岩槻地殻活動観測装置信号ケーブル接続部水密構造 の開発

著者	高橋 博,木下 舜,山本 英二,中村 武英,松本 地弘, 倉橋 敏夫
雑誌名	国立防災科学技術センター研究速報
号	40
ページ	1-23
発行年	1979-12-24
URL	http://id.nii.ac.jp/1625/00002767/

岩槻地殻活動観測装置信号ケーブル接続部水密構造の開発

高橋 博・木下 舜・山本英二・中村武英・松本地弘^{††}・倉橋敏夫^{††}

On Water Sealing at the Coupler of Signal Cable with Sensor Vessel for Use in Deep Borehole of Iwatsuki Crustal Activities Observatory

> H. Takahashi, S. Kinoshita, and E. Yamamoto, National Research Center for Disaster Prevention and

> T. Nakamura, C. Matsumoto, and T. Kurahashi Ocean Cable Co, Led.

Abstract

At the bottom of the deep borehole of Iwatsuki observatory, which has a depth of 3510m and is filled with water, the pressure reaches 350 atm. press and the temperature reaches about 90 °C. So, it is necessary to protect the sensor from infiltration of the water particularly at the coupling portion where the signal cable penetrates through the vessel.

There are two methods to protect from infiltration of high pressure water: hermetic seal and taper mold. The former has two defects:: the rubber in use is deteriorated by immersion in high temperature and high pressure water, and conglutination of the rubber and the insulator of signal cable is practically impossible. But the latter has no defects.

The signal cable consists of armed wires made of stainless steel, and nineteen, cores. Each core consists of a conductor made of copper and an insulator made of Teflon FEP.

The taper mold consists of a mold body made of teflon EEP and a core mold made by conglutinating nineteen cores by partial melting. The upper portion of the mold body and the neck portion of the core mold were conglutinated by partial melting. Taper molds used to get cracked in use, and this defect was overcome after a series of improvements.

まえがき

首都東京は、江戸以来その直下で発生する地震により度々被害を受けているので(高橋ら, 1975),この型の地震の予知の実用化の為に、当センターは各種じょう乱の少ない関東平野 の基盤中で、その前駆現象を観測することとなった。その最初の施設として埼玉県岩槻市に

*	第2研究部	t	当時日本大洋海底電線株式会社
**	当時第2研究部	tt	日本大洋海底電線株式会社

深さ 3510 m の地殻活動観測井を作り,その井底で微小地震や地殻傾斜の 高感度観測を行うこととなった(昭和48年度観測開始).このような深層で の常時観測は,これまでに行われたことがないので,作井法を初め観測 装置,信号ケーブル及び,その捲上げ装置などそのほとんどを手さぐり で新たに開発しなければならなかった.それらの中で重要なものの一つ に観測井には防蝕剤を含んだ水が充たされているため,350気圧,約100℃ (計画時推定100℃弱,実測は86℃)の高温高圧下で信号ケーブルが観測 装置の収納耐圧容器を貫通する部分の水密を完全に確保する方法の開発 があった.この水密構造の開発は特に困難をきわめたものの一つで,幾 度も改良に改良を重ね,ようやく実用に供しうるものが得られるに至っ たので,ここにその開発・改良の経過について報告する.

1. 信号ケーブル接続部の概要

観測装置(図1)は、高感度の地震計・傾斜計などの検出器と、方位計 や温度計など検出器の井底設置状態を知る為の測器、耐圧容器固定器な ど観測装置の井底設置機器、CCL や着底検出器のような井底設置作業に 必要な機器などの補器、及びこれら地中機器のデータの伝送とその遠隔 操作、及び電源供給を行う搬送装置から成り、それらは外径 140 mm、内 径 90 mm、長さ約 9 m(当初、現在は約 10 m)のステンレス製の耐圧容器 内に収納されている. 信号ケーブルは径 1.0 mmの銀メッキ軟銅線を導体 とし、これをテフロン(FEP)で、1.0 mm被覆したものを中心に1心、内 層に 6心、外層に 12 心配置し、それらの線間に座床としてガラス繊維希、 外側にガラス繊維布(第 2 井の下総井ではテフロン・テープ、第 3 井の府中 井ではテフロン繊維布)を用い、それらの全体をステンレス線で 2 重外装 したものである(図 2 写真 1). その外径は約 26 mm、重量は空中 2.3 t/km 水中 2.0 t/km、引張破断強度は 28 t である. この信号ケーブルは、観測

速度型地震計(3成分, 倍率100万倍, 極微小・微小地震の観測), 加 速度地震計(3成分, 観測範囲:5ミリガル~30ガル, 微小・小地震の 観測, 地震動の観測), 傾斜計(直交2成分, 感度:0.02秒, 地殻傾斜 変動の観測), 温度計(2組, 感度:0.1度, 孔底の温度の測定), 方 位測定器(感度:5度, 地震計, 傾斜計の設置方位の測定), 換送装置 (多重FMまたはPCM, データの伝送, 材器の作動・検定のコントロ-ル・安定電源の供給), 信号ケーブル接続部(信号ケーブルと耐圧容器 の給合部), C.C.L. (ケーシングカラー検出装置, 昇降中の深度の測 定), 着底検出器(観測装置の着底の検出), 固定器(観測装置のケーシ ング固定), 耐圧耐熱容器(外径140mm・長さ9~10m, 各種機器計器 を収納し, 230~350気圧, 65°~86℃の井内木から水密の確保)



