

深部ボーリング孔などを利用した初期応力測定の問題点と その原因の検討および改良について

松本滋夫*・石井 紘**・山内常生***

Problems of Initial Stress Measurements by Overcoring in Deep Boreholes and It's Improvements —Case Study—

Shigeo MATSUMOTO*, Hiroshi ISHII** and Tsuneo YAMAUCHI***

Abstract

We have developed a wireless intelligent type strainmeter for the measurement of in-situ stress. The instrument for the measurement comprises SRAM, RTC, an A/D converter, MPX, a microprocessor, and batteries in addition to a strainmeter sensor. We can install it in as 500 m deep as boreholes and can easily remove by overcoring. The stress measurements by overcoring in deep boreholes are a newly developed method and we encountered some difficulties. However, we could solve these problems. In this paper we describes these difficulties and how we solved them.

Key words : Wireless Strainmeter, Initial Stress Measurement, Overcoring

はじめに

地震予知研究においては地震発生領域に加わっている応力の絶対値を知ることは重要である。応力の絶対値を測定した場所で歪の連続観測を継続すれば、地震発生に関するより有効な情報が得られる。このことを考慮して東京大学地震研究所では名古屋大学と共同で、地下深部において岩盤を破壊することなく初期応力の測定ができる、ケーブルのないインテリジェント回収型歪計の開発(山内ほか, 1998)を継続している。新しい初期応力測定法はボーリング孔の孔底に本装置を埋設・設置し、埋設した孔径より大きい孔径で、本装置をまわりの岩盤とともにオーバーコアリングすることによって岩盤の応力を開放させ(松本ほ

か, 2000a, 2000b), その時に生じる開放された歪を計測する。その後、応力開放の前後の歪変化を逆解析することで地下深部の初期応力が高精度で求められる方法である(石井ほか 2000)。現在まで測定装置は1号機から5号機(4号機は製作していない)まで開発(山内ほか, 2000)し基礎実験を重ねている。深いボアホールにおけるこのような測定は世界で初めてである。これまで、地下深部や坑内(鉱山内)のボーリング孔など19ヶ所において初期応力の測定実験を行ってきた(表1)。これらはすべて成功したわけではなく、いくつかの失敗があった。これらの失敗から得た経験も生かしながら測定装置・測定装置埋設方法・測定装置の回収方法・感度の検定方法等を改良し、成功に結び付けてきた。ボーリング孔の掘削やインテリジェント回収型歪計の埋設・設置からオーバーコアリングによる回収に至るまでの過程で、どのような問題点があったか、その原因は何か、またどのように対処し改良してきたか検討して順次報告する。

1. 釜石坑内での浅層ボーリング孔の事例

岩手県の釜石鉱山入口から約2 km 入った地点において、初期応力測定実験を2ヶ所のボーリング孔で行った。

2001年8月31日受付, 2001年10月26日受理.

* 東京大学地震研究所技術開発室,

** 東濃地震科学研究所,

*** 名古屋大学大学院理学研究科地震火山観測研究センター.

* Laboratory for Technical Service and Development, Earthquake Research Institute, University of Tokyo,

** Tono Research Institute of Earthquake Science,

*** Research Center for Seismology and Volcanology, Graduate School of Science, Nagoya University.

表 1. 初期応力測定の実験場所と孔深度の一覧

測定場所	孔深度	使用機種 データサンプリング	埋設日～ オーバーコア日	測定の判定	回収コア 判定
1 和歌山県 新宮市	180.0m	1号機 1分サンプリング	1997/ 9/28～10/5	△	△
2 岐阜県 土岐市(東濃)	166.0m	1号機 1分サンプリング	1997/11/28～12/6	○	○
3 岩手県 釜石鉱山内 (鉱山入口から約2km奥)	鉛直孔 6.2m	1号機 1分サンプリング	1998/ 1/20～ 1/28	× 回収9時間前に 電池切れ	○
4 岩手県 釜石鉱山内 (鉱山入口から約2km奥)	45度斜孔 9.0m	1号機 1分サンプリング	1998/ 2/20～ 3/14	× コアビットすり切れ のため掘削できず メモリーオーバー	○
5 岐阜県 瑞浪 東濃地震科学研究所	350.0m	1号機 1分サンプリング	1998/ 4/18～ 4/24	○	○
6 和歌山県 新宮市	503.2m	1号機 1分サンプリング	1998/10/17～10/24	× モルタルと岩盤の カップリング不良	△
7 岐阜県 福岡町	404.0m	2号機 1分サンプリング	1998/11/27～12/4～7	× 掘削途中から 無水掘削のため 装置内部破損	×
8 岐阜県 福岡町	404.0m	2号機 1分サンプリング	1999/ 2/ 9～ 2/16	○ コンクリートの オーバーコア	○
9 岐阜県 土岐市 東濃鉱山敷地内	156.0m	2号機 1分サンプリング	1999/ 7/27～ 8/ 4	× 余剰モルタル 排出深度の違い	×
10 岐阜県 土岐市 東濃鉱山敷地内	156.0m	2号機 1分サンプリング	1999/ 8/11～ 8/19	× コア取り出し時の 衝撃による 装置破損	○
11 和歌山県 新宮市	509.1m	1号機 1分サンプリング	2000/ 1/13～ 1/20	○	◎ 同芯円
12 岐阜県 茂住鉱山内 (鉱山入口から約2.2km奥)	45度斜孔 11.6m	1号機 1分サンプリング	2000/ 2/ 3～ 2/12	× ケーシングによる センタリング出しの 孔曲がり	×
13 和歌山県 新宮市	511.0m	2号機 10分サンプリング	2000/ 2/8～ 3/19	△ 埋設深度に僅かな 違いがあった	◎ 同芯円
14 岐阜県 瑞浪 東濃地震科学研究所	167.2m	2号機ダミー	2000/ 2/26～ 3/ 3	2号機ダミーの 小口径オーバーコアテスト	○
15 岐阜県 阿寺(上野)	406.0m	3号機 1分サンプリング	2000/ 3/26～ 4/ 1	△ コア中心から 装置が10mmのずれ	△
16 岐阜県 茂住鉱山内 NO.1孔 (鉱山入口から約2.2km奥)	11.75m	1号機 1分サンプリング	2000/ 9/29～10/ 7	× 埋設直後の至近距離 での加圧孔掘削による 湧水発生	○
17 岐阜県 茂住鉱山内 NO.2孔 (鉱山入口から約2.5km奥)	11.75m	1号機 1分サンプリング	2000/ 10/ 8～10/16	○	○
18 岐阜県 阿寺(萩原)	310.0m	5号機 1分10分切替	2000/ 12/27 ～2001/ 1/10	○	○
19 和歌山県 新宮市	521.9m	3号機 1分10分切替	2001/ 2/ 1～ 2/ 9	○	○

