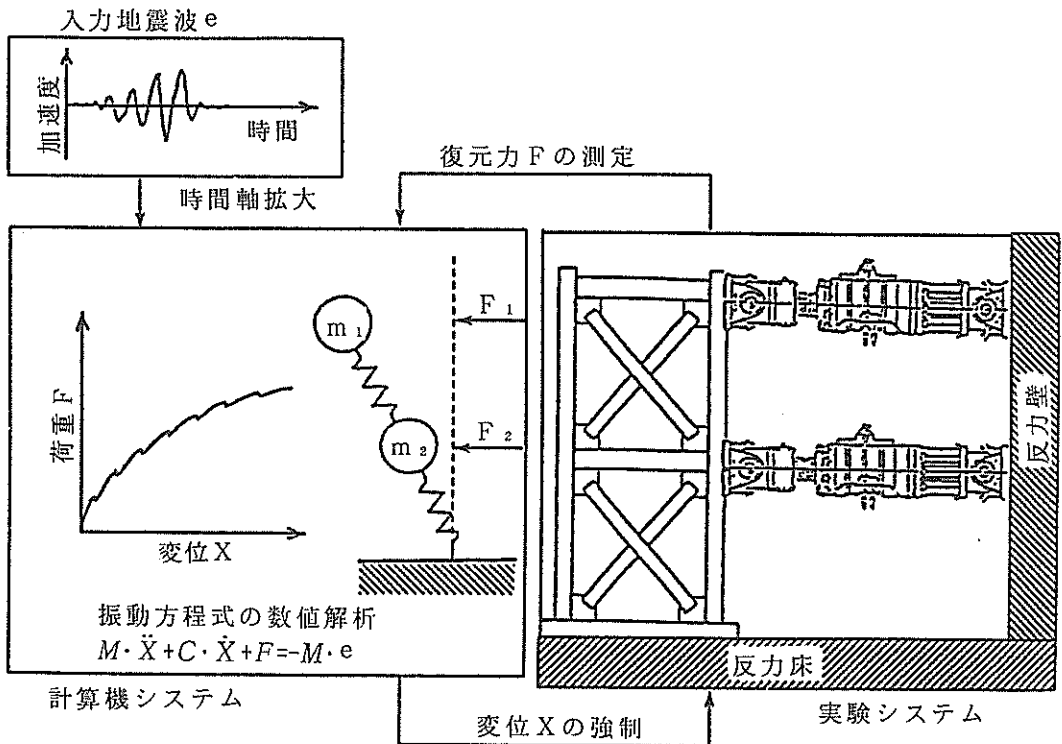


図-29 擬似動的試験の概要

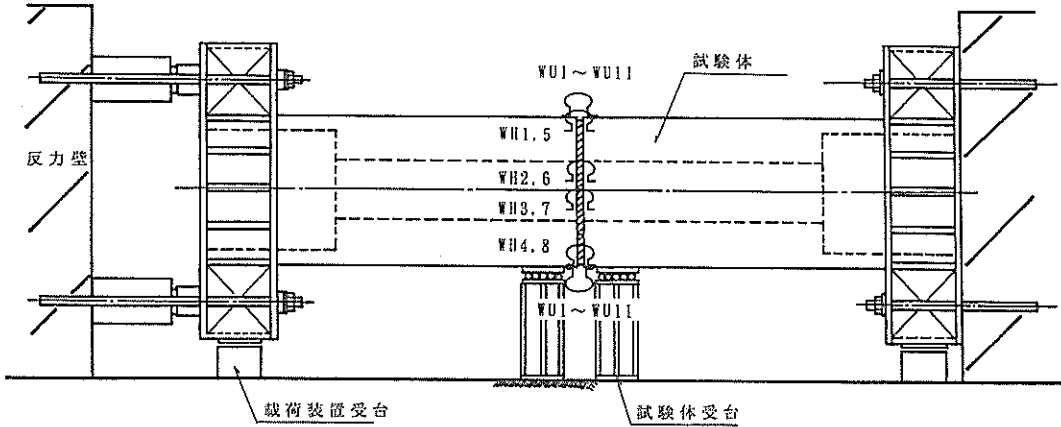
いている。ただし地中構造物では、周囲を地盤で拘束されているので自励振動する可能性は少ないので、実質的には $[K] \{X\} = - [M] \{e\}$ を解いていることになる。

加振機は、2台平行に試験体と反力壁の間に設置する。加振機の最大動的加力容量（載荷振幅）は、それぞれ±100tfと±50tfである。

4.5 計測項目

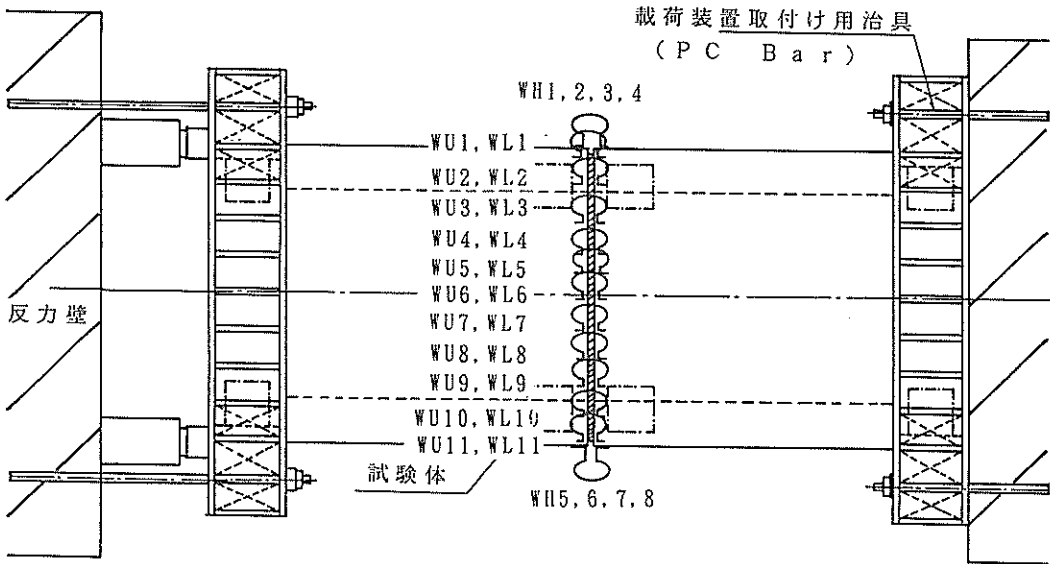
計測項目は、油圧ジャッキの荷重、PC ケーブルの軸力、

ゴムガasketのひずみ、継手部の開きおよび試験体全体の変位である。静的載荷試験では、油圧ジャッキには押しと引きのそれぞれにロードセルを取り付ける。ロードセルの個数は8個である。22本のPCケーブルにはすべてロードセルを取り付け軸力の測定を行う。継手の変位は、図-30に示すようにπ型の変位計22個を継手部をはさんで取り付けて計測する。ゴムガasketに生じるひずみは表面にひずみゲージをはりつけて計測する。ひ



