

沈埋トンネル柔継手の載荷試験

Mechanical Properties of Flexible Joint between Immersed Tunnel Elements

清宮 理*、藤澤孝夫**、山田昌郎**、本多宗隆**

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

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

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東京湾沿岸、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¹⁾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・実用化^{2)~4)}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知見が十分でない。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。従来これらの設定は柔継手の部分模型を対象に行われてきたが、構造体としての検討はほとんどなされていない。そこで軸方向と曲げのばね定数などの知見を得ることを目的として載荷実験を行う。

* 工博 運輸省港湾技術研究所 構造強度研究室長 (〒239 横須賀市長瀬3-1-1)

** 運輸省港湾技術研究所 構造強度研究室研究員 (〒239 横須賀市長瀬3-1-1)

2. 柔継手のばね定数の算定^{5), 6)}

2.1 構成要素

継手部の座標軸を図-1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-1に示すようにゴムガスケット、P C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。今回のばね定数の設定方法は、参考文献^{5), 6)}を基本にしている。

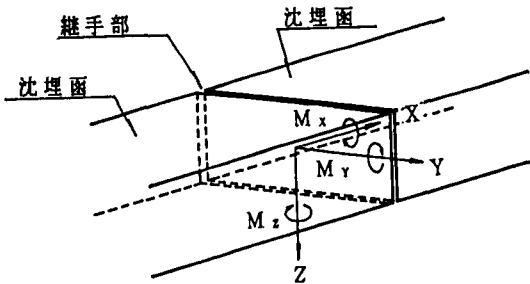


図-1 継手部の座標軸

表-1 ばねの抵抗要素

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

2.2 軸方向のばね定数

軸方向の抵抗要素は、引張側でP C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-2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。

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

このときのばね定数は、接線勾配で与えられる。

もし材料非線形性が顕著であるとす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。

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

ここでの α 、 β は係数である。

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P Cケーブルの必要本数(n)は、P Cケーブル1本当当たりの許容引張荷重を F_a とすると $n = N/F_a$ で求められる。P Cケーブルは、ほぼ等間隔で函体周囲に配置される。P Cケーブルの長さ(l)は、軸引張力が作用したときのゴ

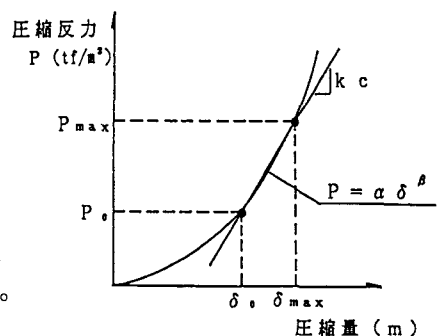
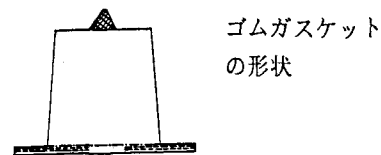


図-2 ゴムガスケットの荷重変位関係

ムガasketの変位量が許容変位量内に納まるように設定する。この許容変位量（ δa ）は、函体同志を水圧圧接したときのゴムガasketの圧縮量からゴムガasket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asket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asketの全長（周長 L ）で除して得られる1m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。

$$l = E_p \cdot n \cdot A_p \cdot \delta a / N \tag{3}$$

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、 δa : 許容変位量である。

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。

$$K_p = E_p \cdot n \cdot A_p / l \tag{4}$$

次に静水圧により圧縮したゴムガasket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asketの反力が減少する。この状況を図-3に示す。PCケーブルの引張反力（ P_s ）とゴムガasketの反力（ $P_g - P_{go}$ ）は、それぞれ次式で得られる。

$$P_s = K_p \delta p \tag{5}$$

$$P_g - P_{go} = \alpha (\delta o - \delta p)^\beta - \alpha \delta o^\beta \tag{6}$$