×:失敗 △:やや良 ○:良好

測定場所	測定回数	ボーリング孔の深度	
岩手県 釜石鉱山内	2回	鉛直孔 6.2m,	45度斜孔 9.0m
和歌山県 新宮市	5回	同じボーリング孔	深度:180.0m, 503.2m, 509.1m, 511.0m, 521.9m
岐阜県 土岐市	3回	166.0m,	156.0m 2回
瑞浪	2回	350.0m,	167.2m (2号機ダミーテスト)
茂住鉱山内	3回	45度斜孔 11.6m,	鉛直孔 11.75m を 2ヶ所 (NO.1孔, NO.2孔)
阿寺断層沿い	4回	福岡 404.0m 2回,	上野 406.0m, 萩原 310.0m

第1回目は鉛直孔で深度6.2m、第2回目は45度斜孔で深度9.0mのボーリング孔にインテリジェント回収型歪計(以下、測定装置と記す)1号機を埋設した後、オーバーコアリングにより回収した。

(1) 鉛直孔について

鉛直孔では測定装置の回収9時間前に電池切れのため、肝心のオーバーコアリングの時間帯に装置が作動していなかった。

a) 原因: 坑内は湿度(湿気)が高く、坑内で測定装置を開けて内部をチェックすると測定装置内部に湿気が入るため装置の誤動作が心配である。そのため、研究室において事前に、測定開始時刻(データ取得開始)と終了時刻をセットし測定装置が正常に作動しているかのテストを繰り返し行った。最終確認した後に現場へ運び埋設した。にもかかわらず測定装置内部のデジタル出力の1ビットが誤作動し、消費電流が多くなっていたことに気づかなかった。このため予定より短時間で電池が消耗してしまった。安心感による初歩的な失敗であった。

b) 改良点: 作業日程が遅れた場合でも対応できるようにする。事前の測定装置と外部システム(コントローラ)の作動テスト確認後、ボーリング孔に装置を埋設する日程に最も近い日に環境条件の良い場所で電池交換を行い、測定装置の作動開始時刻と終了時刻をスケジュールする。設定した作動開始時間の前に、測定装置のコネクターにテスターをつなぎ開始時間に正常に立ち上がることを確認する。同時に消費電流が設定値であることを確認する。

(2) 45度斜孔について

45度斜孔においては、φ76mmの小ホールを9m掘削して測定装置を埋設した。モルタル硬化後、φ76mm小ホールに沿ってφ116mmのパイロット付ビットで拡幅した後、オーバーコア(コアビット外径:116mm使用)を行う予定で拡幅ビットによる拡孔を始めた。しかし途中で進まなくなったので、拡幅ビットを揚げてみたら、ビットが磨り減って掘進不可能になっていた。この拡幅ビットは特殊なためメーカーに修理に出すと早くても10日から2週間ぐらいいかかるものであった。通常は、測定装置埋設日からモルタル硬化待機期間の7日後にオーバーコアを開始するが、この測定の場合では日数がかかり過ぎ測定装置の内部メモリーを使い切ってしまった。そのため、肝心のオーバーコア時のデータが保存できなかった。

a) 原因: かなり使い込んだ拡幅ビットであった。準備不足の失敗である。

b) 改良点: 特殊なビットであっても予備のビットを必ず用意する。(応力測定はできなかったが、岩盤が良好であったため、1・2回目ともオーバーコアで回収されたコアはほぼ同芯円に近かった。)

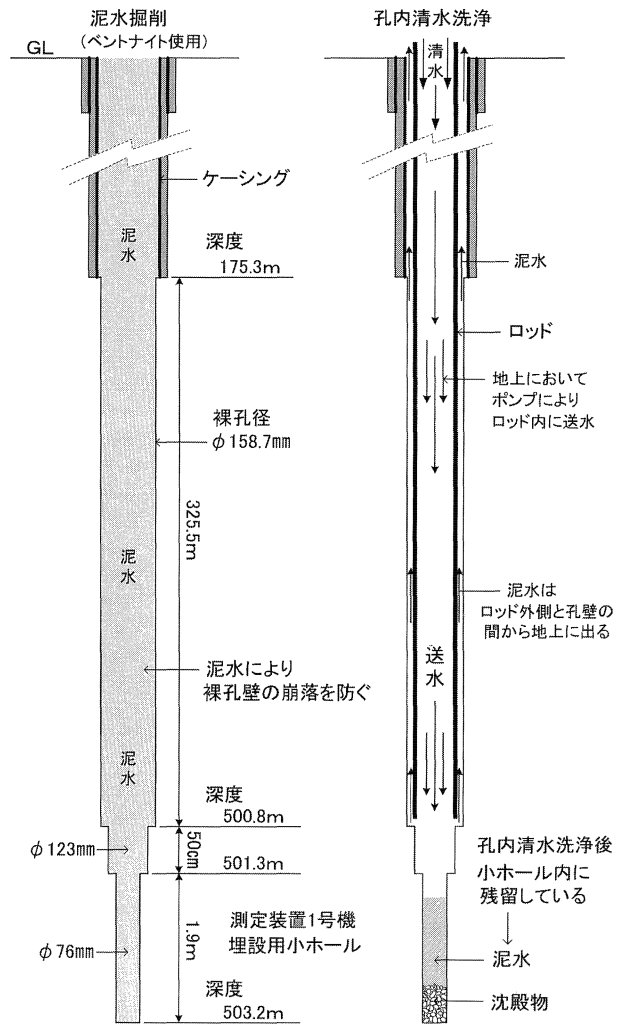


図1. 左の図は掘削完了のボーリング孔(裸孔壁は泥水で保護されている)、右の図は孔内の清水洗浄(小ホール内に泥水と沈殿物が残っている)。

2. ボーリング孔内の清水洗浄の事例

ボーリング孔の掘削は、通常ベントナイト泥水を使用しておこなう。泥水により孔壁を保護しながら掘削する。測定装置の埋設条件を満たす深度の岩盤まで達したら、ボーリング孔底に測定装置埋設孔として小ホールを掘削する。1号機使用の場合はφ76mmの小ホールを、2号機・3号機・5号機使用の場合はφ56mmまたはφ59.94mmの小ホールを掘削する。最終埋設用小ホールの掘削が終了した時点で孔内の泥水を清水に切り替える。孔内洗浄は、ロッドを孔内に降下させ地上のポンプによりロッド内に清水を送水することにより、ロッドの外側と孔壁の間を通過して泥水が地上に出る。時間をかけて地上に出る泥水が清水に変わるまで行う。この作業を行わなければ、測定装置埋設用の配合モルタルと岩盤とを良好にカップリングすることができない。



図 2. 回収されたコアの写真. 左上はコアバーレル内に収納されたコア, 他の3枚はコアを剥がした時の写真でモルタルは硬化しなく残留沈殿物やモルタルのゲル状が確認された.