A-A 断面図
(側面図)

a) 側面図



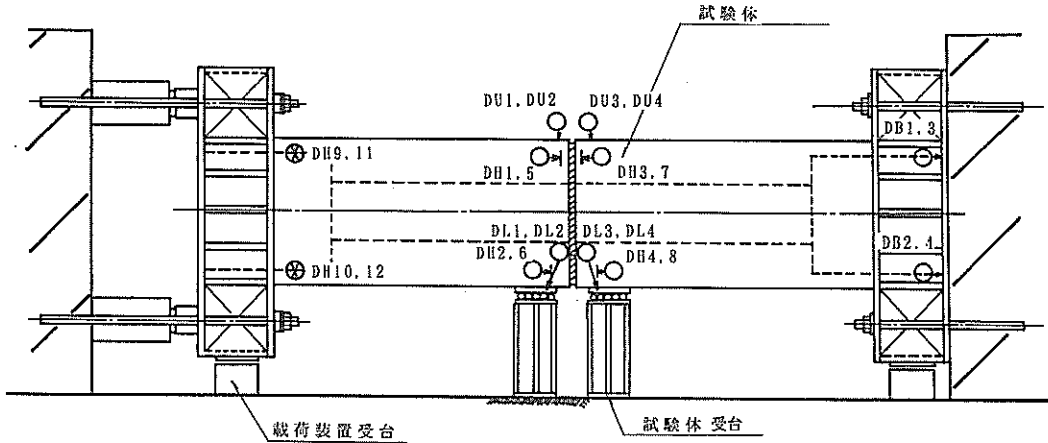
b) 平面図

図-30 バイ型ゲージの配置状況

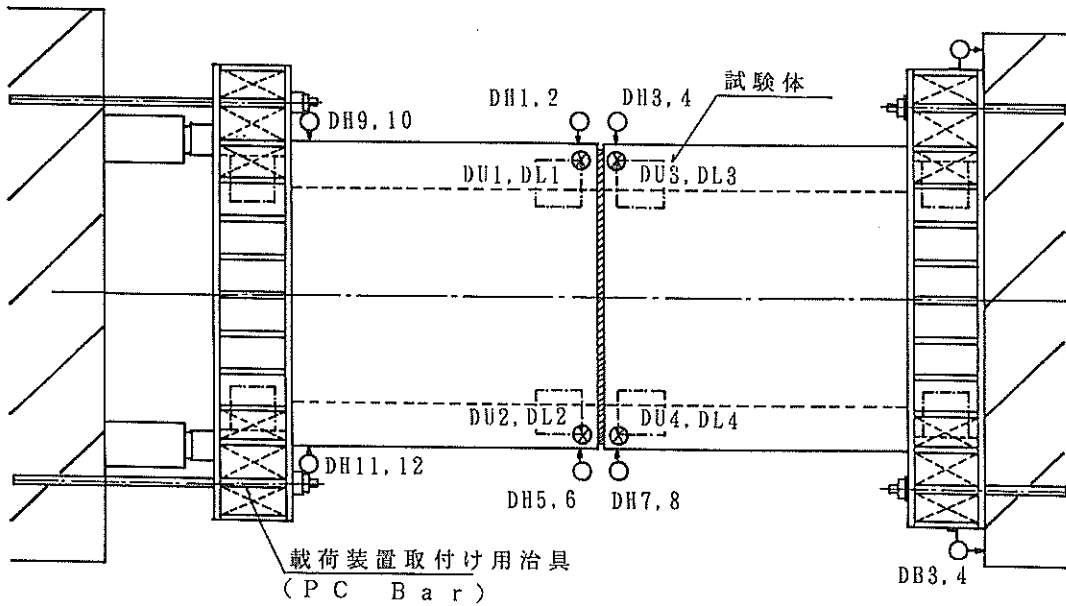
ずみゲージの枚数は、14枚である。また試験体全体の変位については図-31に示す箇所に変位計を取り付けて計測する。静的載荷での総測点数は、90点である。

擬似動的載荷試験でも静的載荷試験と同じような計測項目である。ただし加振機の荷重は、内蔵されているロードセルで計測するとともに、変位はマグネスケールといわれる有効長500mmの変位計で計測する。マグネスケ-

ルの計測精度は、 $4.5\mu\text{m}$ と高性能である。このロードセルの荷重とマグネスケールでの変位の値を振動方程式における復元力と変位としてそれぞれ与える。



a) 側面図



b) 平面図

図-31 変位計の配置状況

5. 試験結果

5.1 静的試験の結果

(1) 軸方向載荷

載荷荷重と柔継手の変形量の関係を図-32に示す。初期状態としてゴムガスケットの圧縮量を22mmとした。この時の圧縮荷重は約40tfであった。圧縮荷重を300tfまで上げたのち除荷を行い引張荷重を約300tfまで柔継手部に作用させた。試験体の設計では、PCケーブルの降伏荷重は400tfである。ゴムガスケットの圧縮の弾性限界は374tfで、圧縮変位が0mm（ゴムガスケットが試験体端部より離れる距離）のときの載荷荷重（引張）は352tfである。すなわち載荷は設計荷重の範囲内で行ったことになる。図中にゴムガスケットとPCケーブルの材料試験から得られた荷重と変位との関係を併せて示す。圧縮域ではゴムガスケット、引張域ではPCケーブルの材料特性に支配されていることがわかる。すなわち圧縮域では荷重と変位の関係が非線形であり、引張領域ではほぼ線形であった。ゴムガスケットの圧縮量が22mm以下の領域では、PCケーブルとゴムガスケットの両者の性質を合成した形状の荷重変位関係になるはずが、ほぼPCケーブルのみに支配されたことになった。

このことは、図-33に示すPCケーブルの軸力と載荷

荷重との関係からもわかる。すなわちゴムガスケットの初期圧縮量以上の圧縮域ではPCケーブルに軸力が作用せず、初期圧縮量以下になってからPCケーブルに軸引張力が作用した。

現在、動的応答計算による耐震設計では、柔継手のばね定数として初期圧縮時のばね定数を用いており、上述の現実とは合わない。すなわち試験結果では圧縮側は継手の圧縮量の増大とともにばね定数が増大している。ただし、ばね定数が大きい方が動的解析における柔継手部の反力は大きくなり、かつ変位量は小さくなる。

図-34にひずみゲージで得られたゴムガスケット表面のひずみと載荷荷重との関係を示す。ゴムガスケットに圧縮力を作用させると表面ひずみは最初圧縮の値となるが、約40tf以上となると引張の値に転じた。載荷荷重が70tfに達すると、ひずみは 18000×10^{-6} に達した。

(2) 曲げ載荷

Z軸回り（水平面内の回転）の曲げ載荷試験での曲げモーメントと回転角の関係を図-35から図-37に示す。各図では初期のゴムガスケットの圧縮量がそれぞれ10mm、20mmおよび30mmの場合である。ここでは初期軸力の影響を調べる。実際には軸力と曲げモーメントが組合わさって柔継手に作用するがこれを試験的に再現することが困難なので、ある特定の軸力のもとで曲げモーメント

