

沈埋函用ベローズ継手の開発

The Development of Bellows Joint for Immersed Tunnels.

木村秀雄¹⁾・片山能輔¹⁾・豊永臣悟¹⁾

Hideo KIMURA, Yoshisuke KATAYAMA and Shingo TOYONAGA

Abstract

Although the flexible joint that consists of rubber gasket and PC wire, has been applied for the seismic joint of 8 immersed tunnels, that is insufficient in respect to the deformability for large earthquake movement or soil settlement. Furthermore, long-term endurance of rubber gasket under high compression has not enough reliability.

The bellows joint made from steel, is a high deformable that joint used mainly in the field of piping. This paper shows the development of bellows joint adopted as the flexible joint for the immersed tunnel elements in lieu of conventional seismic joints.

Key Words : immersed tunnel, flexible joints, bellows, earthquake, fatigue, fracture toughness

1. はじめに

我国の沈埋トンネルの耐震継手には東京港第二航路海底トンネル以来、水圧接合に用いたゴムガスケットを圧縮バネ、PC ケーブルを引張りバネとして施工継手部に可撓性継手を構築する工法がとられ、既に8例のトンネルを数える。

この間、設計地震動の見直しや沈下対策に伴うより大きな変形能の要求には、大型化の限界に近いゴムガスケットを開発することで対処してきたが、川崎航路トンネルで発生した水圧接合時のゴムガスケット圧壊事故を契機に、有機材料であるゴムガスケットを高いレベルの圧縮ひずみ状態のままで用いる従来型の可撓性継手の長期耐久性や信頼性が問われ、新たに信頼性の高い継手構造の開発が待たれていた。

筆者らは、主に配管分野で温度収縮、地震時変位の吸収を目的に従来から広く用いられてきた高い変形能力を有する伸縮継手であるベローズに着目し、これを従来型の耐震継手に代わる耐久性と信頼性に優れる可撓性継手として沈埋トンネルへの適用を検討してきた。本論文は沈埋函用に開発したベローズ継手の、設計法・製作方法・耐久性について記したものである。

2. ベローズの沈埋トンネルへの適用

(1) 内蔵式耐震継手

トンネルの可撓性継手を施工継手と分離して沈埋函内蔵形式とし、函体鋼殻の製作時に完全な止水性を保証できる変形能の高い鋼製部品として工場内で函体に組み込むことで、現場施工に左右されない品質管理の確実な信頼性の高い耐震継手を実現する。沈埋函の水圧接合時の止水材として不可欠なゴムガスケットは施工時にのみ用い、図-1に示すように沈埋函に内蔵したベローズが、函軸方向の可撓性継手の機能を担う。ベローズ式継手は水圧接合力に抵抗する仮結合材で固定して、全ての函の水圧接合が終了した後に仮結合材を撤去して耐震継手化する。

1) 正会員 工学修士 新日本製鐵株式会社 鉄構海洋事業部

なお、内蔵型のベローズ式継手は従来型の継手と異なり、地震時の函体の発生断面力が最小となるような位置に配置することも可能である。

(2) 沈埋函用ベローズの形状

配管用に用いられる円形ベローズの場合、内圧に対してはベローズの山谷を両端固定と考えたはりの曲げ問題に近似できる。これが、耐圧性はベローズの山数と無関係に定められ、可撓性は山数を増減するだけで要求に応じた性能を発揮できるベローズの特長である。ところが、沈埋函のように外水圧下の矩形形状のベローズでは、