和歌山県新宮市で行った深度 500 m ボーリング孔においては, 1号機埋設後, オーバーコアリングにより回収されたコアの外側岩を剥がしてみたら, モルタルが硬化しなかった. 岩盤とのカップリングが悪くモルタルはゲル状であった. この状態では測定した歪変化のデータは使い物にならない.

a) 原因: このボーリング孔は地上から深度 175.3 m までケーシング (孔内保護管) を挿入してある. その先, 深度 500.8 m までは裸孔径 $\phi 158.7$ mm で掘削されており, 先端部を $\phi 123$ で 50 cm 掘削し, その先に埋設孔として小ホールを $\phi 76$ mm で深さ 1.9 m に仕上げている. 裸孔部分 (325.5 m) を長く掘削してあるので, 孔壁の崩落を防ぐために通常時よりもベントナイトの配合量を多くして泥水掘削を行った (図 1 の左). その後, 清水による孔内洗浄を行った. $\phi 76$ mm 小ホール内に沈殿している泥水や沈殿物を完全に排除することができないまま (図 1 の右) 孔内洗浄が終わったと思い, 埋設用配合モルタルをベアラにより小ホール内に置換して1号機を埋設した. そのため, 小ホール内の泥水や残留沈殿物とモルタルが混ざり硬化しなかったと考えられる (図 2). 地下深部の状況を想定することができなかったことに問題点があった.

b) 改良点: 測定装置埋設孔の孔壁が泥水により泥壁形成されると, モルタルの密着性や硬化状態が著しく悪くなる. そこで, 埋設用小ホールを仕上げる前にボーリング孔を規定深度まで掘削した時点で, 一度孔内洗浄を行い泥水から清水に切替える. 埋設用小ホールの掘削は清水でおこなう. 岩盤状況にもよるが, 可能な限り清水掘削が望ましい. もし岩質があまり良くない場合は, 途中の孔壁の崩落等を考慮して埋設用小ホールも泥水掘削になる. 小ホールを仕上げた後, 孔内清水洗浄をおこなう場合は清水の流速のみで排除しきれない, 小ホール内の微細な沈殿物を排除する方法として, 新しくスライム採取用ベアラ (ピストンベアラ) を用いることを考え出した. このスライム採取用ベアラにより小ホール内 (最終孔底部) から泥水, スライムを綺麗に取り除いて始めて小ホール内が清水に置き換わる. 埋設用小ホールが清水掘削の場合であっても, スライム採取用ベアラによる最終的な残留沈殿物の排出作業を行う必要がある. この作業により, 配合モルタルと岩盤 (孔壁) のカップリングが良好になると確信できる. 以後はこの作業方法を定着させている.

3. オーバーコアリングの途中で掘削が進まなくなった事例

岐阜県福岡町で深度 404 m ボーリング孔において、孔底部の $\phi 56$ mm 小ホールに測定装置 2 号機を埋設した。モルタル硬化待機期間の後、オーバーコアリング用特殊装置の先端にダブルチューブコアバーレルとコアビット（外径：86 mm・内径：70 mm）をセットしてオーバーコアを始めた（松本ほか，2000b，図 6 を参照）。しかし掘削が途中で進まなくなった。岩が堅いためなかなか掘進しないのだと思っていたが、あまりにも時間が掛かりすぎるのでコアバーレルの引揚げを指示した。引揚げたコアバーレルを確認したら、一番先端にあるはずのコアビットが付いてなく（切れた）孔内に残った状態であった。このような現象を経験するのは初めてで、孔内で何が起きたか判断するため 2 号機の回収を早急に行った（回収が遅れた場合メモリーオーバーになりデータが取得できなくなる）。同じコア径のビットでは引揚げられないので、現場でボーリング業者に大きい口径のコアビットを用意するように指示した。そのコアビット（内径：99.2 mm）を被せてオーバーコアを行い、無事測定装置を回収した（岩・コンクリート・2 号機の一体物）。そして、2 号機頭部の岩とコンクリートを取り除いて見たら、契れたコアビットは 2 号機のセントライザーに付着していた。この時点では 2 号機そのものに外見上の問題はなさそうであったので、データを外部コントローラに伝送するために 2 号機頭部の蓋を開けることにした。治具を使いネジ式の蓋を回しながら外していくと、途中まで緩めた時に破裂音とともに蓋が飛んだ。測定装置内部に異常が発生していることは明白である。すぐに測定装置内部を確認するため基板部分を開けてみたら基板が黒焦げで、電池も潰れていた（図 3）。

a) 原因：オーバーコアリングは特殊装置にコアバーレル・コアビットを装着して、孔口よりポンプによりロッド内に送水をしながら掘削をする。しかし、特殊装置から先に水が送られていなかったため先端コアビットは無水状態の掘削になり、岩盤との摩擦熱でビットが測定装置のセントライザー（外径：68 mm）に焼き付いた。この高熱が測定装置内部に伝わり、基板を焼き黒焦げにした。また防水用オーリングも焼けたため、内部に水が入り水圧で電池が潰されガスが発生していた。このため、蓋を途中まで緩めた際に破裂音と同時に蓋が飛んだ。無水掘削に気づかず、測定装置を壊すという事態を引き起こした。

b) 改良点：事前に特殊装置の送水試験を行うとともに、全ての機器のチェックをする。それとともに、不測の事態に備えて対応できるような準備をしておく。

修理が出来た 2 号機によりこのボーリング孔において、2 ヶ月後に再度初期応力測定実験を行った。ボーリング孔



図 3. 上の写真は、ビットが焼き付いた部分を取除いている。測定装置は高熱で変色している。下は基板が焼けて黒焦げになり電池は潰れていた。

を一度 $\phi 123$ mm で掘削した後、孔底部をセメントモルタルで埋め戻し硬化させ、埋設孔として $\phi 56$ mm 小ホールの整形仕上げをし、2 号機埋設後にコンクリートのオーバーコアリングを実施した。このようなコンクリートのオーバーコアは初めてであったが、ほぼ良好な結果を得ることができた（石井ほか，2001）。