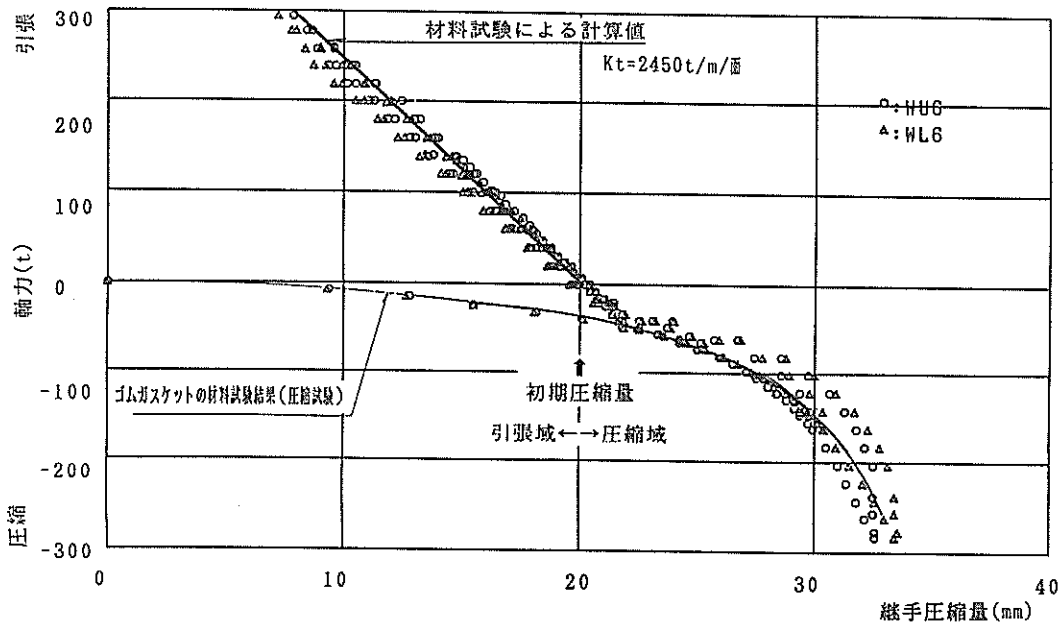


図-32 柔継手の変位量と載荷荷重との関係

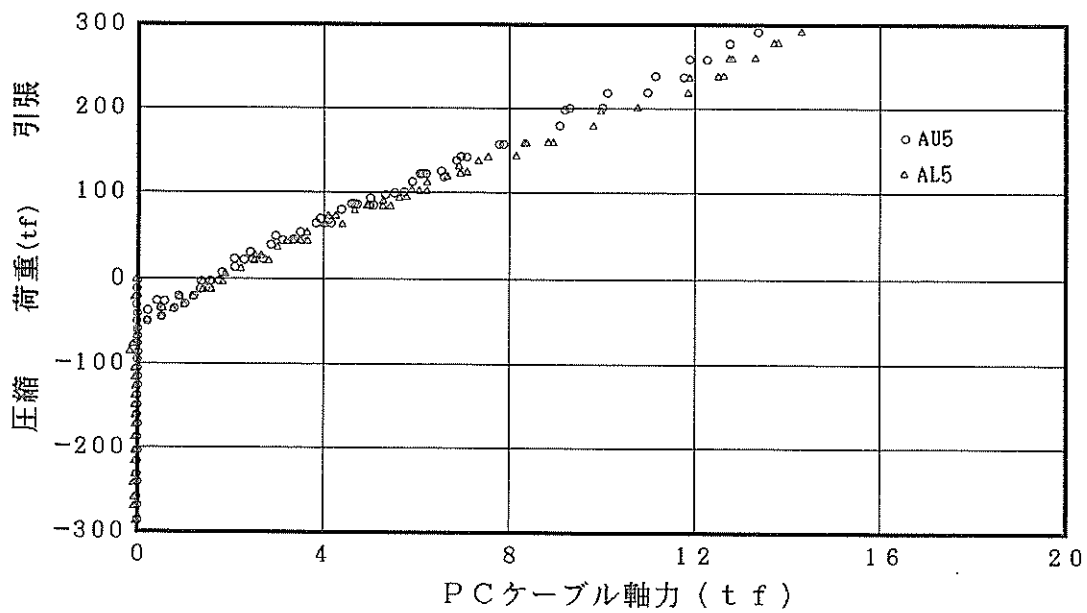


図-33 PCケーブル軸力と載荷荷重との関係

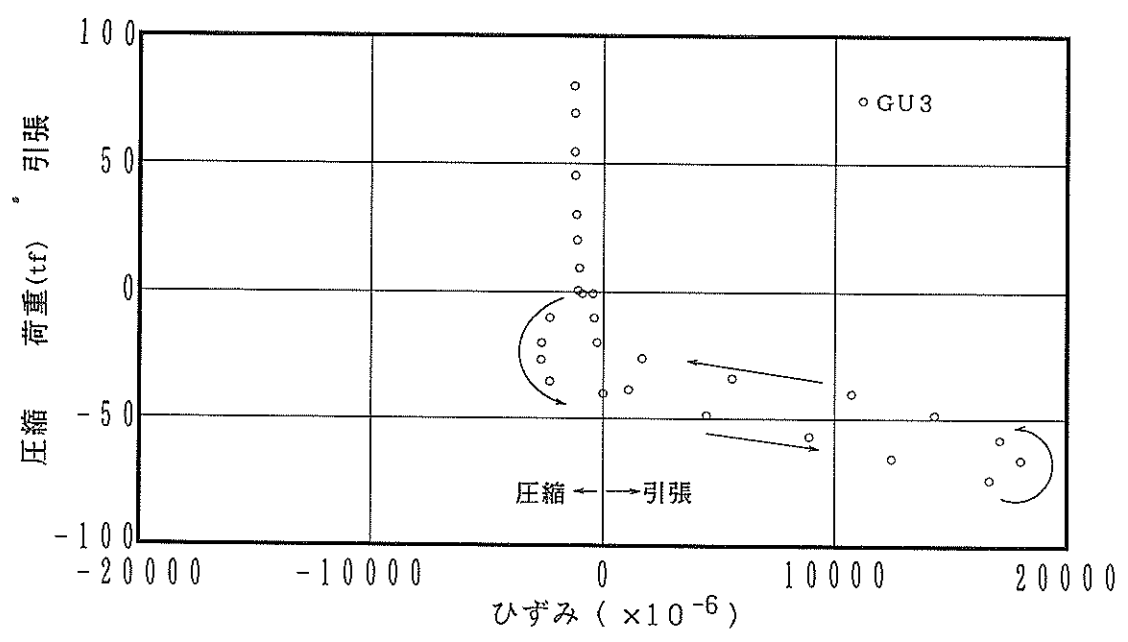


図-34 ゴムガスケットの表面ひずみと載荷荷重との関係

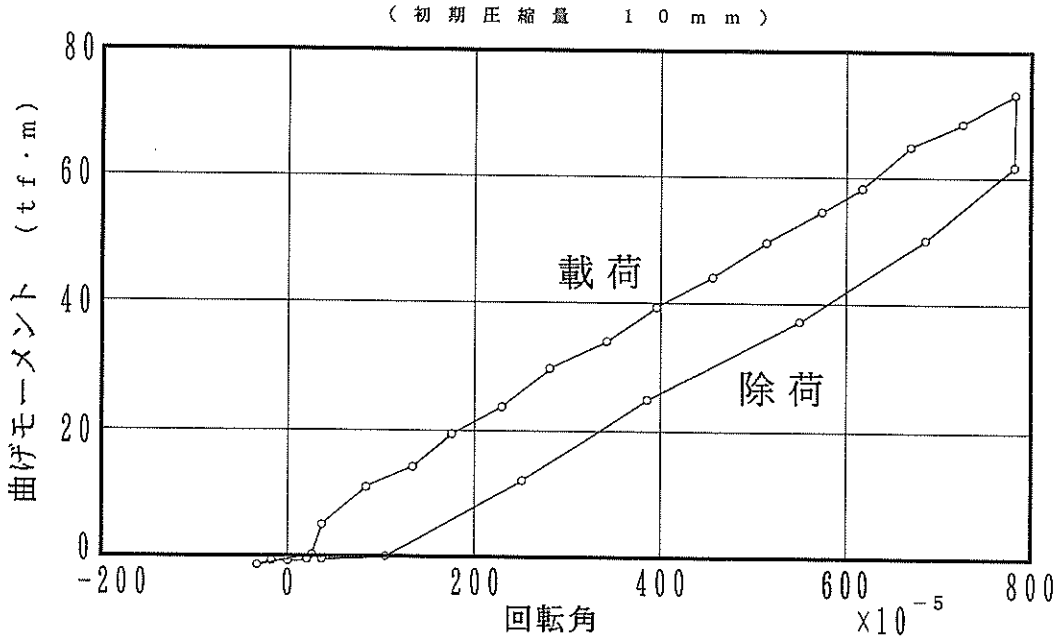