図1 観測装置の概要

装置と地上間の信号の送受信及び地中電 力の供給に用いるだけでなく, 観測装置 の引き上げ降下作業, 観測井の水を伝播 するノイズを取り除くための吸振ケージ の取り付けなど,各種の役割りを受持って いる. 観測装置の構成と構造、信号ケー ブルの構造が定まるに従い、この両者を 接続する方法とその構造(信号ケーブル 接続部)をどのようにするかが問題とな った. その主な課題は観測装置を信号ケ ーブルに機械的に確実に接続する方法と、 その電気的特性を損なうことなく、かつ 水密性を保って信号ケーブルを耐圧容器 内の信号線と接続する方法を開発するこ とにあった.まず,機械的接続について は, その固定が不確実であると観測装置 の引き上げ又は降下中,同装置が落下し, その使用が不能になるだけでなく、同装 置を観測井底で支えるブリッジ上端が破 壊されるなど甚大な損害を生ずる. これ は油井用検層機の実績を検討の結果、帝



図2 信号ケーブルの断面図



信号ケーブルの構造(左下より,19心FEP被覆 線,線間座床材,座床材,外装線内層,同外 層;府中観測井用)

国石油株式会社検層課の助言を得て,信号ケーブル外装線を円錐形のくさびで固定すればよ いことがわかった.すなわち,信号ケーブル接続部の最上端,信号ケーブル外装線固定部(図 3)がそれに当たる.なお,何らかの原因で耐圧容器の引上げが困難となった時,無理に信号 ケーブルを引っぱると,精度よく仕上げた非磁気ケーシングに損傷を与え,万一信号ケーブ ルが破断すると,その反動で信号ケーブルが管内に強くくい込み,観測装置は落下し,観測 井までも修復不能の重大事故となる.そこで耐圧容器の引上げ困難となった時,外装線固定 部の直下で約7tの張力で同容器を切り離し,まず,信号ケーブルを地上に回収し,その後巻 き上げ塔などの地上施設を取り除き,堀削機を据えつけ,観測井内の障害の除去作業を行ない, ついでロッド先端に耐圧容器上端部,外周にくい込む金具をつけて降し,耐圧容器を地表に 回収する方法をとることに決めた.

そのようなことを行なうために必要なこととしては、所定引っ張り強度で信号ケーブル外 装線固定部の下端が切り離れるとともに、耐圧容器内の信号線が器外に飛び出さないこと、 及び信号線接続部の水密が破壊されないことなどがある。その理由の第一は、信号線が耐圧

-3 -



図3 信号ケーブル接続部構造図

国立防災科学技術センター研究速報 第40号 1979年12月

容器を飛び出すと、その絶縁用テフロンや銅線が回収用金具を耐圧容器外周にくい込ませる 際の障害になること,それらの切削片が井内水中に浮遊し,送水や観測装置引き上げの抵抗 となるからである、その第二は、水密部が破壊されると高圧の水が観測装置内に侵入し、内 **部機器がすべて破壊されてしまうからである。以上の要求を満たすため,外装線固定部の下** 端は約7t で破断する破断ボルト4本でそれ以下と接続されており,信号線は,その直下の信号 線非常切断目板を通り、その下で結び目が作られている.この両部を耐圧容器非常切断部と 呼ぶ.その下が信号線接続部で,この部分は更に信号線水密貫通部(以下水密貫通部 と略 称 する)と,その下の信号線観測装置接続部にわかれる。この水密貫通部は信号線が耐圧容器を 貫通する所で、その貫通に際し、その電気的特性を失うことなく、観測井を充たす100℃350 気圧の高温高圧水の侵入から耐圧容器を守ることがその役割りである。貫通した信号線はそ の下の信号線観測装置接続部で耐圧容器内の電気系統と接続される。そこのものは地熱用検 層装置に用いている高温高圧用ハーメチック・シール器具に若干の改良を施したものである。 従って、万一水密貫通部から水が入った場合、ここで耐圧容器内への水の侵入を阻止するこ とが出来る、地熱(或は油井)検層の場合、高温高圧水下に入っている時間がせいぜい数時間 であるが,深層観測井の場合は数年という長年月連続使用されること,万一水密が破壊され ると耐圧容器内機器だけでなく、信号ケーブルも侵水して、使用不能となることなどから、信 信号線接続部を以上のような構造にした.

すなわち,その上部は信号線及び耐圧容器の高圧水に対する水密の確保と,信号線の電気 的性状を耐圧容器内に損なうことなく伝える部分であり,その下部は信号線と耐圧容器内電 気系統との接続端子の役割りを果たすと共に,万一の場合,耐圧容器内の水密を確保出来る ようにした。