ただし P_{go} : 初期反力、 N_o : 施工時または完成後の初期外力である。
 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asketの力（ $P_g - P_{go}$ ）を差し引いて次式で求められる。

$$P_e = P_s - (P_g - P_{go}) \tag{7}$$

式(5)および式(6)を式(7)に代入し δp で微分するとゴムガasketの変位が δp のときのばね定数（ K_t ）が得られる。

$$K_t = K_p + \alpha \beta (\delta o - \delta p)^{\beta-1} \tag{8}$$

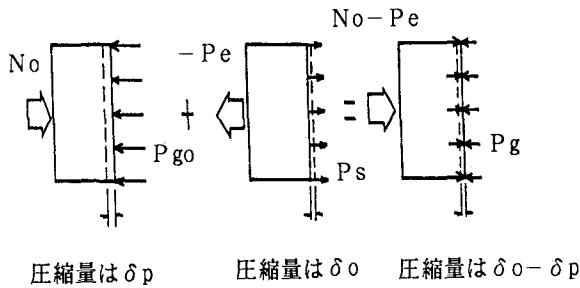


図-3 PCケーブルとゴムガasketの力の釣合

2.3 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-4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asketが δo 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。

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

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asketの反力

次に中立軸回りの抵抗モーメント（Mz）を計算する。

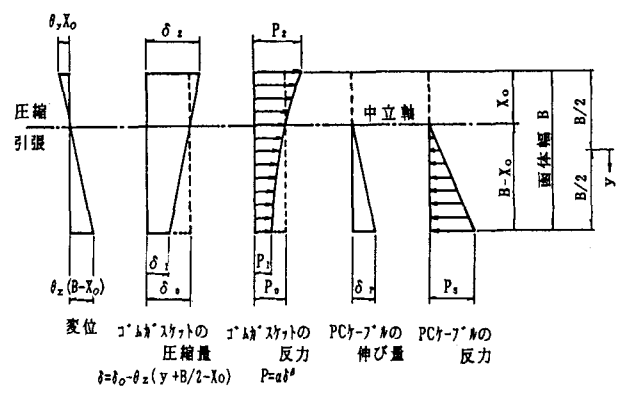
$$M_z = -2 \int_{-B/2}^{B/2} \alpha \{ \delta_o - \theta_z (y + B/2 - X_o) \}^2 y dy + (P_2 - P_1) H \cdot B/2 + P_s H \cdot (B/2) + 2 \int_{-B/2+X_o}^{B/2} P_s / (B - X_o) (y + B/2 - X_o) y dy \quad (10)$$

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（Mzmax）が順次得られる。この時の平均的な回転バネ（ K_{θ_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。

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



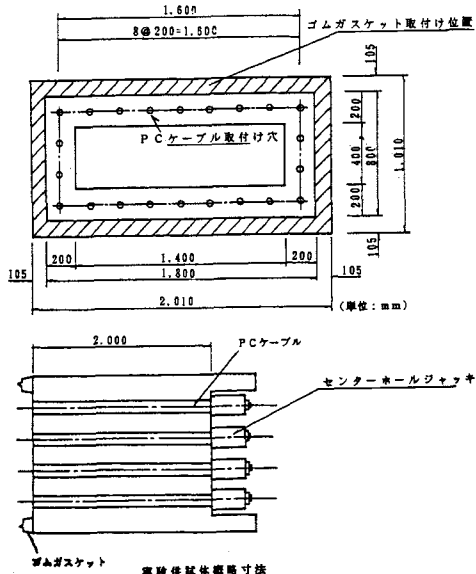
図－４ 柔継手の回転の状況

3. 載荷試験⁷⁾

3.1 試験体の構造

新潟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－２に示す。函体の寸法に関しては、今回約1/15の縮尺である。ただしゴムガスケットの模型製作上の制約、実験場の能力および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。ゴムガスケットに関しては、材料の性質は同じで寸法的には1/4となっている。

表－２ 実物と模型の諸元



図－５ 試験体の柔継手の状況

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

図一 5 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。ゴムガスケットを試験体断面の周辺全周に配置する。本体の高さは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ある。突起の堅さは、本体より若干柔らかくしてある。P Cケーブルは、ゴムガスケットの内側に20cm間隔で合計22箇所配置する。P Cケーブルは片側 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P Cケーブルの軸力を測定するものである。