図-35 曲げモーメントと回転角の関係 (初期圧縮量10mm)

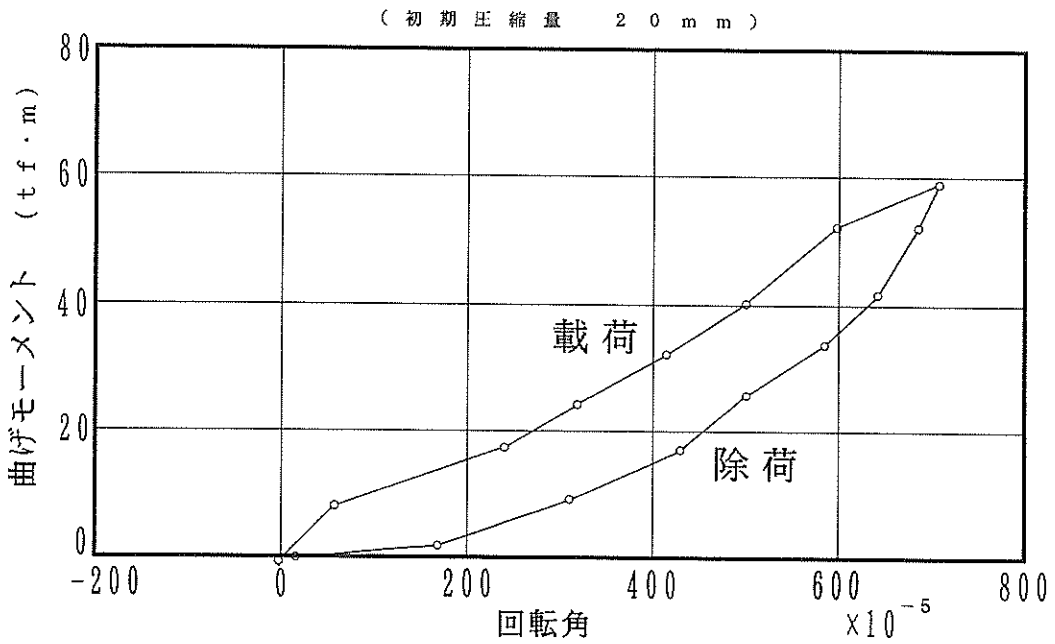


図-36 曲げモーメントと回転角の関係 (初期圧縮量20mm)

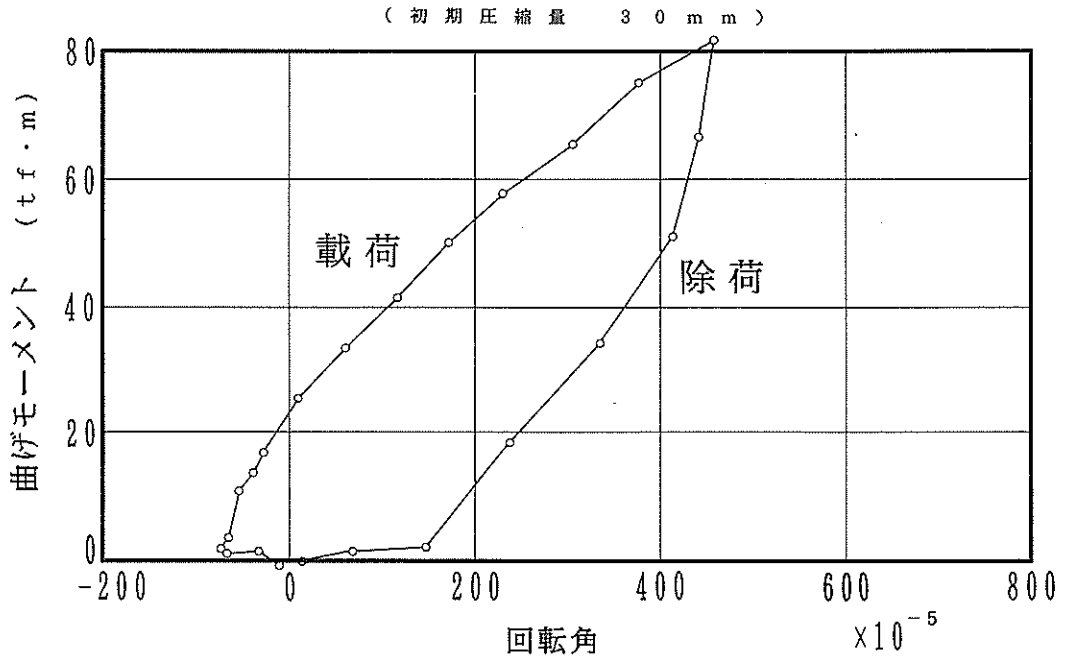


図-37 曲げモーメントと回転角の関係 (初期圧縮量30mm)

トを変化させた。曲げモーメントは油圧ジャッキの荷重と2台の油圧ジャッキの水平方向の間隔の積として求め、回転角は柔継手部の開きを試験体の横幅で除して近似的に求めた。