2. 信号ケーブル水密貫通部の水密構造開発の基本構想

高圧水下で、機器壁面を電線が貫通する部分には図4に例示したようなハーメチックシー ルの用いられることが多い.この場合、水密はハーメチックシール部が受持っている.すな わち図4に見る外側のゴム状弾性体は周囲の高圧水によって強く圧迫されるため、その内側 に高圧水が侵入出来ず、導体と機器外の水とが空間的に離され.電気的に絶縁される.しか し、岩槻のような深層観測井では周囲の水温が100℃に近いと推定され(実際は86℃であっ た)、長期間使用しているとゴムが劣化して弾性を失い.水密を確保出来なくなると考えられ る.また、FEPとゴムの接続も出来ない.ところで、万一水密性が破壊されると耐圧容器内 の機器を破壊し、場合によっては信号線自体も性能を破壊される恐れがある.そこで、信号 線(以下心線と呼ぶ)の絶縁体と同じ材質(FEP)でテーパー型モールド(図5)を作り、水密を 得る基本構想を建てた.この方法は、水圧の増加と共にテーパー型モールドの外面と支持金

- 5 -



具の内面との間の圧力が必然的に増加し、遮水効果を高める方法で、ポリエチレンケーブル では既に実用経験のあるものである。その製作に当たっての、主要点は次のようである。す なわち、モールドのFEPは各心線の絶縁体FEPと完全に融着させ、また、心線間の隙間にも FEPを充塡して一体とし、漏水を完全に防ぐ、さらに、支持金具の下部にはFEPモールドが 高い水圧によって抜けることを防ぐため、フロー止めを設ける。なお、支持金具と耐圧容器 の間の水密はOリングによって行なう。

3. 水密モールドの開発経過

上記のような水密モールドがたやすく開発出来るとは当初から考えなかった.この部分は 地下の観測系の急所ともいうべき所で、この部分の失敗は計測-搬送-信号ケーブル系各部 の開発の努力を無に帰することとなるので、着手当時より真剣な努力を重ねたが、下記にみ るように実用品を得るまで約5年の歳月を要した.

以下に順を追ってその経過を述べる.

3.1 単体成形水密モールド

まず、前項の基本構想どおり全体を一度に成型することを試みたが、次のような問題点が あり、うまく行かなかった.

① モールドするFEPが心線の隙間を完全に充填せず,隙間が残り、漏水の恐れがある.

 ② 成型後,常温まで冷却する途中
 表1 水密モールドの材料の物理的性質

 で冷却直後に亀裂が発生する.
 テフロンFEP
 銅

まず、①の欠陥は成型時の材料温度 を高くすれば完全に充塡され、一体に 融着する.しかし、心線絶縁体に比較 してモールドのFEPの量が著しく多い ため、熱容量の大きいFEPが一体にな

and a second state of a	テフロンFEP	銅
線膨張系数	1.0×1.0^{-5}	17×10^{-6}
熱伝導率	0. 22	332
比熱cal/℃·g	0.28	0.0915
密度 g/cm ^{3 3}	2.15	8.96
熱容量cal/℃, cm ³	0.60	0.82

るまで高温度で成型すると、心線の絶縁体全体がとけ、導体が移動し、心線間の短路が起こ る、事実、そのような事が発生した。

次に, ②の欠陥は(表1)

- a. FEPは融点が高く,成型温度も300°~310℃と高温であるので,成型後,全体が常 温に冷えるまで水密モールド内の温度分布にかなりの不均一が生じ,かつその収縮 量も大きいため内部に残留応力が生ずる.
- b. モールドが比較的大きく、その中心部に銅線からの放熱があり、冷却速度のムラが
 生じ、モールド内に局部的に大きな熱残留歪が発生する。
 これらにより亀裂が生じたと考えられた。

以上の考察から、①②の欠陥は一回に成型する量を少なくすることにより解決で きると思われた.

3.2 E型水密モールド

図 6.1 に示すような構造で、モールド各部の成型量が少なく、残留歪の小さいものを試 作した.この構造のものは心線 19心をまとめて一体化した 19心モールドと、テーパーモ ールドを別々に成型し(写真 2)、これを組合せて一部融着し、心線の隙間にはエポキシ樹 脂を充塡した.この型はエポキシ充塡をしたので、E型と呼ぶ.このE型水密モールドは





図6.1 E型水密モールド構造断面図

写真2 A テーパーモールド

製造直後の試験では 90 ℃, 360 kg/cm の高温高圧に耐え,又 90 ℃, 360 kg/cm と常温常圧の 間の環境変化の試験(以下, 高温高圧サイクル試験と呼ぶ.図 6.2)にも耐えたが,製作後

写真2

B 19心モールド



(c) (c) 図6.2 E型水密モールド高温高圧サイクル試験条件

- 8 -

岩槻地殻活動観測装置信号ケーブル接続部水密構造の開発――高橋他



図6.3 E型水密モールド亀裂発生状況



写真3 E型水密モールドとその亀裂





- 9 --

ているブチルゴムテープを用いたが、これは耐熱性に劣るので、その上を耐熱性に優れてい る自己融着シリコンゴムテープでおおった.これを数箇試作し、E型水密モールドの場合と 同様の高温高圧サイクル試験を実施したが、亀裂の発生や心線間の絶縁低下は起らなかった. このT型水密モールドは昭和48年3月の観測装置の井底設置の際に組込み、同年11月の同 装置の保守・点検の為の引き揚げ時まで観測井底で使用されたが、この間、機能上の障害を 起こすことはなかった.しかし、引ぎ揚げに際し深度500mで一夜経過した後、心線間に絶 縁不良の生じていることが発見された.引き揚げ後、解体検査を行なったところ、図7.2に みるように輪切状の亀裂が観察された.その原因としては19心モールドは300℃以上の温度 で成型されるが、冷却する際その長手方向に申差しになっている19本の銅線の方がFEPに比 べ熱収縮量が約1/10である(表1)のためFEPが十分収縮できず、引張歪が生じ、それが解消 されないため使用中に亀裂が入ったのか、あるいは引き上げ時の圧力と温度の変化が刺激と なって亀裂を生じたのかの何れかと思われる.なお、亀裂箇所に水の入っていないことから、 心線間の絶縁低下をもたらした原因は引き揚げによる温度降下のため、亀裂部に微量の水適 が凝結したことによると判断された.