函体本体の周囲は厚さ 6 mmの鋼板で被覆し、内側に設計基準強度240kgf/cm²の普通コン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P C鋼棒用の穴が開けられている。

3. 2 使用材料

(1) ゴムガスケット

使用材料は実物と同じ天然ゴムである。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 δ (cm)の関係を式(2)の指数関数で表示すると次式となる。

$$P=3.22\delta^{3.17} \quad (tf) \quad (13)$$

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と次式となる。

$$Kc=1020\delta^{2.17} \quad (tf/m) \quad (14)$$

(2) P Cケーブル

P C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一 3 に示す。試験体には長さ 4 mの22本のP C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。カプラーなしの場合の引張試験結果では降伏荷重は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P C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。P Cケーブルの公称の弾性係数を2.06×10⁶Kgf/cm²とすると、P Cケーブルの引張のばね定数は式(4)より21640tf/mとなる。またゴムガスケットの反力を考慮して、ゴムガスケット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、P Cケーブル本体よりもやや大きな値となる。

表一 3 P C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 + 4φ12.5mm			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			

3. 3 静的試験の方法

載荷の状況を写真一 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。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P C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。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P Cケーブルを締め付けて与える。ただし今回の載荷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。

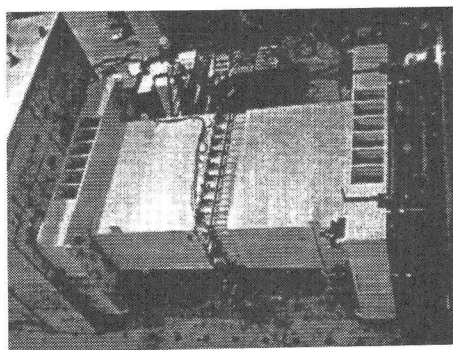


写真-1 載荷試験状況

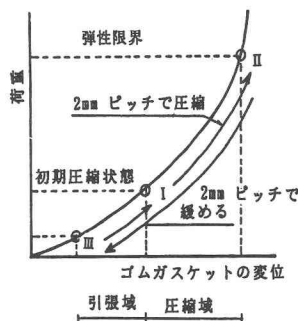


図-6 載荷パターン

軸方向載荷では、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継手に与える。載荷は、変位制御で行う。載荷パターンを図-6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ピッチで載荷し、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。

曲げ載荷試験は、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。載荷の手順は、軸方向載荷と同じく変位制御であるが、載荷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。この軸力は、試験体内のPCケーブルを約1tf程度締め付けることにより保持する。

3.4 擬似動的載荷試験の方法^{8) 9)}

この載荷システムは、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。試験体の振動方程式を次式に示す。

$$[M] \{\ddot{X}\} + [C] \{\dot{X}\} + [K] \{X\} = -[M] \{e\} \quad (15)$$

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

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。次に多質点系モデルによる動的応答計算¹⁾で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。今回数値積分として中央差分法を用いる。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。

質点の個数は1個であり1質点系モデルをここでは解いている。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。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。

3.5 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、ゴムガスケットのひずみ、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、 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。ゴムガスケット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。ひずみゲージの枚数は、14枚である。また試験体全体の変形については24台の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

ネスケールの計測精度は、 $4.5\mu\text{m}$ 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。

4. 試験結果

4.1 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-7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、引張域ではゴムガスケットの影響は少なく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。

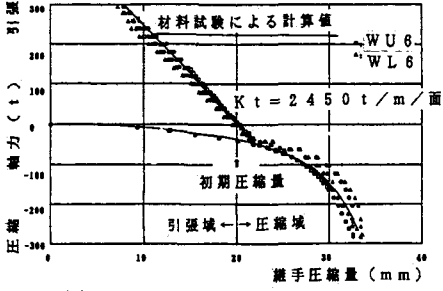


図-7 柔継手の変位量と載荷荷重との関係

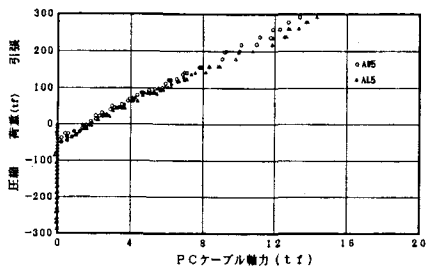


図-8 PCケーブル軸力と載荷荷重との関係

このことは、図-8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、柔継手のばね定数を弾性と仮定し、初期圧縮時の平均的なばね定数を用いており、上述の実験結果と合わない。設計時には圧縮側と引張側ではばね定数の値を別個に設定する必要がある。