設計ではゴムガスケットが弾性限界に達するときの曲げモーメントは $56\text{tf}\cdot\text{m}$ 、ゴムガスケットが試験体端部より離れるときの曲げモーメントは $84\text{tf}\cdot\text{m}$ となった。またPCケーブルの応力が、降伏応力の80%に達するときの曲げモーメントは、 $139\text{tf}\cdot\text{m}$ であった。ゴムガスケットの耐荷力と止水性の観点から柔継手の曲げ耐荷力が設定されており、今回の載荷曲げモーメントはこの耐荷力の範囲内で試験体に作用させたものである。

同図に示すようにいずれの試験ケースでも載荷時と除荷時に曲げモーメントと回転角とがほぼ同じ勾配の直線的な関係となった。ただし除荷時の方が載荷時より図中で下側に位置しておりエネルギー吸収(履歴減衰)がみられた。今回の載荷範囲では、非線形性は顕著でなかった。荷重変位関係の曲線での勾配は、回転のばね定数を示している。載荷中に曲げモーメントと回転角の関係がほぼ直線的だと思われる箇所での曲げばね定数を求めると、ゴムガスケットの初期圧縮量が10mmのとき $9600\text{tf}/\text{rad}$ 、20mmのとき $8500\text{tf}/\text{rad}$ 、30mmのとき $13400\text{tf}/\text{rad}$ であった。

初期圧縮量が大きくなると曲げばね定数は大きくなる傾向があった。ただし軸方向載荷と異なり今回の荷重範囲ではばね定数がほぼ一定であり、設計でもばねの非線形性を考慮せず初期のばね定数を用いてよいと考える。

図-38には、式(11)で得られる曲げばね定数を併せて示す。ただし載荷試験では油圧ジャッキの操作の都合で原点がずれるので計算での回転角と曲げモーメントとの関係を試験に合せて移動してある。同図に示すように載荷時において載荷試験結果と計算結果とはかなり良い一致を見た。

図-39に継手部の変形状況を示す。同図では、柔継手を跨いで設置した変位計で計測した値を試験体の幅方向に整理したものである。初期圧縮量が10mmと20mmの場合には、試験体の中心軸(Z軸)回りにほぼ対称に変形していた。曲げモーメントの値が大きくなってこの回転軸が移動することはなかった。ただし初期圧縮量が30mmの場合には、中心軸が曲げモーメントの値の増加とともに移動した。曲げモーメントが60tfを超えるあたりからゴムガスケットが横方向にはらみ出してきた。これはゴムガスケットが曲げを受けた際に生じる圧縮応力が試験体端部で大きく中央で小さいので、端部から中央への応力の流れがあったと考えられる。すなわちこのはらみ出

しは水平方向に生じるせん断力の影響と考えられた。

図-40に曲げモーメントと柔継手部の変位量との関係を示す。図中の w_1 と w_{11} は試験体端部での変位量、 w_6 は試験体中央(回転軸)での変位量を示す。中央では変位量はわずかであるが、両端ではほぼ同程度の値となっている。載荷時と除荷時で履歴経路が異なるのはゴ

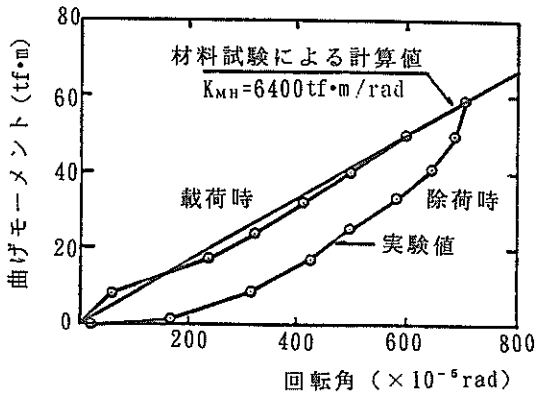


図-38 曲げばね定数の計算値と実験値との比較
 (初期圧縮量20mm)

ムガケットの履歴特性の影響を考える。

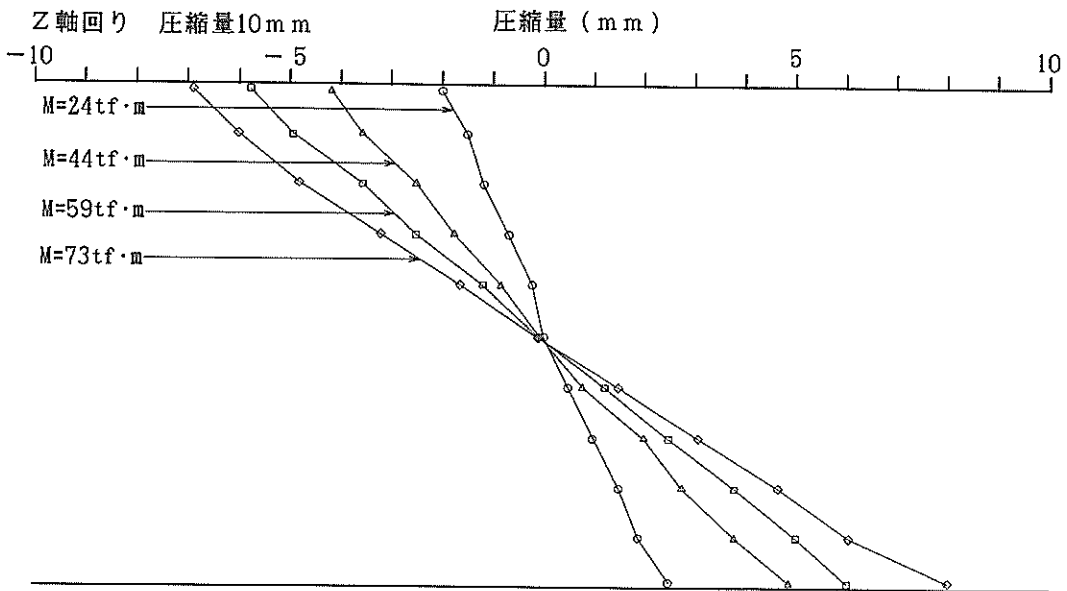
図-41にPCケーブル軸力と曲げモーメントとの関係を示す。ここでA1とA9は試験体両端部に、A5は試験体中央に配置されているPCケーブルでの軸力である。A1では軸力が初期軸力より増加し、A9では減少したことがわかる。またA5では軸力はほとんど一定であった。

Y軸回りに関してもZ軸回りで試験結果とほぼ同じであった。

5.2 擬似動的試験の結果

擬似動的試験では、PCケーブルの本数を22本から6本に減らして試験を行った。この結果、軸引張のばね定数は5446tf/mとなっている。ただしゴムガasketのばね定数は静的試験と同じである。初期圧縮量としてゴムガasketに20mm、載荷荷重として30tfを与えた。

