

沈埋トンネル用の鋼製柔継手

濱崎義弘*・山口邦彦*・竹鼻直人*・永田孝三**・福本幸司***・南條孝夫****

*都市環境カンパニー・構造技術部 **都市環境カンパニー・橋梁工場 ***アルミ・鋼カンパニー・技術部 ****技術開発本部・機械研究所

Steel Spring Joint for Immersed Tunnel

Yoshihiro Hamazaki・Kunihiko Yamaguchi・Naoto Takehana・Kozo Nagata・Koji Fukumoto・Takao Nanjo

Spring joints installed at the joint sections of immersed tunnels are subjected to large compressive force during the sinking operation and earthquakes. A new steel spring joint was developed and examined in several loading tests, including the static loading test, cyclic loading test and eccentric loading test, to determine the fundamental mechanical properties of the joint. The tests confirmed that the steel spring joint behaves within elastic range and responds stably for cyclic loading and eccentric loading. Based on these results it was concluded that this new steel spring joint can be used for joints in immersed tunnels.

まきがき = 沈埋トンネルは、第1図に示すように、陸上で製作した函体を海底で結合することにより、海底トンネルを建設する工法である。シールドトンネルとくらべ、トンネル形状の自由度が大きいことや軟弱地盤への適応度が高いことなどの特長を有し、近年の臨海交通網の整備にともない、建設需要が高まりつつある。

沈埋トンネル各函体の結合部には、地震や軟弱地盤の不等沈下により沈埋トンネル本体に生じる断面力を低減するために、柔継手がもちいられる¹⁾²⁾。柔継手の構造として、一般的に第2図に示すゴムガスケットとPCケーブルからなる構造がもちいられている。ゴムガスケットは主に圧縮力に対して抵抗する構造部材である。ゴム材は、強い非線形性を示し、荷重が増加するにしたがって変位も増大するが、ある荷重以上になると変位がそれ以上は進まず、剛体のような挙動を示す。また、ゴム材は500%を越える歪みが生じると破断が生じる。沈埋トンネルの接合部には水圧接合時や地震時などに大きな圧縮力が作用するため、ゴム材の使用に際しては、耐荷力や動的な安全性に十分な検討が必要である。さらに、50~100年と使用されるため、長期間にわたる力学的かつ化学的性質の変化に関する検討も不可欠となる。

そこで、本研究では強度が高く材質の信頼性の高い材料として、鋼製の板ばねをもちいて、第3図に示す柔継手を開発した。この板ばね継手はゴム材にくらべ、高圧縮下での耐荷力が大きくかつクリープ、材料の劣化等の問題が少ないことを特徴とする。また万一の場合にも交換が可能である。本研究では、この鋼製継手の基本的

な力学試験および有限要素法による解析をおこない、鋼製柔継手の有効性を明らかにする。

1. 鋼製柔継手の設計

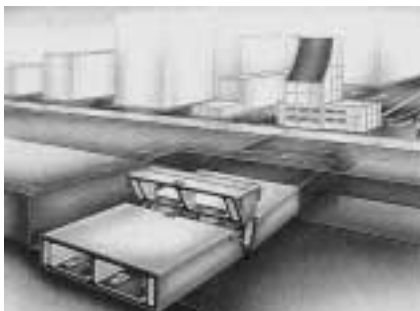
1.1 要求性能

耐震性に優れた柔継手を設計するためには、以下の性能を満足する必要がある。

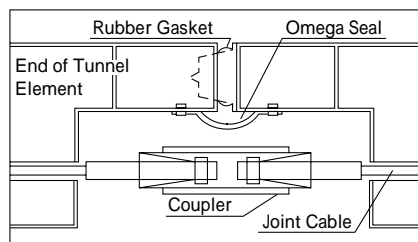
- 1) 力学特性として、中小地震時(荷重が小さい状態)には、地盤、函体の変位に十分追従できるように、柔らかく応答する。大地震時(荷重が大きい状態)には、局所的な変形が大きくなるように、またトンネル全体系の中で軸力を十分に伝えられるように、剛となる特性を持つ。
- 2) 材料の信頼性の高さを保持するために、地震時の鋼材の応力は降伏強度 σ_y 以下を目標とする。
- 3) 施工性を考慮し、接合部における狭い空間で施工できる構造とする。