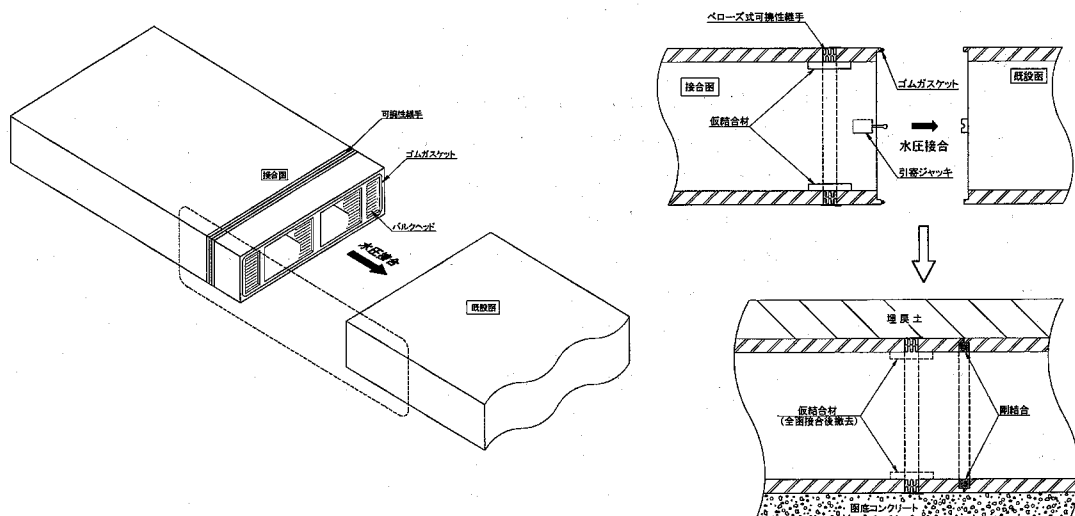


図-1 可撓性継手内蔵型沈埋函の概念図

耐圧性はベローズの函軸方向の長さに制約を受け、その制限を受けた山数から可撓性には必然的に限界を有する。

水深 20m程度で、幅 36m、高さ 9m程度の矩形の沈埋トンネル断面に函軸方向に $\pm 100\text{mm}$ 程度の変形能を目標に設計すると、沈埋函用ベローズ式継手は図-2に示すように板厚 14mm、山高 250mm、山の内径が板厚の 3 倍、2つの山数で懸垂形状の時に、耐圧性、地震による疲労損傷率の観点で設計条件を満足した。懸垂形状にしたのは、両端固定部の水圧による曲げモーメントをほぼ 0 とするためである。この場合、函軸方向と函軸直角方向軸回りの剛性は小さいが、函軸直角方向と函軸廻り（振り）は剛性が大きくなる。

材質は沈埋函鋼殻本体と同じ溶接用圧延鋼材（SM490YB）とし、外水圧による発生応力度を鋼材の許容応力度以下に抑えると 13mm 程度の板厚が必要となる。これに外面が海水に接すること

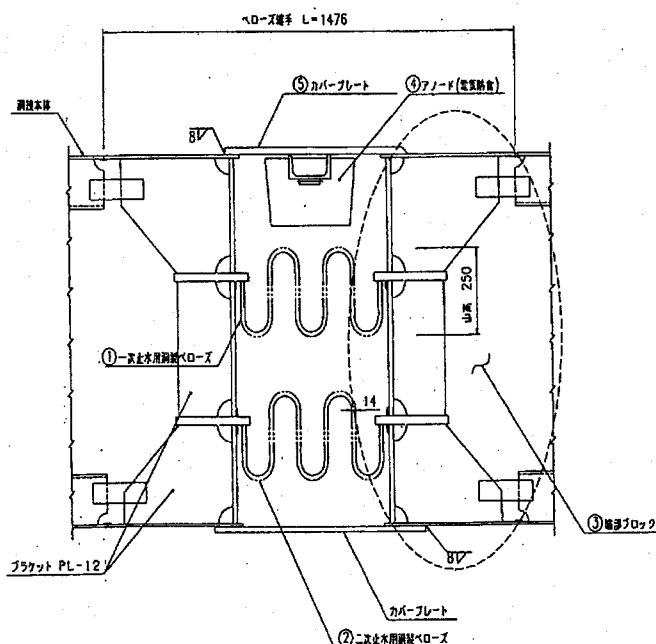


図-2 沈埋函用ベローズの断面図

から電気防食を施して、防食設計上は1mmの腐食代を見込んで板厚を14mmとしている。また、コーナー部は応力集中を防ぐラウンド形状とした。なお、止水に対する従来の沈埋トンネルにおける安全性の考え方を踏襲し、同一断面にペローズを二重に配置した。