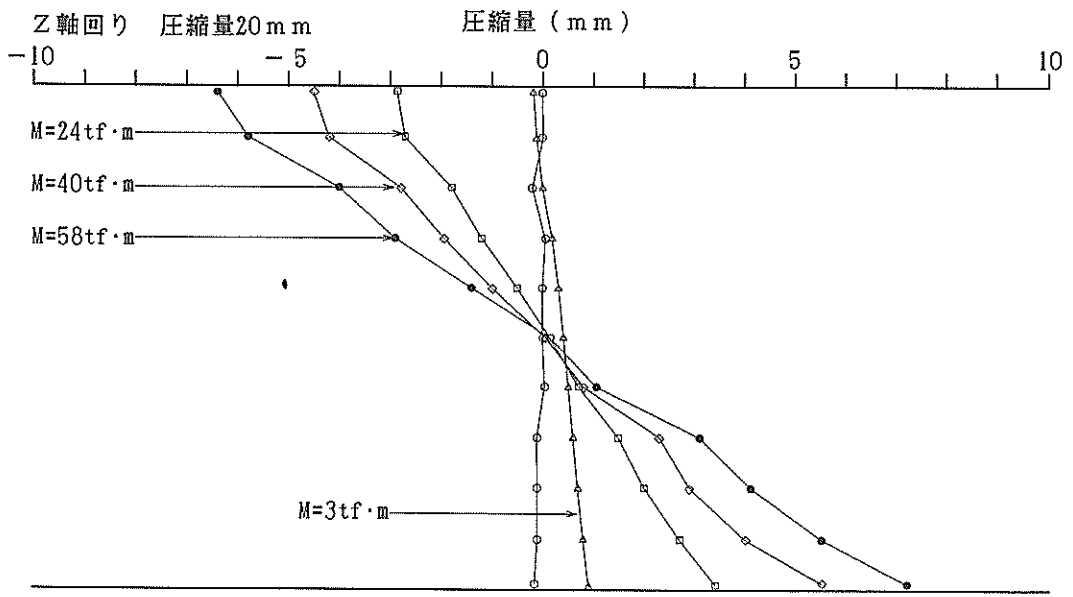
今回の擬似動的試験において、入力波の波形は設計に用いた波形と同じであるが、その振幅は1/10程度とした。すなわち初期圧縮近傍での柔継手の挙動、特にばね定数を調べたことになる。入力荷重波形は、Z港沈埋トンネルでの動的応答計算で柔継手部に生じた加速度波形に試験体の質量を乗じて求めた。この波形を図-42に示す。