1.2 鋼製柔継手の構造

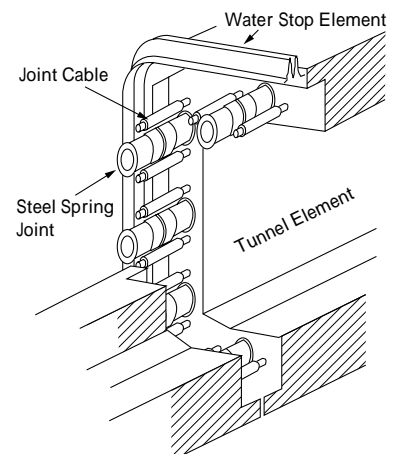
これらの条件を満足する鋼製柔継手として、凹板、凸板およびばね材として作用する平板で構成される板ばね継手を開発した。本継手の機能の概念を第4図に示す。本継手は、荷重が小さい状態では凸板と平板との接触面積が小さいため、全体剛性が低く圧縮変形量大きい。荷重の増加にしたがって、凸板と平板との接触面積が



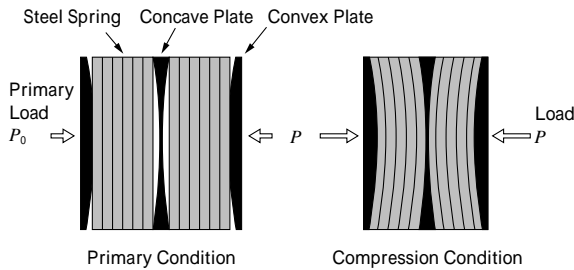
第1図 沈埋トンネル
Fig. 1 Immersed tunnel



第2図 従来の沈埋トンネル接合部
Fig. 2 Immersed tunnel joint in the past



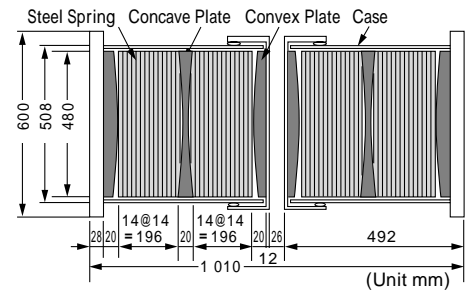
第3図 鋼製柔継手による接合部概要
Fig. 3 Steel spring joint



第4図 板ばね継手の作用
Fig. 4 Operation of steel spring joint

第5図 板ばね継手の断面 (A-type)

Fig. 5 Cross section of steel spring joint



第1表 供試体の諸元

Table 1 Properties of specimens

| Specimen | Designed Displacement | Designed Load | Spring Components | | Test Methods | | |
|----------|-----------------------|---------------|-------------------|--------|--------------|-------------|--------------|
| | | | Thickness | Number | Static Load | Cyclic Load | Partial Load |
| A-type | 13mm | 4.2MN | 14mm | 14 | | | |
| B-type | 20mm | 4.6MN | 14mm | 10 | | | - |

徐々に大きくなり、最終的には平板の変形形状が凹板、凸板の形状と一致し、ほぼ剛体となる。

実際に設計した結果を第5図に示す。直径480mmの円形の凹板、凸板およびばね材として機能する平板で構成されている。凹、凸板の表面形状は、等分布荷重を受ける周辺単純支持板のたわみ形状と一致させている。板ばね部は1組10~15枚の平板から構成されており、計4組の板ばねが円筒状のケーシング内に装填されている。