4. 地層（岩質）の悪いボーリング孔での事例

岐阜県土岐市で行ったボーリング孔では、深度 150.56 m まではケーシングを挿入し、この深度から深さ 158 m まで

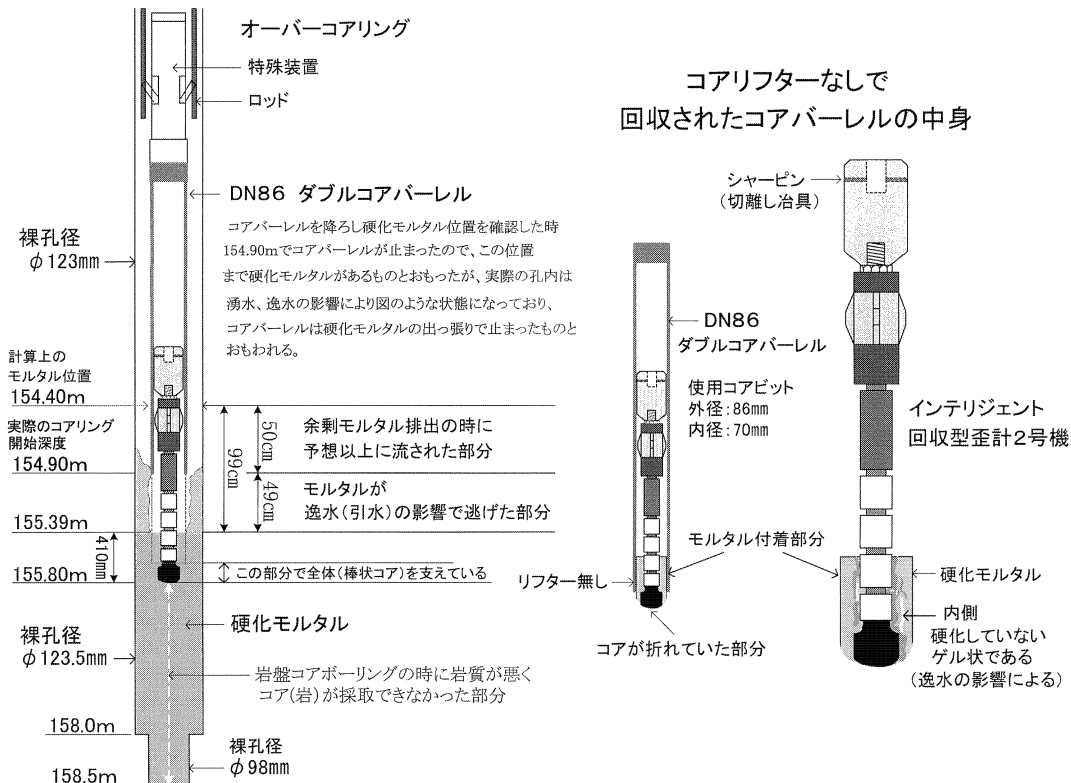


図 4. 回収コアにより検討した結果の孔内状況図. ストレートのボーリング孔では、余剰モルタルの排出時に予想以上にモルタルが流されていた。

コアボーリングを行った。深度 155.8 m まではなんとかコア(岩)の採取ができたが、そこから先の 158 m までの 2.2 m 区間はコアの採取ができないほど岩質(風化花崗岩)が悪い状態であった。その先に $\phi 98\text{ mm}$ で 50 cm の掘削を行ってみた結果、岩質が悪く埋設用小ホール $\phi 56\text{ mm}$ の整形仕上げは難しいと判断した。埋設孔なしのストレートボーリング孔内におけるコンクリートのオーバーコアリングになる。作業手順を変え、配合モルタルを孔底部より十分立ち上がるまで充填し、測定装置 2 号機埋設前にロッド(内径: 103.2 mm) 内に清水を送り込み、余剰モルタルの排出作業を行った。そして、孔底に残留しているモルタル内に 2 号機をワイヤーにより降下させた。この方法の場合、2 号機をモルタル内に降下させたことによるモルタル上昇位置を正確に把握できない(接続シャープピン用治具の位置までモルタルで埋まった場合は、ワイヤーとの切離しができなくなる)。業者との事前の打合せでは、余剰モルタル排出位置はロッドの深度でわかり、測定装置埋設深度は事前の 2 号機ダミー通し試験によるワイヤーのマーキングでわかるとの返事であった。測定装置 2 号機を残留モルタル内に挿入し 2 号機底部の位置が深度 155.8 m になるようにセットすると、計算上モルタル上昇位置は 154.4 m になる。この作業手順を進め、オーバーコアを開始した。2 号機底部のウエイト部を残した位置まで切り込んで応力の開放

を終えた後に一度コアバーレルを地上に引揚げた。コアリフターを取付けた後、再度、孔内にコアバーレルを降下させ、残りの部分を切り進んでから孔底部と切離すとコアバーレル内に 2 号機を含むコアが回収される手順である。しかしこの時は、応力開放を終えた後にコアバーレルを地上に引揚げたところコアバーレル内部に 2 号機を含むコアが回収されていた。コアリフターの役目は岩盤と切離すためと、コアバーレル内に収まったコアの脱落を防止するためのものである。コアリフターなしで、なぜコアが回収されたか疑問が残った。回収されたコアは、2 号機中間部より上部まで硬化モルタルが付着していなかった。下部に付着しているモルタルは外側が硬く、内側は 2 号機と密着する部分がゲル状であった。当然のことながら測定した歪データは使用できなかった。

a) 原因: 第 1 番目のモルタル排出位置違いの原因については、ストレート孔内をストレートのロッドを介して送水したため、計算上のモルタル位置より深い部分のモルタルまで排出してしまった。また孔内部は、地層状態が悪く逸水による影響でモルタルが予想以上に散逸した。回収されたコアを測定した結果、ロッドの送水による余剰モルタル排出は予想位置より 50 cm 深く排出された。さらに逸水(引水)により 49 cm ほどモルタルが逃げたことがわかった。そのためモルタルは測定装置 2 号機の下部部分にしか

付着してなかった（図 4）。

第 2 番目のコアリフターなしでコアが回収された原因は、測定装置の底部の形状が悪かったことによる。測定装置底部のウエイトは、測定装置を埋設用小ホール内に降下させる時の誘導装置の機能を兼ねている。長さ 116 mm で先を半円球型（ $\phi 50$ mm）に製作してあった。測定装置 2 号機は全長 1614.2 mm あり、オーバーコア時にコアリフターを取付けるためコアバーレルを地上に引揚げる。この時、孔底部では測定装置を含む棒状のコア全体を測定装置底部の長さ約 10 cm のウエイトで支える。ウエイトの先端部が半円球であるためコンクリートとの固着部が折れやすい構造であった。そのため今回のようなモルタルのカップリングが悪い状況下で折れるという現象が起こった。このような孔内状況を正確に把握しきれなかったことが原因で失敗を引き起こした。

b) 改良点：第 1 番目の原因については、岩質の悪い孔径の大きいストレートのボーリング孔では、余剰モルタルのカット位置の正確な把握が難しいことや測定装置を孔内の中心に設置させるには問題が多すぎるため、今後は行わないことにした。もしこのような地層を掘削する時は、定期的に水位変化を測定し、逸水・湧水の調査をして、逸水・湧水個所が埋設孔内か埋設孔の上かを正確に確認する必要がある。状況によりストレートボーリング孔内で初期応力測定を行う場合は、孔底部からモルタルが十分に立ち上がるまで充填し（逸水・湧水をモルタル圧でおさえる）する。硬化後にコンクリートのコアボーリングを行い、採取したコアにより逸水・湧水及び虫食いの位置を確実に把握する。埋設が可能であると判断した後にコンクリート内の掘削を行い、その先にテーパ誘導孔を作り埋設用小ホールを整形仕上げして、測定装置埋設及びオーバーコアリングを確実にする方法にしている。

第 2 番目の原因を改良するために測定装置ウエイト部の設計変更を行った。具体的には、岩盤とモルタルとの固着をより強固にさせ、ウエイト部による測定装置全体支持の強度を持たせるためにウエイト部を長さ 260 mm とし、凹凸に製作仕上げして、先端部は測定装置を埋設孔（小ホール）へ誘導するため槍型に改良した（図 5）。

5. 回収されたコアをコアバーレルから取り出す時の事例

上記 4 の岐阜県土岐市で行った同じボーリング孔を $\phi 123$ mm ビットで深度 156.5 mm まで再掘削した。この孔にセメントモルタルを充填しモルタル圧で逸水・湧水を押さえた。モルタル硬化後、 $\phi 98$ mm コアビット（内径：63.5 mm）で深度 156.5 mm までコアボーリングを行った。採取したコンクリートのコア（長さ 4.7 m、径：63.5 mm）を検討した結果、コアは上から 1.2 m までは粘土層が混じって