この形状のペローズ継手の力学特性をモデル化してトンネル全体系の地震応答解析を行い、個々のペローズ継手の応答量をもとにペローズの疲労照査をして安全性を定量評価できる。

(3) 製作方法

上述したような大径肉厚のペローズは配管分野では殆ど実績が無く、いかに製作するかが問題であった。試作を重ねた結果、図-3に示すように圧延方向をペローズの子午線方向(山谷に沿う方向)とした鋼板を冷間曲げによってストレートペローズに成型し、コーナーペローズはこれを更に冷間曲げにより周方向の成型を行う製作フローとした。

なお、成型時のひずみが大いので複数回の熱処理により残留応力を除去する。14mm程度の厚板では懸念が少ないと考えられるものの、熱処理に伴う靱性低下対策として複数回の熱処理後でもシャルピー吸収エネルギーを保証する仕様とした。

これらを長尺溶接して沈埋函断面の大きさのペローズに組み立てる。溶接部は母材と同じように表面を仕上げ、応力集中を防いでいる。

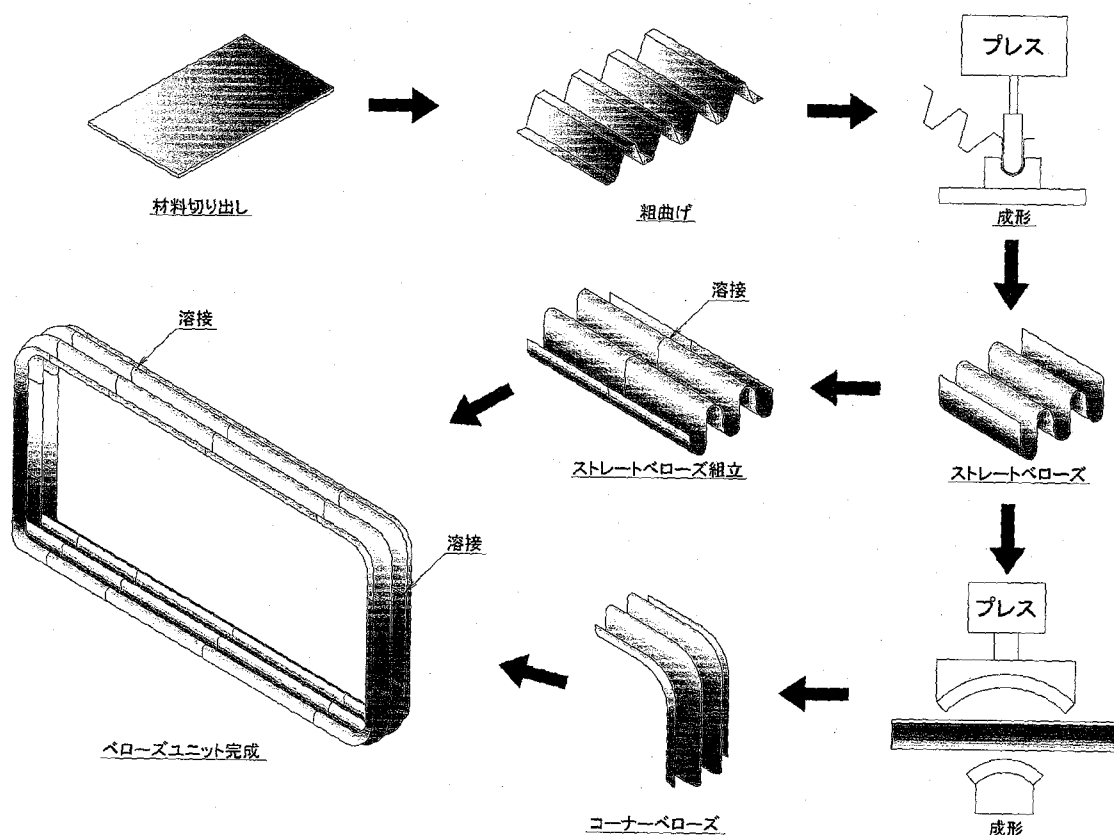


図-3 沈埋函用ペローズユニットの製作フロー

溶接部の非破壊検査は表面欠陥に対しては浸透探傷試験を、内部欠陥に対して超音波探傷試験を行う。内部欠陥に対する検査では、ブローホールなどの球状欠陥を検出し易い放射線透過試験もあるが、疲労亀裂に対して影響の大きいと考えられる面状欠陥の検出が容易な超音波探傷試験を選定した。