2. 力学試験

2.1 供試体の概要

供試体は実寸大とし、第4図の一对の継手の半分を力学試験の対象とした。また、第1表に示すように、目標最大変形性能の異なる2種類の供試体を製作した。A-typeはゴムガスケットと同等の変形性能を、B-typeはA-typeに対して約50%増の変形性能を目標としている。材料は、HT80 ($\sigma_y = 700 \text{ MPa}$)をもちいている。

2.2 試験方法

2.2.1 静的載荷試験

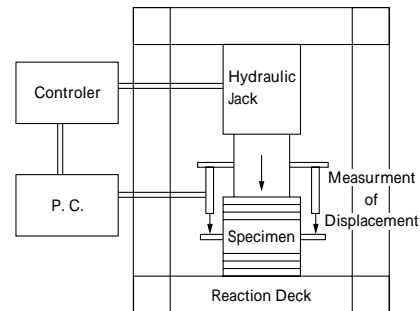
第6図に試験装置の概要を示す。ケーシングに挿入された供試体を鉛直方向にセットし、油圧ジャッキをもちいて軸方向に載荷する。載荷試験は、50~100kN間隔で徐々に単調載荷し、設計変位または最大荷重まで載荷したのち、除荷する。測定項目は、載荷荷重、板ばねの鉛直方向の変位および円板の面外曲げ歪みである。

2.2.2 繰返し載荷試験

本継手の耐震性を検討するために、繰返し載荷試験をおこなった。継手の使用期間中に設計時に想定している大規模な地震が発生する回数は少ないと予想される。また、阪神大震災級のレベル2地震においても、主要動に当たる箇所の波数は10~20波程度と考えられる。そこで、地震動に対する安全性の評価のために、100回の繰返し載荷をおこない耐久性を確認した。

2.2.3 偏心載荷試験

地盤の不等沈下や地震などにより、結合部には残留せん断変形が生じることが考えられるため、せん断変形後の圧縮特性の変化を把握する必要がある。沈埋トンネル



第6図 載荷試験装置

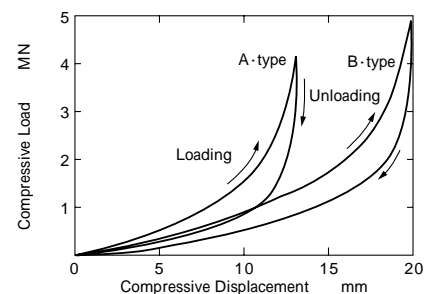
Fig. 6 Experimental equipment

では、せん断キーが接合部に取付けられているため、地震時のせん断変形量は最大数mm程度であり、偏心の影響は小さいと予想される。しかし、偏心荷重に対する安定性の評価のために、30mmおよび60mmの偏心量を与えたときの静的載荷試験をおこなった。

2.3 試験結果

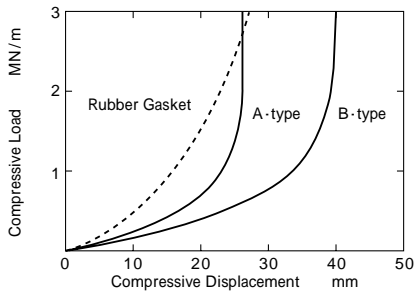
2.3.1 静的載荷試験

静的載荷試験による変位と荷重の関係を第7図に示す。A-typeの最大変形量および荷重は、13.0mm、4.2MN、B-typeは19.5mm、4.9MNであり、第1表に示した設計値にほぼ近い値となっている。履歴曲線によると、変位の増加にともない剛性が增大する非線形挙動を示しており、荷重の増加にともなう円板の接触面積の増加による剛性変化が表れている。また、板間の摩擦の影響により履歴を描いており、エネルギー消費をしていることがわかる。