3.4 W型水密モールド

T型水密モールドの開発と平行してE型水密モールドの亀裂発生を防ぐより有効な方法 の研究を行ない,新しいW型水密モールドを開発した。19心モールドに亀裂の発生する原 因の大きなものに銅線の存在がある、心線の銅線の経が1mmであり,FEPの厚さも1mmで あるので19心モールドの横断面における銅線対FEPの占有面積比は1:8で,銅線の占め る比率は小さくなく,かつ断面内に均等に分布している。従って19心モールド成型時に高



図8 W型水密モールド構造断面図

岩槻地殻活動観測装置信号ケーブル接続部水密構造の開発 ---- 高橋他

温か冷却する際、熱膨脹係数の大きいFEPは銅線を強くしめつけながら、より大きく縮む のでFEP内には大きな引張歪が残る。更にFEPは熱を著しく伝えにくいのに比べ銅線はそ の1,000倍も熱伝導率が大きいため(表1)銅線近傍に冷却速度の局部的なムラが生じ、そ れも残留歪を増加させると考えられる。これらの点を改善する方策として銅線とFEP被覆 の間にPTFE(四フッ化エチレン重合体)の層を設けると亀裂発生が非常に少なくなることが わかった。これは、PTFEも融点は高いが、FEPと融着せず、かつその表面が滑りやすい



写真4 PTFE・FEP二重被覆 心線(左より銀メッキ 銅線,PTFE被覆,FEP 被覆,二重被覆心線)

ため、冷却時のFEPの収縮が自由に行なわれ、残留歪が減少する為と考えられる。また. PTFE で熱絶縁されるので、銅線からの放熱による局部的な冷却ムラによる残留歪の増加 も少なくなる。この方式は亀裂の発生が起こりにくくなることに加えて、万一FEPに亀裂 を生じても、融着していないため、亀裂はPTFE 層に達せず、PTFE 層で導体の絶縁が保 たれる利点がある。このような発想のもとに作られたのがW型水密モールド(図8)である.

3.4.1 W型水密モールドの試作 いいいいい いいいいい いんしょう ないがく しょう

₩型水密モールドについて二重被覆心線(写真4)の寸法を変えた2種類,すなわち,₩ -1型とW-2型を試作し,これらについて主として残留歪による亀裂発生の促進試験を 下記のように行なった.なお,水密モールド部にこのような構造の線を用いても信号ケー ブルの電気特性に影響を与えないことは最初に確かめてある。

3.947	型名	* 導体径	PTFE 肉厚	FEP肉厚	6.65
	W-1型	0. 8 mm ø	0. 25 mm	0.6 mm	92
	W-2型	0.5mm ø	0.15 mm	0. 15 mm	5.3

* 銀メッキ軟鋼線

イ. 常圧ヒートサイクル試験

常圧下で図 9.1 に示すような条件のヒートサイクルを連続10回行なった. 試験の結果はW-1型, W-2型とも異常はなかった.

ロ. 高温高圧サイクル試験

前項のヒートサイクル試験を行なった後に、図9.2に示すような装置により図9.3

-11-





図 9.2 水密モールド高温高圧試験装置 内径:150 mm ゆ,内部深さ:1500 mm, 最高温度:110℃,最高圧 力:400 kg/cm²(加温時),1000 kg/cm²(常温)

₩ 型モールド

図 9.4 W型水密モールド用心線PTFE-FEP層境界面よりの漏水試験法及び心線端末処理 に示すような条件の高温・高圧サイクル試験を連続2回行なった、その結果、W-1 型では19心モールドに亀裂の発生がみられたが(ただし絶縁抵抗は良好),W-2型で は異常はなかった。

ハ、急冷サイクル試験

次に,資料を液体窒素(-196℃)中に投入し,0.5時間後取り出し,常温に1時間放 置する急冷サイクル(1サイクル:1.5時間)を連続3回行なった。試験結果はW-1 型,W-2型とも異常はなかった。

ニ.急冷サイクル試験後の高温高圧サイクル試験

急冷サイクル試験を行なった後、図9.3に示す条件の高温高圧サイクル試験を連続 2サイクル行なった、試験結果はW-1型・W-2型ともに異常はなかった。

ホ. PTFE-FEP境界面よりの漏水試験

W型水密モールドの心線には、PTFE とFEPの間に融着していない面が存在する。 万一、心線被覆(外層)に外傷を受けた場合、この境界面を伝わって水が浸入するか否 かを調べる目的で、図 9.4 に示したような方法で常温下で 400 kg/edの水圧を 24 時間 加えて漏水の有無を調べた、試験結果はW-1型、W-2型ともに異常はなかった。 3. 4. 2 W-2型水密モールドの使用実積