(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-9から図-11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

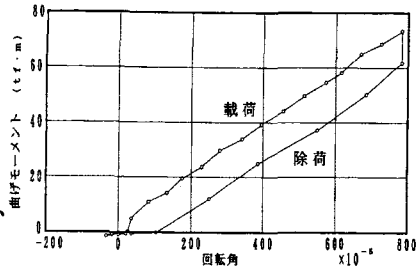


図-9 曲げモーメントと回転角の関係（初期圧縮量10mm）

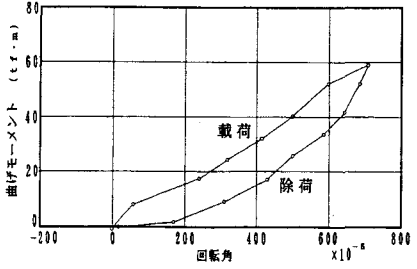


図-10 曲げモーメントと回転角の関係（初期圧縮量20mm）

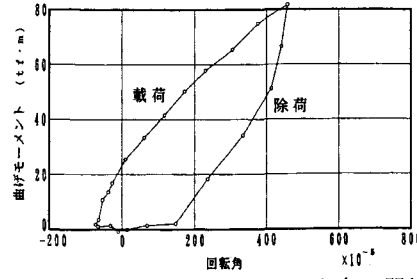


図-11 曲げモーメントと回転角の関係（初期圧縮量30mm）

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56tf・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84tf・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、139tf・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。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 9600tf/rad、20mmのとき 8500tf/rad、30mmのとき 13400tf/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を考慮せず初期のばね定数を用いてよいと考える。

図-12には、式(11)で得られる曲げばね定数を併せて示す。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-13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もこの中心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の左右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-14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w1とw11は試験体端部での変位量、w6は試験体

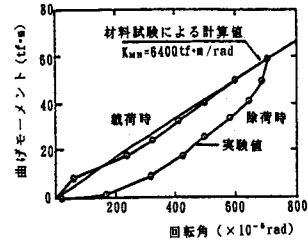


図-12 曲げばね定数の計算値と実験値との比較（初期圧縮量20mm）

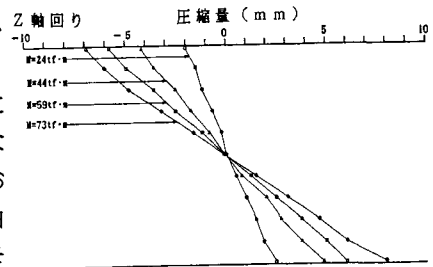


図-13 継手部の変形状況（初期圧縮量10mm）

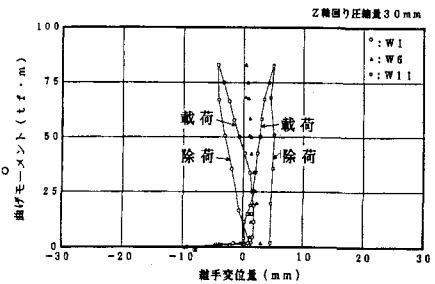


図-14 柔継手変位と曲げモーメントとの関係

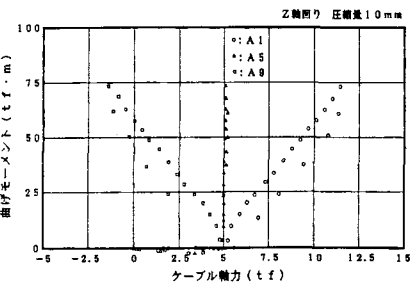


図-15 PCケーブル軸力と曲げモーメントとの関係

中央（中心軸）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。

図-15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軸回りの試験結果とほぼ同じであった。

4.2 擬似動的試験の結果

擬似動的試験では、加力実験装置の能力の関係から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。ただしゴムガスケット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スケットに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（八戸港湾取得記録）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、新潟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-16に示す。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。図-17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影響がなかった。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。