第7図 変位と荷重の関係

Fig. 7 Load-displacement relationship



第8図 板ばね継手とゴムガスケットの変位と荷重関係の比較
Fig. 8 Comparison of load-displacement relationship between steel spring and rubber gasket

ゴムガスケットと比較した結果を第8図に示す。実トンネル状態で比較するために、板ばね継手の変位は、本供試体を2体直列で設置するとし、測定変位を2倍にしている。圧縮荷重は、トンネル結合部断面周囲に2.2mに1体の板ばね継手を配置すると仮定し、圧縮荷重を単位長さ当たりの荷重に換算している。この結果、供試体A-typeは、ゴムガスケットと変形特性および最大変位が比較的近似している。また、B-typeはゴムガスケットに対して、より変形量の余裕が大きい継手としての性能がでている。

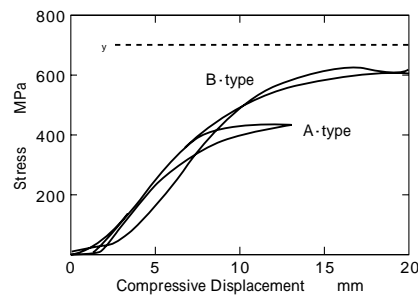
円板内の曲げ応力の測定結果を第9図に示す。両供試体とも、もっとも応力レベルの高い円板中央部の応力値は、変形にともない増加し、変形の大きいところではある値に収束している。A-type, B-typeともに、最大値は降伏強度 σ_y 以下となっており、目標値を満足している。

2.3.2 繰返し载荷試験

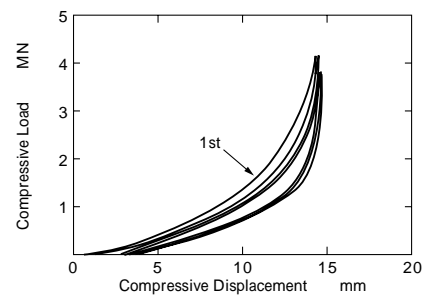
供試体A-typeの繰返し载荷試験の結果を第10図に示す。繰返し回数が増すと1回目より変形が進むが、2~3回目以降は安定した履歴曲線を描いている。また、最大荷重に対する疲労寿命をS-N曲線³⁾から推定すると、A-typeの場合約 3×10^5 回、B-typeの場合約 7×10^4 回であり、本継手が設計想定地震動に対して十分な疲労性能を有していることがわかる。

2.3.3 偏心载荷試験

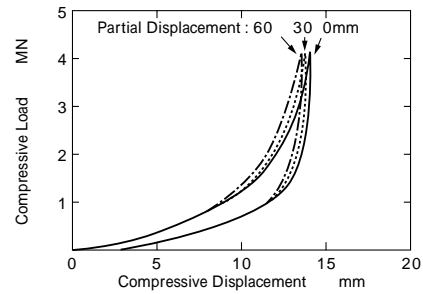
供試体A-typeの偏心载荷試験の結果を第11図に示す。偏心量が増えると、荷重が大きい箇所ではね定数が若干大きくなるとともに、最大変位量が抑制される傾向がある。ただし、最大変位量の減少は偏心量30mmの



第9図 変位と円板中央部の応力の関係
Fig. 9 Displacement-stress relationship of center position



第10図 繰返し载荷試験結果 (A-type)
Fig. 10 Results of cyclic load test (A-type)



第11図 偏心载荷試験結果 (A-type)
Fig. 11 Results of partial load test (A-type)