こうして製作したベローズを工場で図体鋼殻に組み込むことで、トンネルの耐震継手を現地施工の影響を受けることなく供用できるようにした。

3. 沈埋用ベローズ継手の特性

(1) 耐圧性

常時作用する水圧に対してはベローズの発生応力度を鋼材の許容応力度以下に抑えている。なお、外圧を受け

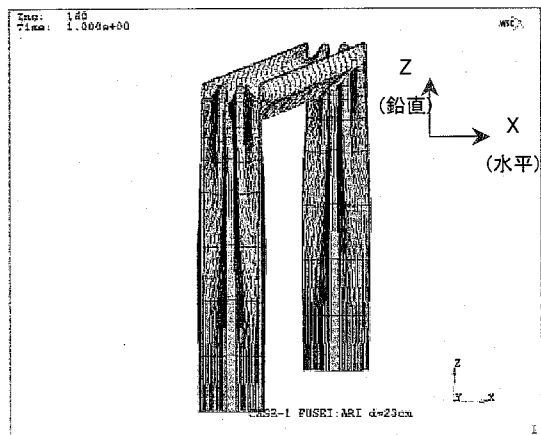


図-4 座屈解析モデル

る矩形ベローズの発生応力度はこれを定式化することが難しく、FEM 解析により数値的に検証する。

また、圧力上昇に対する塑性座屈の可能性があった。このため初期不整を与えたモデルを軸方向に変位させた状態で加圧する FEM 弾塑性大変形解析を試みた。

半周分のベローズをモデル化(図-4)し、水平方向に予め 100mm、230mm の変位を与え、板直交方向に作用する水圧を漸増载荷させた。作用水圧と鉛直変位に関する解析結果を図-5 に示す。100mm 変位载荷ケースでは、0.872MPa の時に、230mm 変位载荷ケースでは 0.627MPa の水圧の時に、鉛直方向変位が急増、つまり座屈現象が起きていることが分かる。しかし、常時圧力が 0.3MPa 程度で

あることを考えれば、座屈に対しては 2～3 倍の安全率を有していると考えられ、これに対応する異常潮位自身が現実的ではなく、座屈の懸念はないと結論できる。

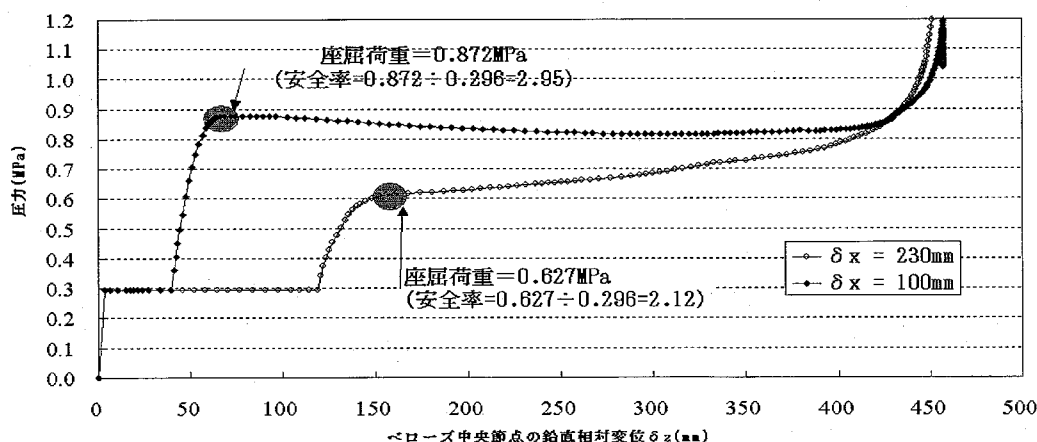


図-5 座屈解析結果

(2) 低サイクル疲労特性

沈埋函のペローズ式継手は温度変化や水位変動、地震時の変位応答による各疲労損傷に対し、Miner 則による累積疲労損傷率で照査する。この疲労損傷の殆どを占めるのは L1・L2 クラスの地震動の変位応答での伸縮によるものであり、この時ペローズの山部・谷部は子午線方向に塑性化するいわゆる低サイクル疲労を受ける。この繰返し回数は1回の地震で10 振幅未満であり、安全側に最大振幅が10 回繰返されると仮定して疲労の照査をする。