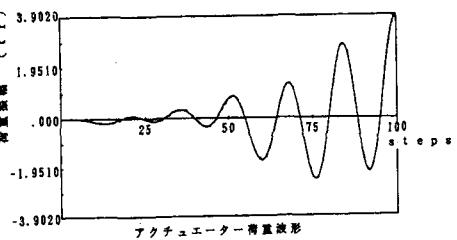


図-16 入力波形

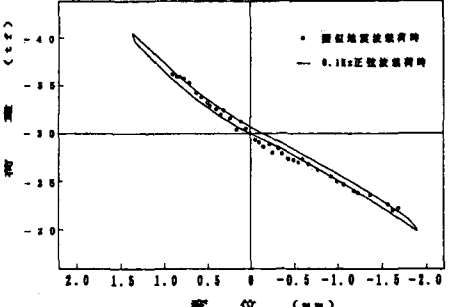


図-17 荷重と柔継手の変位との関係

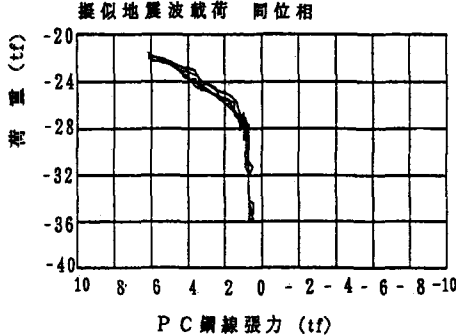


図-18 PCケーブル軸力と載荷荷重の関係

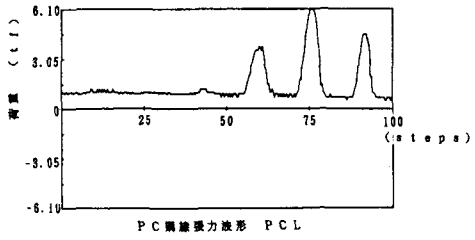


図-19 PCケーブル軸力の時刻歴

図-18にPCケーブルの軸力と載荷荷重との関係を、また図-19にこの軸力の時刻歴を示す。PCケーブルが引張力のみに抵抗し、圧縮側になると軸力は初期導入力のみの約1tf弱となった。

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-20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-21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。

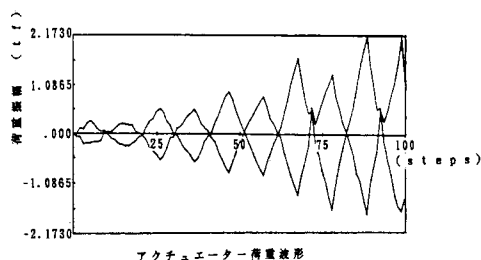


図-20 載荷荷重の時刻歴

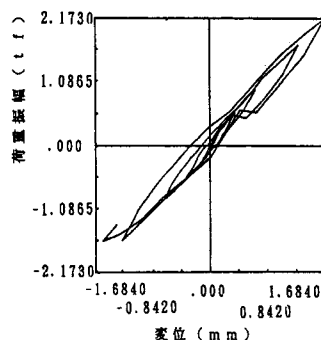


図-21 加振機の載荷荷重と変位との関係

5. 結論

今回の検討より以下の主要な結論を得た。

- ① 今回想定した沈埋トンネルでの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やや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平均的な動的なばね定数は、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。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 建設省土木研究所：沈埋トンネル可撓性継手の動的剛性の評価方法、土木研究所資料、第1859号、昭和57年8月、pp.1~6
- 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) 田中尚 構造物非線形解析のための小型計算機-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
- 9) 高梨晃一、宇田川邦明、田中尚：電算機-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2月、pp.115-123

(1992年9月21日受付)