ときに約2%、60mmのときに約4%とごく微量であり、本継手の力学的な挙動に与える影響はほとんどないと考えられる。

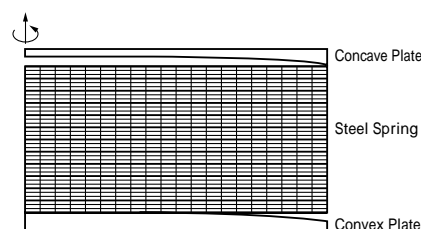
3. 有限要素法による解析

3.1 解析方法

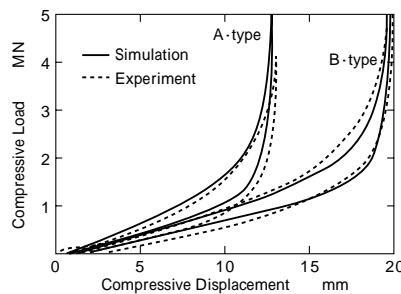
板ばねの応力と変形状態を把握するために、有限要素法による静的解析をおこなった。計算の対象とする板ばねは、試験にもちいた供試体に対して、軸対称条件をもちいてモデル化した。凹板、凸板は剛体として扱っている。また、各板をそれぞれ板厚方向に3分割、半径方向に20分割している。要素分割を第12図に示す。本解析では、接触を考慮した解析をおこなっており、解析には非線形構造解析汎用プログラムABAQUS5⁵⁾を使用している。また、板間の摩擦係数は、鋼板-鋼板間の一般的な摩擦係数として0.3としている。

3.2 解析結果

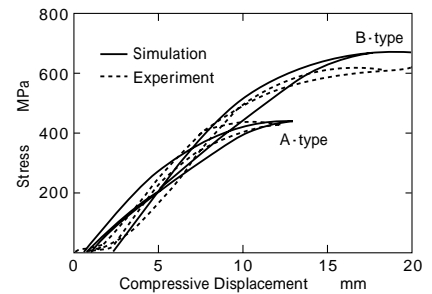
凹板、凸板に強制変位を与えた際の変位と荷重の関係を第13図に示す。非線形挙動は実験結果と非常に良い対応を示している。また、変位と板中心部の曲げ応力の関係を第14図に示す。応力についても実験結果とは良



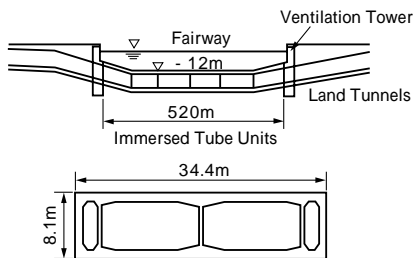
第12図 板ばねの解析モデル
Fig. 12 Simulation model of steel spring



第13図 解析結果と測定値の比較 (変位と荷重の関係)
Fig. 13 Comparison between calculated values and measured values (load-displacement relationship)



第14図 解析結果と測定値の比較 (変位と応力の関係)
Fig. 14 Comparison between calculated values and measured values (displacement-stress relationship)



第15図 解析の対象とした沈埋トンネル
Fig. 15 Configuration of immersed tunnel

く対応している。すなわち、接触問題を考慮した有限要素解析により板ばね継手の力学特性の解析が可能であることが明らかとなった。

4. 沈埋トンネル全体系の地震応答解析

4.1 解析条件

解析対象とした沈埋トンネルは、第15図に示すように、換気塔間520mを幅34.4m、高さ8.1m、平均長さ86.7mのエレメント6函を結合した構造である。板ばね継手を各継手部に36個配置するモデルとしている。解析方法は、沈埋トンネルやパイプラインの耐震設計に多くもちいられている二次元多質点系モデルによる動的応答計算法をもちいている⁵⁾⁶⁾。第16図に解析モデルを示す。入力地震動は、1983年日本海中部地震の秋田港地震波から求めた。基盤波形をもちいて、対象地盤面での応答力の速度を求め、入力地震動とした。