ペローズの疲労亀裂の発生を実寸大のモデルを用いた疲労試験によって確認した。実験は写真-1に示すようにコーナーペローズを用い、2000 kN 疲労試験機でレベル 2 地震動 (43mm : 那覇港沈埋トンネル 1 号継手) とその2 倍の振幅 (86mm) の、二ケースの実験を行った。下式に示す飯田の疲労曲線¹⁾に実験結果をプロットして図-6 に示す。実験値は曲線上にあり、よい適合性を示している。

$$\Delta \varepsilon_t = 2(0.415 N_c^{-0.606} + 0.00412 N_c^{-0.115}) \quad (1)$$

ここで、 $\Delta \varepsilon_t$: 全ひずみ範囲

N_c : 疲労亀裂発生寿命回数 (回)

また、溶接部を含む供試体の低サイクル疲労試験も併せて実施した。供試体は図 7 に示すように1 山の部分モデルで行った。疲労亀裂のほとんどは溶接部に発生したが、発生回数は図-6 に重ねてプロットしたように飯田の疲労曲線と大差なく、非破壊検査に合格した溶接部にも同じ疲労曲線を適用できる。

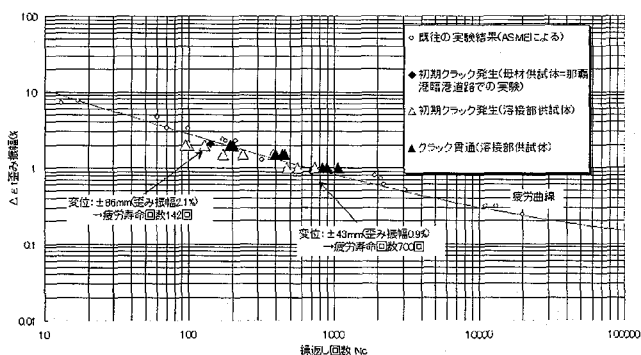


図-6 飯田の疲労曲線と試験結果

(3) 破壊靱性

大倉²⁾は繰返し塑性ひずみを受ける鋼材の破壊靱性の低下について言及している。沈埋函用ペローズの鋼材には冷間曲げ加工時の熱処理による靱性低下防止対策として、熱処理回数を指定したシャルピー吸収エネルギーの規定を付与している。更に、

①製造上 14mm 程度の厚板では靱性低下そのものが少ない

②ペローズの低サイクル疲労のひずみは曲げひずみである

などの理由から大地震後の破壊靱性の低下は大きくないと考えられるが、被災後の耐久性を検証する目的で試験を実施した。

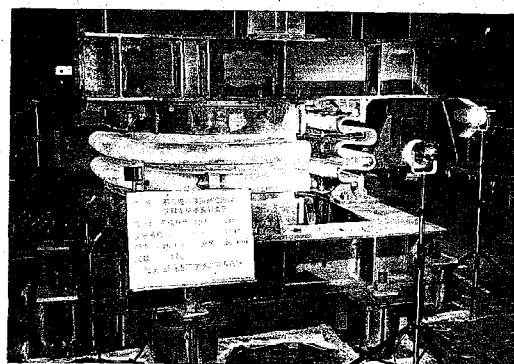
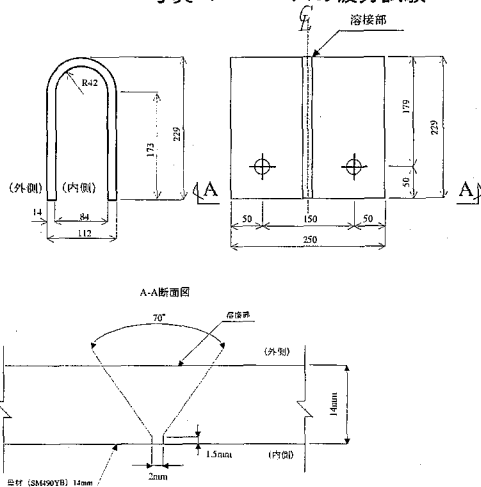