前項の試験結果からW-2型の方に亀裂発生がなく、他の試験結果も良好であったので、 この型を採用することにした.昭和48年11月からの観測装置保守工事の際にT型モールド をW-2型水密モールドに取り換え、融着面付近をT型と同様にブチルゴムとシリコンゴ ムの自己融着テープにより各1/2ラップ1層巻きを行なった.この型は昭和48年12月か ら昭和50年1月までと昭和50年3月から昭和50年12月までの2期にわたって使用された. この使用期間中及び引き揚げ作業中とも漏水・絶縁不良は発生しなかった.しかし、引き 揚げた後に解体調査したところ、テーパーモールドの首の所にいずれかの場合も亀裂の発



5 年1月31日販影, 電袋はアーハー・モールト内 とどまっている)

図 10.1 W-2型水密モールドの亀裂発生 状況(昭和 50 年 1 月観察)

生していることがわかった、以下にその使用後の状況を述べる。

イ. 自己融着テープの劣化

昭和50年1月に引き揚げた時,水密モールド首部のシリコン・ゴムテープはすっか り老化し,接着力を失ない,バラバラにはがれる状態になっており,ブチルゴムテー プの表面は湿っていた。そのブチルゴムテープも弾性を失ない,さらに接着により接 着面が識別出来ないように一体化するはずの自己融着テープが接着面から剝れる状態 になっていた.しかし,水密性は保ち,ブチルゴムテープ内面に湿気は認められなか



った.

昭和50年12月に引き揚げた 時はシリコン・ゴムテープは 老化していたが, プチルゴム テープとは良く密着しており, 弾性があり,融着面で剝れる ような事はなかった.

ウ. 水密モールドの亀裂
 昭和50年1月に引き揚げた
 際、テーパーモールドの19心
 モールドとの融着箇所の下側
 に間隙約1.5mmの亀裂が入っ
 ており(図10.1),その亀裂は
 古そうにみえた X線撮影し
 たところ19心モールドには異常がなかった(写真5).この
 場合、老化はしていたが、自

己融着テープが水密性を保持していたことと, 亀 裂が19心モールドに及ばなかったため, 電気的機 能は損なわれずに済んだ.

昭和51年12月に引き揚げた際には,図10.2に示 したようにテーパーモールド首部の全周にわたっ て環状の亀裂が観察され、0.1~0.5 mm位の間隙 を生じていた.浸透探傷剤レッド・チェック液を 滴下し,モールドを縦割りにして調査したところ, 亀裂は19心モールドの境界面にまで達していた. しかし,電気的機能は前回同様損なわれることは なかった.ただし,これらは好ましい現象ではな く,19心モールド部の絶縁が確保されていても, このまま数年にわたって使用した場合,自己融着 テープの劣化が進行し,高圧水が浸入するとフロ ー止め目板を通って信号線観測装置接続部に浸水 の生ずる恐れがあるので,その原因を調べ,その 改善策を検討した.











写真6 W-2型水密モールド・フロ ー止め金具附近における心線 の変形(テーパー・モールド 下部とエポキシ樹脂を取り除 いて、コアーを見やすくした. 昭和50年12月撮影).

ハ.フロー止め金具箇所の絶縁不良

昭和50年1月末,W-2型水密モールドの新品と交換し、観測井底での地震観測に 使用し、同年3月、観測井底沈澱物の採取作業を3回行なった後、モールドと支持金 具上端のしめつけ金具との間のゆるみをしめつけ、絶縁測定をしたところ、信号線と モールド支持金具との間に絶縁不良(0.5 Mg)が発見され、予備の水密モールドと直 ちに交換し、観測装置の井底設置を行なった。絶縁不良発生の原因は上述したような 経過からみてモールドの亀裂でないと判断し、障害箇所をフロー止め金具箇所と推定 した.解体調査したところ、図11,1に示したようにFEPテーパーモールドと、フロー 止め金具の間で信号線が折れ曲り、フロー止め金具の孔の所で導体が絶縁体を破って いることがわかった。隣接の心線にも同様の屈曲現象がみられた。この調査から、同 様の現象が交換した水密モールドにも起り得るはずであり、昭和50年12月に観測装置 を保守点検の為引き上げた時、解体調査をしたところ、図11.2に示すようにフロー止 め金具の所で心線に少し曲ったものが幾つか認められたが、圧潰までには至ってなか った(写真 6).

ニ、その他

この他発生した水密モールドに関係した障害として,昭和48年11月からの観測装置 保守・点検中も微小地震観測のみを継続するため,地震観測装置を降下中,心線1本 に絶縁不良が発生した.地震観測に支障がなく,考察した結果,水密モールドではな いと判断し,地震観測を実施した.昭和49年2月に整備をおえた観測装置と交換のた め地震観測装置を引き上げた際,調査したところ,W-2型水密モールドを取り付け た後,耐圧容器内での組立中に心線の被覆に損傷を与えた為であることが明らかとな った.これ以後は同じ事故の発生しないよう,組立ての際に注意が払われるようにな った.