いたが、その下の部分 3.5 m は棒状コアであり、逸水・湧水及び虫食い等の異状がなかった。再度この $\phi 98$ mm 孔に配合モルタルを充填した。次に埋設孔を仕上げるために $\phi 123$ mm で深度 154.17 m まで掘削し、その孔底を $\phi 98$ mm で 40 mm 掘ってからテーパ誘導孔を仕上げ、その先に $\phi 56$ mm で深さ 1.5 m 埋設用小ホールの整形仕上げをした（図 6）。測定装置 2 号機を埋設した後に $\phi 86$ mm コアビット（コア径： $\phi 70$ mm）でコンクリートのオーバーコアリングをおこなった。順調にダブルチューブコアバーレル（アウターチューブとインナーチューブのダブル）内にコア（コンクリート・2 号機を含む）を回収した。コアバーレル先端のコアビットを外しインナーチューブ（筒状）内に採取されたコアを抜き出す時は、片側からコアを押し出せる。しかしなかなか出てこないため、コアに木片を当ててハンマーで叩いたが、インナーチューブ内でコアが動かない、そこで、大ハンマーで強く叩いて取り出した。その衝撃で測定装置 2 号機内部の鉛直歪計部を破損した。

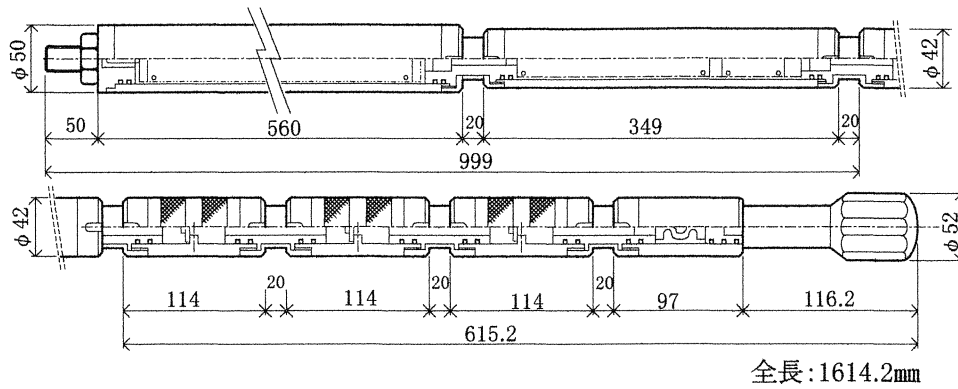
a) 原因：インナーチューブからコアを抜き取る時は、通常ある程度の力を加えればコアは出てくる。コア径は 70 mm でインナーチューブ内径が 70.8 mm であるから詰まる状態にはならない。しかしわずかな破片がチューブ内に引っ掛かっていたため、そこを叩きすぎチューブ内でコアが詰まる状態を起こした。なおかつ強い力を加えて 2 号機を取り出したため、2 号機内部を破損した。現場で確認しなかったが、インナーチューブそのものに変形があった場合はコアの抜き取りは難しくなる。著者は現場において立ち会っていたのだから、コアが抜き取り難いと判断した時点で、インナーチューブをカッターで縦方向に 2ヶ所切断して、チューブを犠牲にしてもコアと測定装置を無傷で取り出すよう強く指示すべきであったと反省している。

b) 改良点：コアチューブに採取されたコアを取り出すときに、測定装置に衝撃を与えない方法として、手動ポンプを用いる方法を考案した。インナーチューブの片側にネジ式でセットできるように工夫したものを取付けホースと手動ポンプをつなぎ、手動ポンプからの水圧をインナーチューブ内の測定装置の片側に加えることによりコアを傷つけずスムーズに取り出すよう改良した。

6. 既存孔を利用したケーシングによるセンターリングの事例

岐阜県吉城郡神岡町の茂住鉦山入口より約 2.2 km 坑内に入った地点において、斜孔 45 度で孔径 146 mm 深度 11.8 m の既存孔がある。この孔を利用して測定装置 1 号機を用いて測定実験を行うことにした。まず、この既存孔 45 度をどのように整形仕上げるかについて、業者側技術者（神岡鉦山の会社：三井金属資源開発）と事前の打合せをおこなった。著者の考え方は、既存孔をセメントモルタル

インテリジェント回収型歪計〔2号機〕



先端部改良型

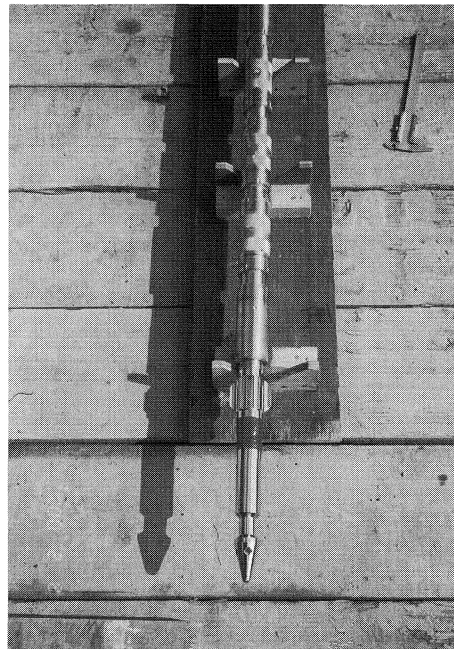
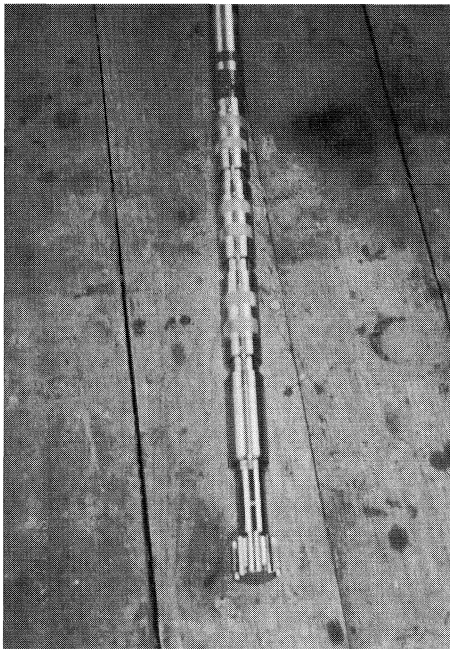
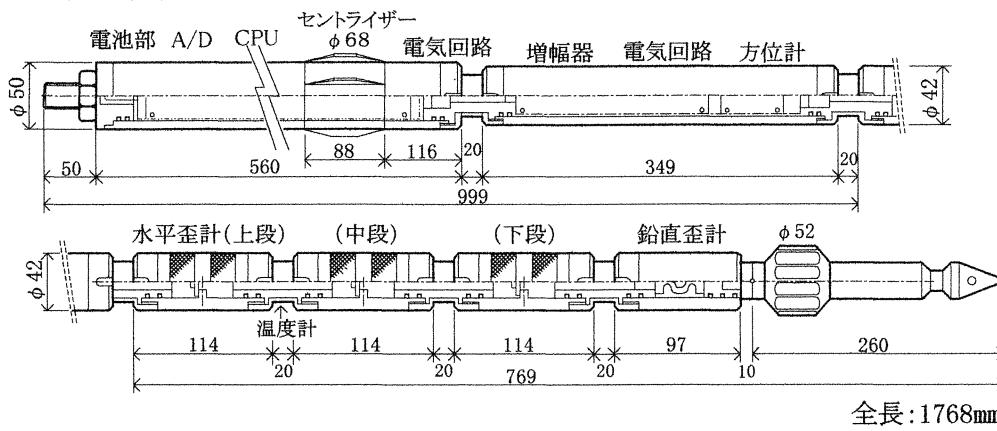


図 5. 測定装置先端部分の設計変更. 写真左が従来型, 右が改良型.