写真-1 ペローズの疲労試験



溶接部の拡大図

図-7 溶接部を含む供試体

実験はペローズに10回の繰返し塑性ひずみを与えて時効処理(250℃×1時間)を施し、母材部と溶接部から各々供試体(図-7)を切出してシャルピー衝撃試験を行なったもので、実験結果を表-1に示す。シャルピー吸収エネルギーの値は繰返し塑性ひずみを与えた後でも十分大きく、吸収エネルギーの低下も余り明確でない。沈埋管用ペローズの場合、繰返し塑性ひずみの影響は小さく、大地震被災後の耐久性にも問題は少ないと判断される。

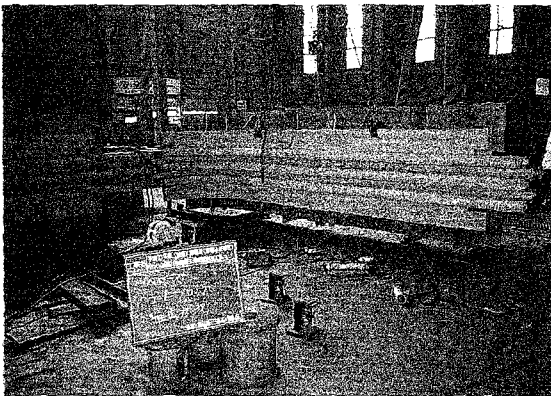
表-1 繰返し塑性ひずみ作用前後のシャルピー衝撃試験結果

付加ひずみ	シャルピー吸収エネルギー(J)			
	母材部		溶接部	
0%	150	(2)	95	(1)
+1.2%±2.0%×10サイクル	150	(6)	98	(3)
+1.8%±3.0%×10サイクル	134	(6)	73	(3)

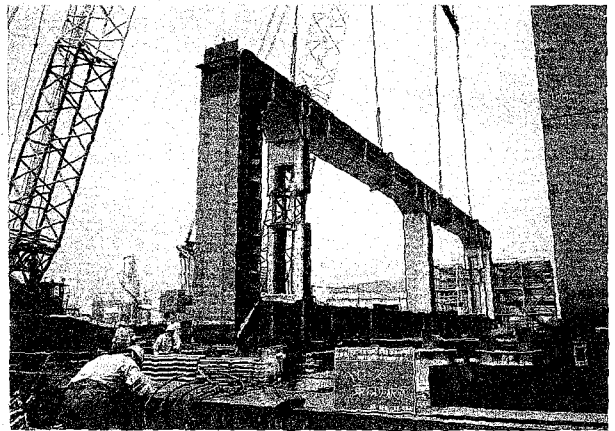
注) 値は平均値、()内はサンプル数

4. 終りに

沈埋トンネルの耐震継手の信頼性を高めるために、配管材料として実績のあるペローズ継手を沈埋管用に開発した。製作方法を確立し、設計法・耐久性については実験によって検証を行った。この沈埋管用ペローズ継手は沈埋トンネルとして初めて那覇港沈埋トンネル(写真-2)で実用化された。



(組立中のペローズ)



(ペローズブロックの搭載)

写真-2 那覇港臨港道路沈埋函のペローズ継手

謝辞

本開発に当り、大阪工業大学八幡実験場教授園田恵一郎先生、早稲田大学理工学部教授清宮理先生、ならびに大阪大学工学部助教授大倉一郎先生には特段のご助言を賜りました。ここに紙面を借り深甚の謝意を表します。

参考文献

- 1) 金澤武、飯田国廣：溶接工学大系 17 継手の強度、pp.134、産報出版
- 2) 大倉一郎、大野勝、山田靖則：繰返し塑性ひずみと鋼材の破壊靱性低下の関係、土木学会論文集No. 682/I-56、pp.279-288、2001.7