3.4.3 水密モールド首部の亀裂の原因とその防止策

テーパー・モールドは高圧水下におかれると構造上支持金具内に喰い込むため、その上 端の押え金具との間にゆるみを生ずるので、降下引き揚げを行なう度に押え金具のしめつ けを行なう。その実態を表2に示す。このような増しじめを繰返すとモールド首部に引張 り性歪が蓄積し、もっとも弱いモールド首部に亀裂を与える可能性がある。そこで次のよ うな調査を行なった。

観測	井		岩		槻	下	総
取付年	月	S. 48. 12	S. 50. 1	S. 50. 3	S. 51. 2	S. 52. 2	S. 53. 2
<u>型</u>		W-2	W-2	W-2	W- 3	改 W-3	改 W-3
締めつけ状 実 施 年 回 転 角 周	祝 月 *	S. 49. 2 約20° 井底地震観 測後	S. 50. 3 約90° 井底地震観 測及び井底 の採沱3回後	S. 50. 3 約20° 1500m試験 降下後	S. 51. 3 11/2回転 1.8mm 1500m試験 降下後	S. 52. 2 1 1/4回転 15 mm 1500m試験 降下後	S.53.2.10 0° 0 mm 第1次井底 昇降後
締めつけ長 実 施 時	:* 期	S. 49. 2 約20 [°] 1500m試験 降下後		S. 51. 1 約60° 0.2㎜ 井底観測後		S. 52. 10 160° 1 mm 井底観測後	S.53.2.12 180° 0.6mm 第2次井底 昇降後
		S. 49. 3 約20° 井底降下後				S. 53. 10 0° 0 mm 井底観測後	S.53.2.12 0° 0 mm S 波測定後
* 締めつけ用ボルトの回転角度及び締めつけ深度					S. 54. 2		

表2 水密モールドおさえ金具の締めつけ実績

イ. 増し締めの亀裂発生に対する影響調査 W-2型水密モールドを9個作り、下に示 示す①,②.③の状態で各3個ずつにつき 常圧ヒートサイクル試験を行なった、これ は大気圧下で、95℃オーブン中で48時間加 熱,その後,室温で24時間放置を1サイクル ルとする試験で、次のような結果を得た.

	試料の状態	ヒート・サイクル後の結果
D	金具に装着せず	3個共 10 サイクル後異常 なし
2	金具に装着し増し締 めなし	3個共 10 サイクル後異常 なし
3	金具装置し7サイク ル毎に増し締め	3個共 22 サイクル後異常 なし
		3サイクル後 首部に 亀裂 発生



図12 A 水密モールド首部の押え金具補助 パッキング

() mm 井底観測後



水密モールドが観測井底で熱膨張 図 12 В 小器モールドが脱消弁線であから した場合の状態図(補助パッキン グは熟膨張した水密モールドで上 に押し上げられ、横にふくらむ) 以上の結果から亀裂発生には、増し締めが大きく影響していると考えた.

ロ 増し締めによる亀裂発生の機構

増し締めの影響について細部にわたる検討の結果、観測井で使用後テーパー・モー ルドの首の部分に亀裂発生が見られる原因は、次のようであると推定した.水密モー ルドは金具中に密閉されているため髙温になって熱膨張すると、他に逃げ場所がなく、 金具のふたの孔からテーパー・モールドの首の部分と19心モールドが共に押し出され てくる.次に冷却されてモールドが収縮しても19心モールドの中に銅線がはいってい るため、これに支えられて完全には元の状態に戻れない.従って19心モールドに融着 されているテーパー・モールドの首の部分も収縮できず、引っ張り応力が発生する. この状態で増し締めを行なって再び密閉状態にした後加熱すると、更に、19心モール ドとテーパー・モールドの首の部分も収縮できず、引っ張り応力が発生する. この状態で増し締めを行なって再び密閉状態にした後加熱すると、更に、19心モール ドとテーパー・モールドの首の部分が押し出されてくる.これを繰返すと、テーパー モールドの首の部分の引っ張り応力は累加して行く.一方、テーパー・モールドの首 のつけ根の部分は、FEPの融点以下の温度で無理に孔から押し出し加工されたと同じ 状態となるので、細かい傷が表面に発生する、このように表面に細かい傷が存在する 状態で引っ張り応力が生じると傷の部分に応力集中が起り、遂に亀裂に至る、即ち、 増し締めで金具のふたの孔隙以外に逃げ場所を無くして再加熱を繰返すことが、亀裂 発生の主な原因である.

ハ. 亀裂発生防止策

上記のような原因により、亀裂が発生すると考え、その防止策としてテーパー・モ ールドと押え金具の間にゴム製の補助パッキングを設けた(図12A)、この補助パッキ ングを入れる目的は、次の通りである。

① 温度が高くなってモールドが膨張したとき、モールドは柔らかいゴムで押えられているので、全体に上方に膨張し、特別に首の部分や19心モールドだけが押出されることはない、従って、テーパー・モールドの首に発生する引っ張り応力ははるかに少なくなり、首のつけ根が無理に押出しを受けて表面に傷の発生することもなくなる、全体に膨張した分は補助パ

ッキングが図 12・Bのように変形 することにより逃げることになる.

② 多少、押え金具の締めつけが緩くなっても、補助パッキングで水密を保ち、水漏れの心配が無い(高圧下では、テーパー部が上からの水圧で押えつけられて水密を受け持つので、補助パッキングは上



図 13 テーパーモールド下端フロー止め部の改良 した構造

-17-

国立防災科学技術センター研究速報 第40号 1979 年12月

に乗っているだけになり、高圧で水密性が破壊されることはない).