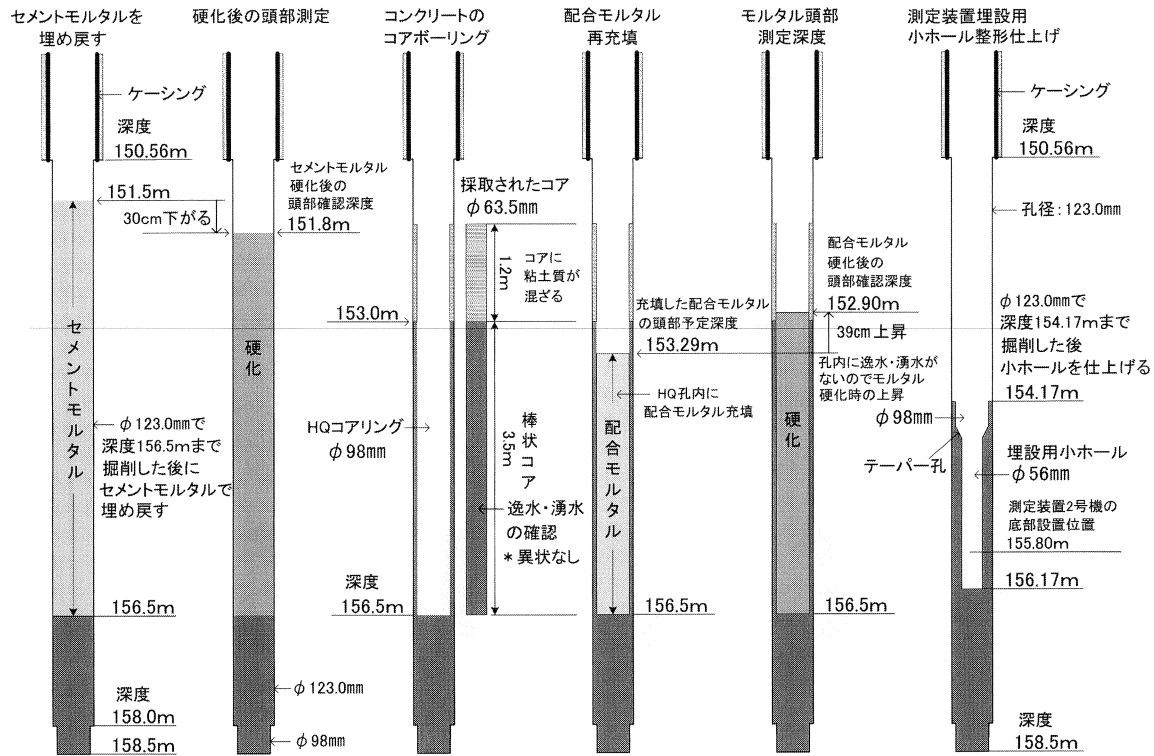


図 6. 岩質の悪いボーリング孔における逸水・湧水確認と、測定装置埋設予定深度付近の孔内状況を確実に把握するための工法。

で孔口まで埋め戻し、硬化したコンクリート内部をφ76 mmで規定深度まで掘削する。この斜め掘りでは孔が下方にだれることがある。φ76 mmが下方に傾いていたとしても1号機埋設後、オーバーコアリングを行う前に、この76 mm先進孔に合わせてφ131 mmパイロット付きビット（パイロット径：75.69 mm）で1号機頭部の近くまで拡孔する。この拡孔径131 mmに沿ってφ131 mmコアビット（内径：102 mm）を用いてオーバーコアを行えば、φ76 mm孔とφ131 mmコアビットは平行で直進性が確保される。わずかなずれがあってもφ76 mm孔に被せられ安全性が高いとの説明を行った（図7）。業者側技術者の説明では、この方法は岩盤状況が良い所でのみ有効と考えられるとの説明であった。過去のケースでは茂住坑内は割れ目の多い岩盤のため、先進孔が微妙に曲り、それを追った拡孔が途中で不可能になってしまったことがしばしば起きている。そのためこの工法は茂住坑内には適していないとのことであった。業者側の測定装置設置計画は、既存孔の孔底部からセメントモルタルで立ち上がり3.5 mm（深度8.3 mm）まで埋めた後にφ146 mm深度9 mmの孔を作るものであった。この斜孔底部の中心に埋設用小ホールを掘削するためには、φ142 mmケーシング（内径：133 mm）とφ88.9 mmケーシング（内径：76.2 mm）の2本を孔底部まで挿入しセンターを出す。次に内側ケーシングの中に掘削ビット（φ75.69 mm）を通しながら9 mmの孔底から先を2.6 mm掘削仕上げする。オーバーコアのときは内側のケーシ

ングを抜いて、φ131 mmコアバレルにて行う工法であった。

ここで埋設準備と手順について説明しておく。1号機埋設前に問題なのは孔内に充填する配合モルタルの容量である。それは、通常埋設時のように配合モルタルを多めに充填して1号機を埋設した後に余剰モルタル排出を行う工法ではなく、最初に正確な配合モルタル量を孔内部に置換し、1号機を降下埋設したときに1号機と接続治具の容積で、モルタル上昇がどこまでの位置になるかを決めなくてはならない（埋設に使用するロッドは送水でモルタルカットができるような構造にはなっていない）。接続治具と埋設用ロッドの切離し部分に硬化モルタルが付くことを絶対に避けなくてはならない。そこで接続治具を1 mの長さにして逃げを作った。埋設手順は以下である。1号機（φ60 mm、長さ902 mm）に接続治具（直径24 mm、長さ1 m）をセットする。次に我々が考案したロッド1本目を左ネジでジョイントする。2本目から継ぎ足すロッドは半円で凹凸にはめながらボルト締めにするため回転を起こさない。この埋設孔は45度斜孔であるため、1号機を斜め孔の下盤に沿ってロッドで押し込むようなかたちで降下させていく。1号機を埋設孔の中心にセットするにはセントライザー（4枚羽）の長さを変えて孔中心に設置できるように2 mmの偏芯をもたせてある。方位については1号機のキーマークにロッドの位置を合わせて降下させ、孔口で予め決めておいた方位に合わせる。以上の準備を済ませた後、1号