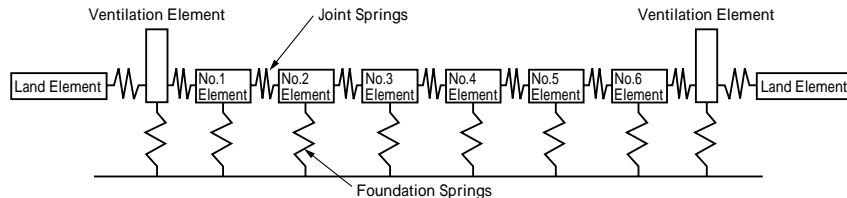
解析における継手ばねの特性は、圧縮側については第7図中の板ばね継手のA-typeの特性をもちい、引張側には連結ケーブルの引張剛性をもちいた。また、解析手法については、全体の応答に与える継手の非線形性の影響が大きい⁷⁾ことから、非線形応答解析をおこなった。

4.2 解析結果

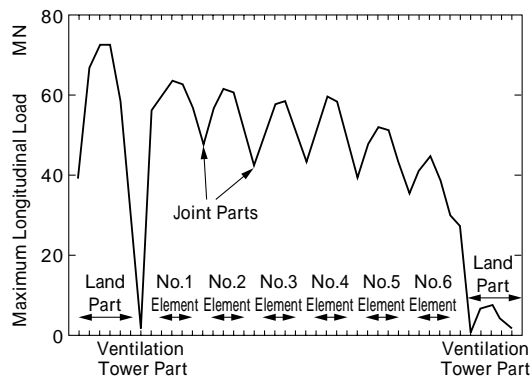
第17図に各函体および継手に作用する最大圧縮軸力分布を示す。継手部の最大圧縮力は47MNであり、1組当たりの板ばね継手に換算すると1.3MNとなる。単体の載荷試験結果と比較して、鋼材は降伏応力値以内である。また、函体の最大軸圧縮力は64MNであり、函体の軸圧縮耐力(約3000MN)に比較すると十分に小さい。この結果から、鋼製柔継手を適用した沈埋トンネルは、全体系としても十分な耐震性能があることが明らかとなった。

むすび=板ばねを利用した沈埋トンネル用の鋼製柔継手を開発し、載荷実験および有限要素法による解析をおこない、力学特性を確認した。えられた知見を以下に示す。

1) 静的載荷実験の結果、鋼製板ばね継手はほぼ目標通りの変形性能を保有しており、従来のゴムガスケットとほぼ同等の変形量を持つ継手、および50%増の変形量を持つ継手の設計が可能であることが実証された。



第16図 沈埋トンネルの解析モデル
Fig. 16 Simulation model of immersed tunnel



第17図 軸方向の最大圧縮力分布
Fig. 17 Distribution of maximum longitudinal load

2) 100回の繰返し載荷に対して、安定したヒステリシスを描いており、本継手が繰返し荷重に対して十分な安全性を有していることが明らかになった。

3) 沈下や地震などによる偏心荷重に対するばね特性の変化はごくわずかであった。

4) 本継手の力学特性は、円板の接触問題として取扱った有限要素解析により特性の計算が十分可能である。

5) 沈埋トンネル全体系の地震応答解析をモデルトンネルについて実施した結果、鋼製柔継手が十分な耐震性を有していることが明らかになった。

今回の研究結果により、板ばねを利用した沈埋トンネル用の鋼製柔継手は、耐震性、耐久性に優れ、沈埋トンネルへの適用が可能な継手構造であると判断される。今後、実際の沈埋トンネルに適用する際の施工性、耐錆対策などを検討する予定である。

参考文献

- 1) 清宮 理ほか：構造工学論文集，Vol.39A，(1993)，p.1447.
- 2) 土木学会：沈埋トンネル耐震設計指針（案），(1975)
- 3) 日本溶接協会：高張力鋼溶接の実際，(1984)
- 4) HKS：ABAQUS / Standard User's Manual，Ver.5.5，(1995)
- 5) 浜田政則：土木学会第26回年講第1部，(1971)，p.317.
- 6) 清宮 理：港湾技研資料，No.307，(1978)，p.1.
- 7) 山本一敏ほか：土木学会第41回年講第1部，(1986)，p.1061.