(3) 付随効果として温度が下がってモールドが収縮するとき、ゴムの弾性で元にもどり、増し締めを全然行なわなくてもよい可能性がある。

なお,補助パッキングのゴムの材質には,耐熱性・耐水性の優れたパーオキサイ ド加硫のエチレンープロピレンゴム(EPゴム)を用いることにした.

4.4. フロー止め金具上面における心線圧潰原因とその防止策

すでに述べたようにテーパー・モールド下端,フロー止め金具の上面で昭和50年1月, 心線が圧潰し,交換したものにも圧潰までは達しない変形が生じた.

イ 心線圧潰の再現実験

心線圧潰の原因を調べるため、次の様な再現実験を行なった。

- ① 高温・高圧試験をしたW-2型水密モールドの古いサンプル10個を解体して詳細 に調べたところ、いずれも多少、心線が内側に寄せられて、フロー止め金具とエポ キシ樹脂の境界面で、圧着に至らない程度の変形が見られた。
- ② 新しくW-2型水密モールドを2個作り、その際、エポキシ注入時にフロー止め 金具に剝離剤をつけ、フロー止め金具とエポキシ樹脂が接着しないようにした. フロー止め金具をはずして心線に変形の無いことを確かめた後、フロー止め金具に 組み込み95℃ 360 kg/cmの高温高圧サイクル試験を3サイクル行なった後,解体して 心線の変形を調べた所、何れも心線が内側に寄せられており、フロー止め金具とエ ポキシ樹脂の境界面で心線に段がついていた。
- ロ. 心線圧潰の発生機構

上記の再現実験の結果,次のような原因が考えられた.すなわち,水密モールド上 面から高圧が加わると、テーパー面では周囲から中心に向う半径方向の分力が働き、 テーパー・モールドは周囲から締めつけられた状態になる.エポキシ樹脂は90℃位の 高温になると多少軟らかくなるため、締めつけ力が働くと僅かであるが変形しようと する.そのため、中に入っている心線もこれに伴って中心方向に移動しようとする. 一方、フロー止め金具は金属製で硬く、変形しないため、エポキシ樹脂とフロー止め 金具(目板)の境界面では心線に剪断力が働く.多くの場合はFEPの強度でこの剪断力 に耐え、多少FEPが変形する程度で障害は発生していないが、エポキシ樹脂の変形が 大きく起りやすい条件、例えば背面に気泡があったり、テーパー・モールドに多少の 不均整があると、心線の移動量が大きくなり、さらに心線と目板が正確に一致してい ないなどの条件が加わると、FEPの強度では耐えきれなくなって心線に圧潰が発生する.

ハ. 心線圧潰防止策

対策として、テーパー・モールド下部を図13のように変えた、このようにすると、

エポキシ樹脂の下端は並行円筒なので、内側に締めつける力が働かず、フロー止め目 板との境界面に剪断力が発生しない;テーパー部と平行円筒部はエポキシ樹脂が一体 であるので力は分散し、心線に無理な力が加わらない;円筒部の心線をフロー止め金 具の目板の位置に正確に、かつ垂直に入るように作ることが出来る;さらにエポキシ 樹脂硬化成形後、内側に気泡・異物等の欠陥がないかを目視でチェックできる、など 原因の除去や製品の検査の点で改善される。

3.5 W-3型水密モールド

3.5.1 W-3型水密モールドの試作

前項に述べた問題点に関する防止法を取り入れて新しく設計試作したW-3型水密モ ールドを図14に示す.なお、W-3型では前記改良点の外にフロー止め目板の外形も変 更した.これはW-2型までに用いたフロー止め目板は、上から押す力には約4~5 ton にしか耐えられないことが実験によりわかり、高圧下の使用に多少不安があったので、 図14の形に変更してその不安を取り除いた.実験の結果、このフロー止め目板は上から の力で約20 tonでも破壊しなかった。水密モールド支持金具はこれらに合うように改設計 された.試作したW-3型水密モールドの試験結果は次のようである.

W 2型モールド

WS型モールト



図 14 W-3型水密モールド(左)とW-2型水密モールド(右)との比較(改良箇所斜線部,単位mm)

イ 常圧ヒートサイクル試験

 W-3型水密モールドを2個試作し、支持金具に装着した状態で、常圧下で95℃48
 時間、室温24時間を7サイクルとするとヒートサイクル試験を20サイクル行なったが、 亀裂の発生、その他の異常は2個とも見られなかった。なお、この試験で増し締めを
 全然行なわないと補助パッキングの永久歪の分だけ押え金具のネジがゆるむので、1
 サイクル毎にそのゆるみ分だけ増し締めを行なった。

ロ、高温高圧サイクル試験

前項の常圧ヒートサイクル試験を10サイクル行なった後、図9.3に示した高温高圧 サイクル試験を3サイクル行なったが、異常はなかった。

ハ、増し締めしない状態での水密試験

W-3型水密モールドを支持金具に装着し、増し締めをしないで常圧ヒートサイク ル試験を3サイクル行ない、押え金具の締めつけがゆるんだ状態で水圧試験を行ない、 漏水の有無を調べた、結果は次の通りであった。

水圧試験の条件	24時間後の漏水
常温 400 kg/cm	漏水なし
90 °C 400 kg/cnỉ	漏水なし

以上の実験結果から前に述べた補助パッキングの使用の目的の中, 3.4.3 ハ①, ② については良い結果が得られ, W-2型水密モールドの当面の問題点の克服は一応達 成された.この実験結果から、振動の無い状態では増し締めを行なわなくてもよいと も考えられるが,実際上は引き揚げ時や引き揚げ後の取り扱い中の振動で,ネジのゆ るみが増加するので,効果的なネジのゆるみ止めが無い限り,増し締めは必要と考え られる.