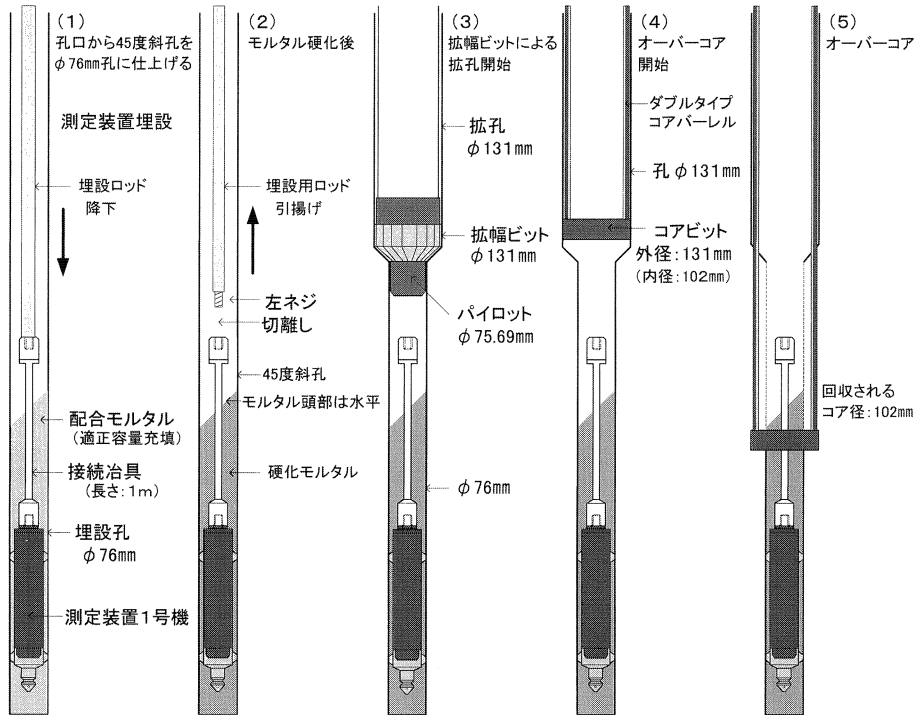


図 7. 45度斜孔における測定装置埋設・拡孔・オーバーコアリングの説明 (45度斜坑であるため、図中のモルタル頭部を水平としてみる)。

機の底部先端が深さ11.4 mの位置になるように埋設した。

次にオーバーコアリング時におけるトラブル発生について記す。ボーリングマシンによる掘削回転中にコアビット先端深度が10.88 mに達したとき異音(金属を切るような音)を感じた直後、マシン全体が孔内に引き込まれる感じでガクンと動いた。即座にマシンを停止させ、コアバーレルの引揚げを行い確認したが、コアビット及びコアバーレルに特別異状はみられなかった。しかし、このまま再開するのは危険を伴うと判断し、142 mm ケーシングを抜いた後、口径の大きい $\phi 146\text{mm}$ コアビット(内径: 129 mm)を用いて深度9 mからの掘削(切り込み)を再開した。途中で応力開放によるデータ取得の手順を行いながら、深度11.8 mまで切り込んでコアの回収を行った。回収されたコアバーレルからコアを取り出してみると、1号機の周りにセメントが付いてなく、1号機はかなりの衝撃を受けて「くの字」に変形していた。測定装置を破損させるという致命的な失敗をおかした。

a) 原因: 埋設孔の曲がりが予想される。以下に状況を分析する。ケーシングを孔中心位置になるようにセットしたとしても、ケーシング類は挿入のため僅かなクリアランス(隙間)が必要であり、全て組み合わせた状態で数 mm 程度の偏芯を起こす可能性がある。埋設孔の掘削は内側ケーシングの中にビットを通して行った。この時、ケーシングが僅かなずれを起こしていたと考えられる。回収された1号機を検証した結果、コアビットが切り込み途中で接

触した深度10.88 mと1号機の損傷位置が同じである。したがって1号機の回収失敗の主な原因は埋設孔の曲がりと考えられる(図8)。また、埋設用モルタルが不十分だったために、ボーリングマシンのコアビットが1号機に接触した際の衝撃をモルタルで支えることができず、衝撃を直接1号機に加えてしまったために1号機の破損を大きくした一つの要因と考えられる。今回は、埋設孔を仕上げる際に、ケーシングを用いてセンタリングを行ったための施工上の失敗である。

b) 改良点:

① 掘削地点・方向の検討

今回実施したケーシングを用いたセンタリング方法は問題点が多い。このため今後は埋設用小ホールを掘削した後に $\phi 131\text{mm}$ での拡孔方法に変更する。ただし、斜め掘りでは今回のような孔曲がりや再度起こる可能性が非常に高い。孔曲がりやを最小限に押さえるためには、ロッド～コアバーレル～ビットに至る直進性を確保する必要がある。そのためにはガイド付きコアバーレルおよびリーマー付きロッドなどの使用を検討する。その他の考え方として今後、安全性を考えて坑道内では掘削方向を鉛直に限定する方法もある。