継手部目開き分布図

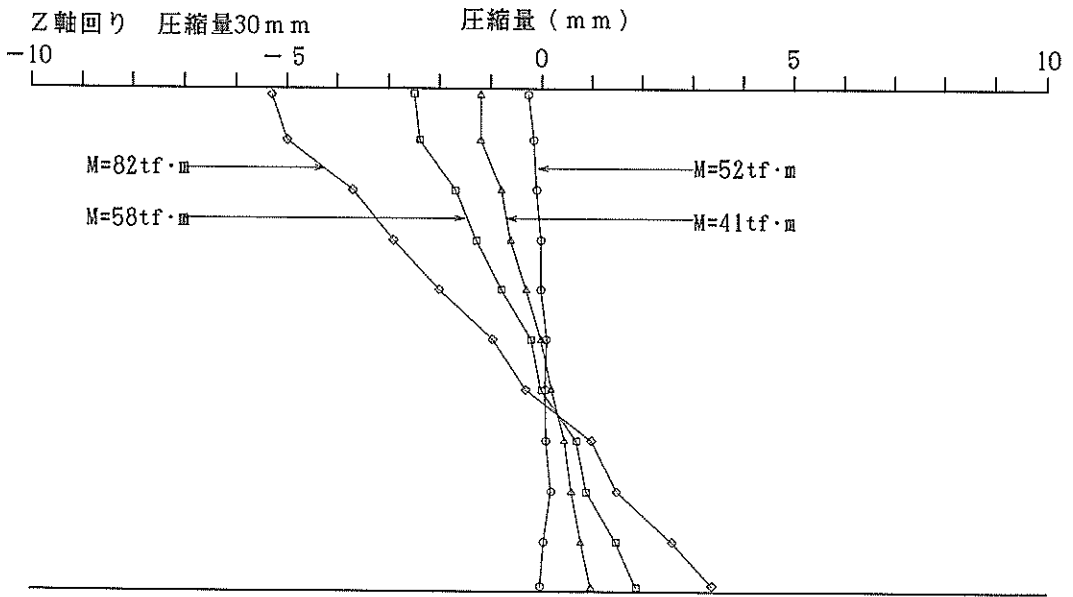
a) 初期圧縮量10mm

図-39 継手部の変形状況



継手部目開き分布図

b) 初期圧縮量20mm



継手部目開き分布図

c) 初期圧縮量30mm

図-39 継手部の変形状況

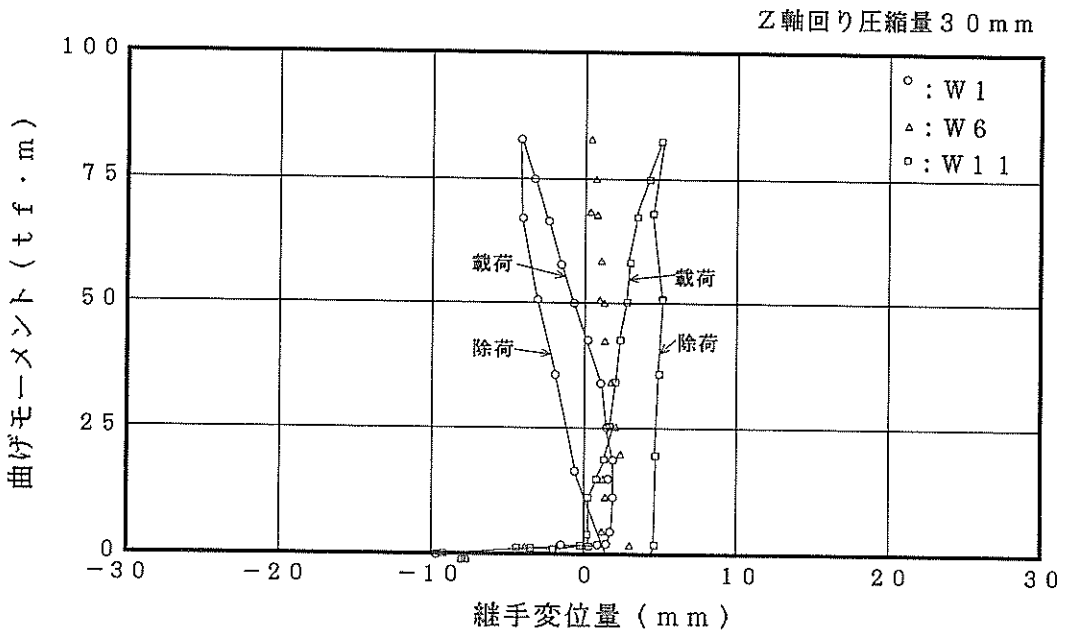


図-40 柔継手変位と曲げモーメントとの関係

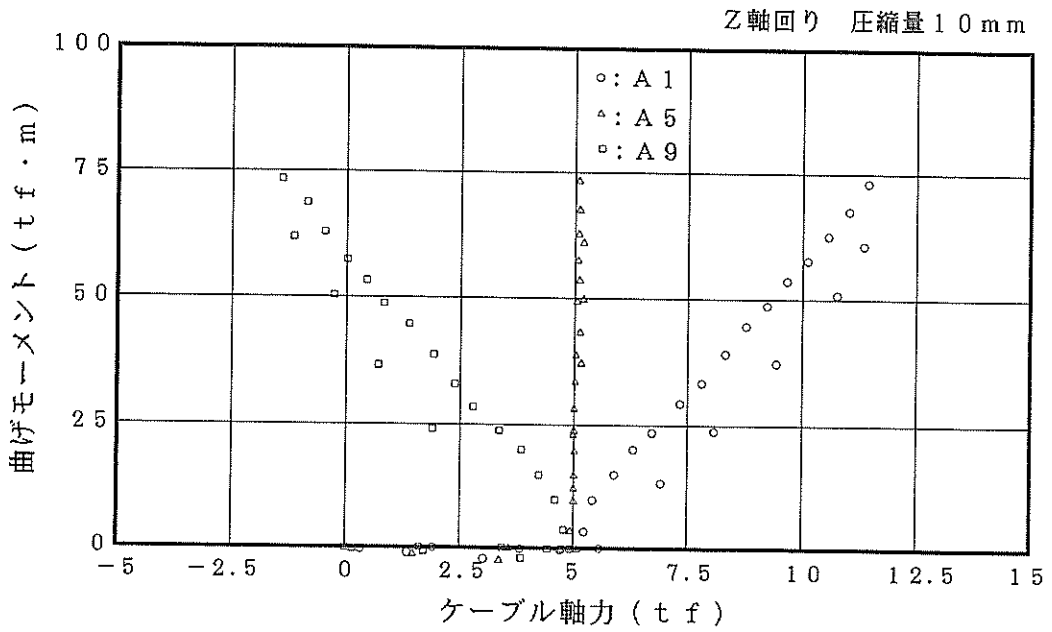


図-41 PCケーブル軸力と曲げモーメントとの関係

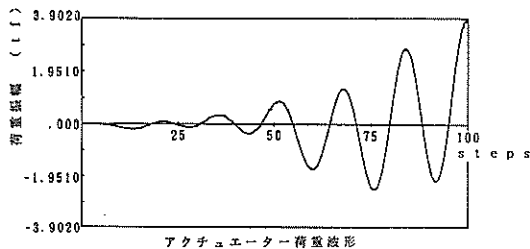


図-42 入力波形

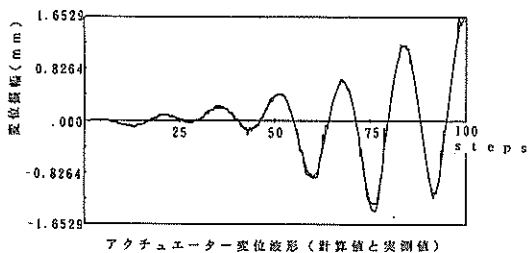


図-43 変位の時刻歴

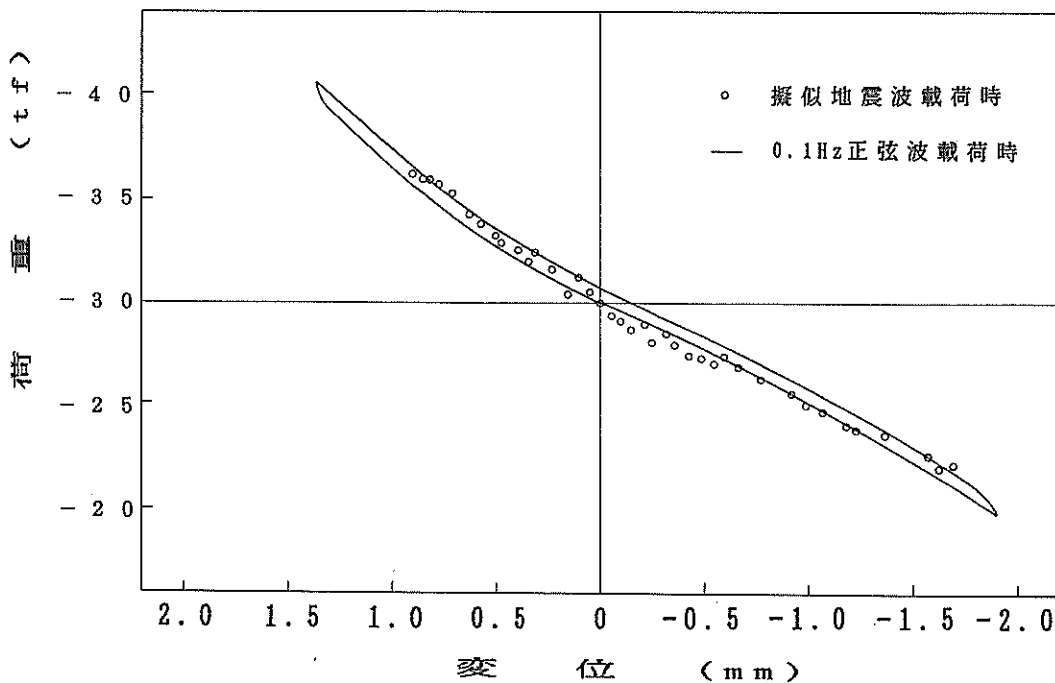


図-44 荷重と柔継手の変位との関係

横軸は荷重のステップを示し、ステップ間隔は0.05秒である。この入力波形を2台の加振機で柔継手に与えた。同じく図-43にマグネスケールで計測した変位の時刻歴を示す。両図中で実線は加振機での、破線は計算機での変位の時刻歴を示している。両者はほぼ等しく計算どおりに加振機が作動していることがわかる。また中央差分方式による数値積分の時間間隔も0.05秒とした。

図-44に荷重と柔継手の変位の関係を示す。同図に周波数0.1Hzの正弦波で振動させたときの荷重変位曲線を併せて示す。0.1Hzの正弦波による挙動を静的な挙動とみなすと、今回の擬似動的試験では動的効果はほとんど見られず、ばね定数については静的なばね定数とほぼ同一であったといえる。また予備試験から0.1Hz～0.3Hz

の範囲ではばね定数の周波数依存性を調べたところほとんどかわりはなかった。また一般的に軟弱地盤に建設される沈埋トンネルでは、断面力が周辺地盤の相対変位によって決まり、かつ継手位置での変位波形の振動周期も2～3秒と長く、動的効果が少ないと考えている。

図-45にPCケーブルの軸力と載荷荷重との関係を、また図-46にこの軸力の時刻歴を示す。PCケーブルが引張力のみ抵抗し、圧縮側になると軸力は初期導入力のみとなった。

次にZ軸回りの曲げ載荷について述べる。ここでは2台の加振機の位相を180度ずらして載荷を行う。加振機での載荷荷重の時刻歴を図-47に示す。軸方向載荷のときと比較して波形がややとがり三角波形をしていた。