3.5.2 W-3型水密モールド使用実績

前項の試験結果から、W-3型水密モールドはW-2型の欠点を取り除けたと判断し、 昭和51年2月の観測装置の保守・点検工事の際に、この型に交換した.このW-3型水 密モールドは昭和51年10月の観測装置の保守・点検工事で引き揚げた際に、その効果を 実際の使用実績により確認するため、これを取りはずし、次に述べる改良W-3型水密 モールドと交換した.8カ月使用後この水密モールドの解体調査を行なったが、亀裂の 発生・心線の変形・圧潰、その他の異常はまったく見られず改良目的が達成できたこと が確認された(写真7).EPラバー製の補助パッキングも製作当初に比較して殆んど硬さ



写真7 W-3型水密モールドと補助パッキング(左)の使用(昭和51年2月~10月)後の状態(まったく異常がない).

の変化はなく、劣化は認められなかった.

3.5.3 改W-3型水密モールド

W-3型水密モールドはEPラバー製補助パッキングの上部をブチルゴム自己融着テー







プで保護してある、長年月,高温・高圧下で使用した場合,自己融着テープはすでに述べた ように劣化すると考えなければならないので,昭和52年2月に,この部分をEPラバー製の補 助パッキングで覆うことにした(図15).これにより19心モールドに万一,亀裂が発生して も、この補助パッキングで水の浸入は完全に防止出来るものと考える、この型を改W-3型 水密モールドと名付ける。

以上の試験と実績から、昭和52年9~11月に補修を終えた観測装置と微小地震観測装置を 交換した際、押え金具の増し締めを行なっただけで、水密モールドの交換は行なわなかった。 更に、下総観測井(深度2,300 m)の観測装置にも改W-3型モールドを用いた。その設置工 事に際して、信号ケーブルの捲き揚げ装置へのまきとり(観測井内に信号ケーブルを降下し て行なう)、観測井通り試験・S 波速度の測定等を行ない、 観測井内を幾度も揚降したが、水 密モールドによる障害はまったくなく、押え金具の増し締めも、終りの頃にはほとんど不用 なほど安定に装着されていた。

4. 終りに

信号線水密貫通部をテーパー型水密モールドで製作することを決意し、その開発に着手し たのは昭和46年春の観測井作井の最中であった。テフロンは耐熱性・耐化学性には優れた性 質を示すが、加工上取り扱いの容易な物質とはいい難い。そのため、万一水密破壊の場合の 防護策を講じながら、その完成の為に間題点を一つ一つ取り除いていく苦しい5年間を過ご さねばならなかった。

ここに一応,実用品といえるものの開発を終えたが,今後も製造中の歩留まりの向上や, 数年にわたる観測に対する信頼性の確保のためには熱応力歪の大きいものの選別方法などの 研究を必要とする.

なお,当研究の経験と成果を深海底観測,その他の高圧下または常温からはずれた環境下 での信号線水密貫通部の開発などに役立てたい.

最後に本開発が完成域までに達し得たのは、日本大洋海底電線株式会社の会社をあげての 腰をすえた後援と協力があったからであり、各級の社員各位に深い感謝の意を表します。ま た、本開発の目的を理解し、常に協力を惜しまず本開発の達成を温かく見守って頂いた当セ ンター前所長 菅原正巳氏、同じく第2研究部、帝国石油株式会社、株式会社 明石製作所、 東京芝浦電気株式会社の深層観測開係の各位に心より感謝致します。

参考文献

- (1) 高橋 博・村瀬敏男・宮本滝男・倉橋敏夫(1974):深層地震観測用信号ケーブルと地震
 計筐体との水密接続.昭和49年度電子通信学会全国大会予稿集,№ 2178.
- (2) 村瀬敏男・宮本滝男・藪崎正男(1973):深層地震観測用信号ケーブル及び地震計筐体 との水密接続用モールドの開発、日本大洋海底電線(株)研究開発室設立5周年記念研究 開発報告集, P.83.
- (3) 高橋 博(1973):深層観測井による地震予知観測.土と基礎, № 184, 27-31.
- (4) 高橋 博・高橋末雄(1975~76):東京の地震予知の研究(11-(4)).防災科学技術, Na, 28, 2-5, Na 29, 2-7, Na 30, 7-11, Na 32, 17-22
- (5) Takahashi, H and Hamada, K.(1975): Deep Borehole Observation of the Earth's Crust Activities Around Tokyo- Introduction of the Iwatsuki Observatory. Pure and Applied Geophysics, vol. 113, 311-320.
- (6) 高橋末雄(1976):岩槻深層観測井データ搬送装置とその信頼性.国立防災科学技術セン ター研究報告, Na13, 35-57.

(1979年11月14日 原稿受理)