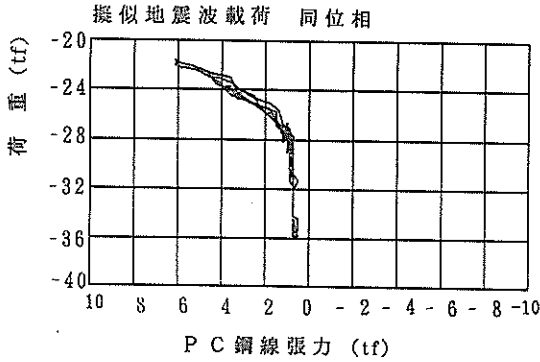


図-45 PCケーブル軸力と載荷荷重の関係

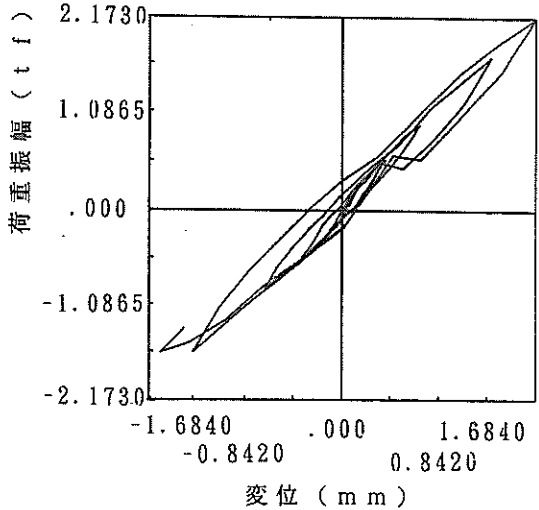


図-48 加振機の載荷荷重と変位との関係

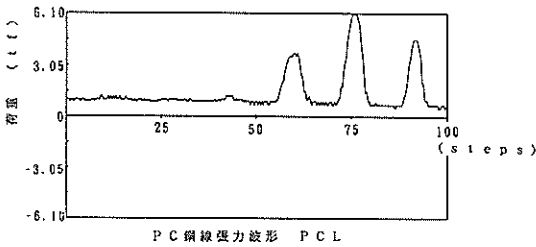


図-46 PCケーブル軸力の時刻歴

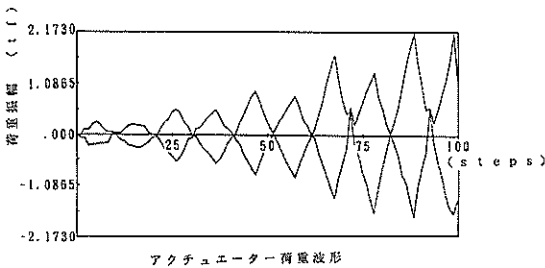


図-47 載荷荷重の時刻歴

図-48に加振機の載荷荷重と加振機の変位の関係を示す。静的載荷と同じように荷重変位曲線の勾配はほぼ一定となった。

擬似動的試験に関しては、本システムが導入されて初めての試験でもあり、入力条件や試験方法が十分検討されていない。相似則と関連して質量、減衰、載荷振幅などの設定に関して今後さらに検討を加えたい。

6. 結論

今回の検討より以下の主要な結論を得た。

- ①柔継手の軸方向のばね定数は引張側と圧縮側で大き

く異なる。すなわち引張側のばね定数はPCケーブルの力学特性に支配され、圧縮側は主にゴムガスケットの力学特性に支配される。

- ②ゴムガスケットの材料非線形性により、圧縮側のばね定数は荷重レベルで異なる。また、引張側のばね定数はほぼ一定値である。

- ③同一の初期圧縮量における柔継手の回転ばね定数は、今回の荷重範囲内ではほぼ一定であった。ただし初期圧縮量が大きくなると回転ばね定数は大きくなる傾向が見られた。

- ④擬似動的試験で実地震波形を入力したところ、沈埋トンネルの柔継手の地震時の動的なばね定数は、静的なばね定数とほぼ同じであった。これは沈埋トンネルでは慣性項と減衰項の影響が強制変位による復元力の項と比較して小さいこと、および柔継手に作用する地震外力が比較的長周期でありこのとき材料の動的な周波数依存性が顕著でないからである。

- ⑤柔継手を沈埋トンネル間に配置することにより地震時の断面力を大きく低減することができる。このため函体の鋼材量を大きく減らすことが可能となる。現在の耐震設計では、柔継手のばね定数を線形として行っており、設計的には安全側の断面力や変形量を与える。より合理的に耐震性を評価するためには、材料の非線形性の影響についても今後検討する必要がある。

7. あとがき

今後の課題として以下のことがある。

- ①不等沈下と地震の両者の荷重が同時に作用したときの柔継手の適用性を調べる必要がある。
- ②柔継手には、今回対象とした形式以外にもいくつか採用可能な形式が提案されており、これらの柔継手の耐震性の評価も行う必要があると考える。
- ③今回の検討では設計荷重範囲内の挙動に着目したが柔継手の破壊性状も検討する必要がある。
- ④長期的な材料の安定性、クリープの影響等を確認する必要がある。

なお、今回の実験に関して運輸省第一港湾建設局の支援を頂いた。また、静的載荷実験に関して野口孝俊氏（第二港湾建設局）および図面作成に久保田耕一氏（構造強度研究室）の協力を頂いた。ここに関係各位に深甚なる感謝の意を表する。 (1992年3月31日受付)

参考文献

- 1) 国土開発技術研究センター：トンネル耐震継手技術基準，昭和54年3月，pp.55-64
- 2) 首都高速道路公団：東京港トンネル工事誌，昭和52年3月，pp.277-296
- 3) 東京都港湾局：東京港第二航路海底トンネル工事誌，昭和55年11月，pp.82-101
- 4) 清宮 理，西沢英雄，横田弘：川崎港海底トンネルでの地震応答観測と応答解析，港湾技研報告，Vol.22, No.3, 1983年9月，pp.253-299
- 5) 栗林栄一，川島一彦，柴田松雄：沈埋トンネルの地震応答に及ぼす耐震継手の効果，土木技術資料，21-12, 1975年，pp.623-630
- 6) 北島誠治，清宮理，三宅光一：新潟港沈埋トンネルの地震応答計算，土木学会第45回年次講演会（I部門），平成2年9月，pp.1208-1209
- 7) 清宮 理，三宅光一，北島誠治：沈埋トンネルの耐震継手の性能に関する一考察，土木学会第46回年次講演会（I部門），平成3年9月，pp.1236-1237
- 8) 川島一彦，他3名：沈埋トンネルの耐震性に関する研究，土木研究所資料，第2376号，昭和61年4月，32p
- 9) 清宮 理：大型構造実験施設の完成，埋立と浚渫，1991年，No.159, pp.26-31
- 10) 田中尚：構造物非線形解析のための小型計算機一試験機オンラインシステム，生産研究，27巻12号，1975年12月，pp.483-487
- 11) 高梨晃一，宇田川邦明，田中尚：電算機一試験機オンラインシステムによる構造物の非線形地震応答解析，日本建築学会論文報告集，第288号，昭和55年

港湾技研資料 No.728

1992・6

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 横浜ハイテクプリンティング株式会社

Published by the Port and Harbour Research Institute
Nagase, Yokosuka, Japan.

Copyright © (1992) by P.H.R.I

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a
maching language without the written permission of the Director General of P.H.R.I.

この資料は、港湾技術研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本資料の全部又は一部の転載、複
写は、港湾技術研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。