② 埋設用モルタルの充填方法の検討

今回はモルタル充填方法にも問題があったため埋設用モルタルが不十分であった。この問題を解決するため、予め多めのモルタルを充填し、測定装置埋設後に接続治具の下

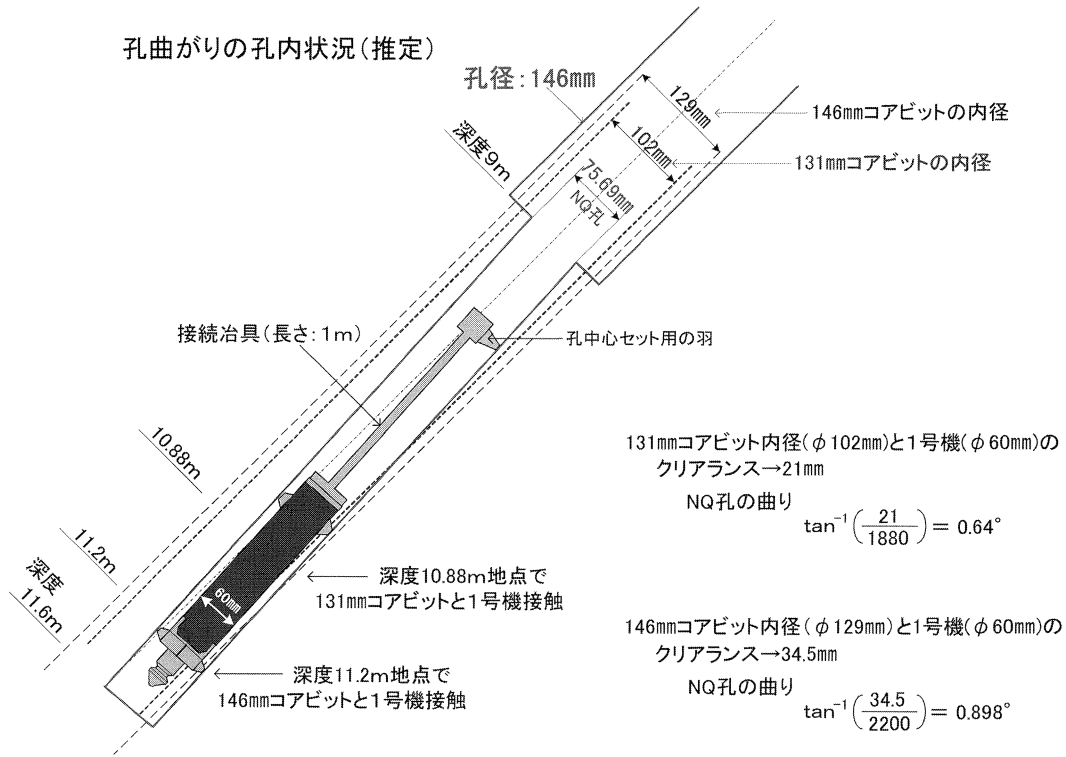


図 8. 埋設孔の孔曲がりによるオーバーコア時の孔内状況推定図

で余剰モルタルをカットできるように工夫する。

③ 今後の対応について

施工上の問題点をどのように解決していくか、また、様々な危険要因が予測される場合は、現場への十分な注意指示をし対策の立案を行っていく。

7. 測定装置埋設直後に至近距離での加圧孔掘削による事例

前回失敗した茂住坑内において、修理完了した1号機(修理後、全長: 978 mm)を用いて、再度初期応力測定を試みた。

その計画内容を説明する。茂住鉱山内に跡津川断層の副断層があり、測定孔はその断層をまたいだ2ヶ所を選定し、2点の距離を約300 m 離す。掘削孔は安全性を考慮してすべて鉛直孔で行うことにする。深度は10.0 m~12.0 mで、オーバーコアリングを実施した後の孔において歪連続観測を行うため小型ボアホール多成分歪計(直径: 60 mm, 長さ: 1137.5 mm)を埋設・設置する。1ヶ所の孔においては連続観測用歪計への加圧試験を行う目的で、1.5 m 離れた地点に加圧孔φ66 mmを深さ17 mで仕上げる。測定孔および加圧孔はコアボーリングを行い採取されたコアを検証し、孔内の岩質状況を確認した後に1号機の埋設深度を決める。また、掘削時には湧水・逸水測定を行う。この計画を前回の業者と打合せした結果、今回は深部ボーリング孔においてオーバーコアリングの経験がある業者が

請負うことになった。掘削実施前に著者らは坑内に入り、測定孔2ヶ所と加圧孔の掘削地点の選定を行った。

No. 1 測定孔は、コアボーリングを行いながら岩質の良否を確認した。採取されたコアの最も良好な部分は深度10.8 m~11.2 mの40 cm 区間にあった。深度11.75 mまでコアボーリングを行ったが、11.75 m付近は縦割れのクラックがみられた。湧水は孔の上部分でわずかで埋設には影響ないと判断した。この結果から、測定装置1号機の埋設深度は歪計部分の中心位置を深度11.0 mにセットした。今回は正確なモルタル量をコントロールするのではなく、配合モルタルを孔内部に充填し、1号機埋設後に余剰モルタルをカットする方法で行った。1号機に接続治具(長さ: 510 mm)をセットし、前回使用の埋設用ロッド(図9)をつなぎモルタル内に降下埋設を行い、1号機の歪計中心位置が11.0 mに達した位置において孔口でロッドを固定した。方位は坑道に対して直角にあわせた。余剰モルタルの排出は塩ビ管先端部にエルボーを取り付け、塩ビ管内に送水することにより余剰モルタルの排出を行った(図10)。これで、No. 1 測定孔への1号機埋設を終了した。モルタル硬化期間の1週間後にオーバーコアリングを実施する。この期間に行う次の作業手順はNo. 2 測定孔の掘削開始(コアボーリング)であったが、作業工程の短縮を考えて1.5 m 離れている加圧孔の掘削に取り掛かった。1週間後に加圧孔は掘削が完了した。コアサンプルの岩質は部分的に悪く、コアにかなりの亀裂があり、孔口からははっきり

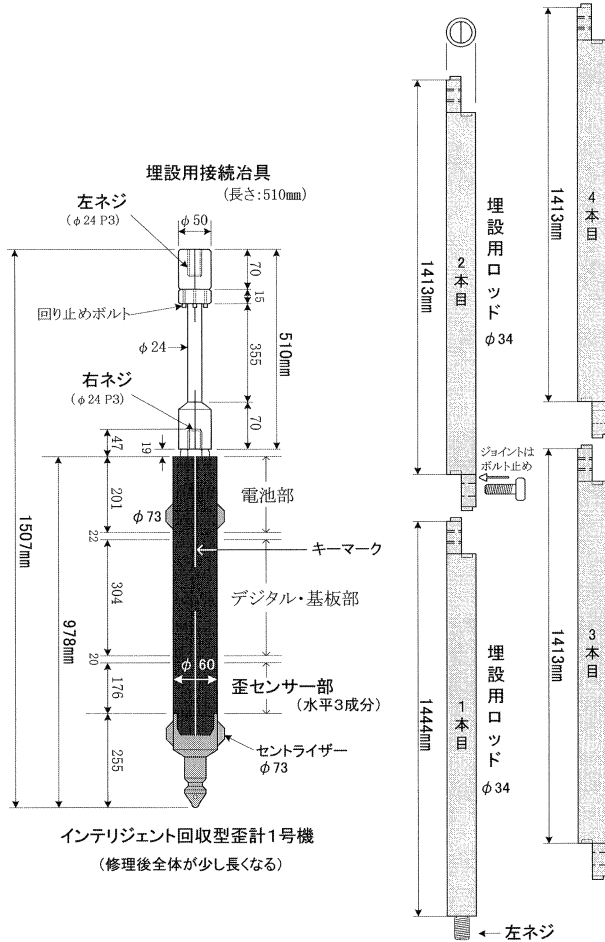


図 9. 浅層ボーリング孔へ測定装置を埋設する時に使用する埋設用ロッド

した湧水が出ている。No. 1 測定孔より悪い状態である。わずかに 1.5 m しか離れていない地点でこのような違いがあることを認識した。No. 1 孔においてオーバーコアリングを開始した。応力開放・変動測定と順調に進み、深度 12.0 m で岩盤と切離し、コアを回収した。このコアは同芯円に近かった。コアの感度検定はボーリング孔が浅く孔井内で行うことができないため、今回は事前に感度検定用の加圧容器を開発 (図 11) し現場に持参した。回収されたコアを加圧容器に入れ手動ポンプで水圧を変えながら感度検定を行う。坑内温度は一定であるから加圧容器 (ステンレス製) は温度変化を起こさない。感度検定が終了した後、外部コントローラへのデータ伝送を行うため、コアを剥がして 1 号機のカップリング状態を確認したら、1 号機の間中部分から上はモルタルの付着がうすく流されていて下部はゲル状であった。No. 1 測定孔の応力測定はできなかった。

No. 2 測定孔に関しては、湧水・逸水などがなく岩質はほぼ均一で良好であった。また、オーバーコアリングでの回収コアは断面で 1 号機のキーマークを上に見て中芯より下側に 4.5 mm のずれで問題なしの回収であった。加圧容

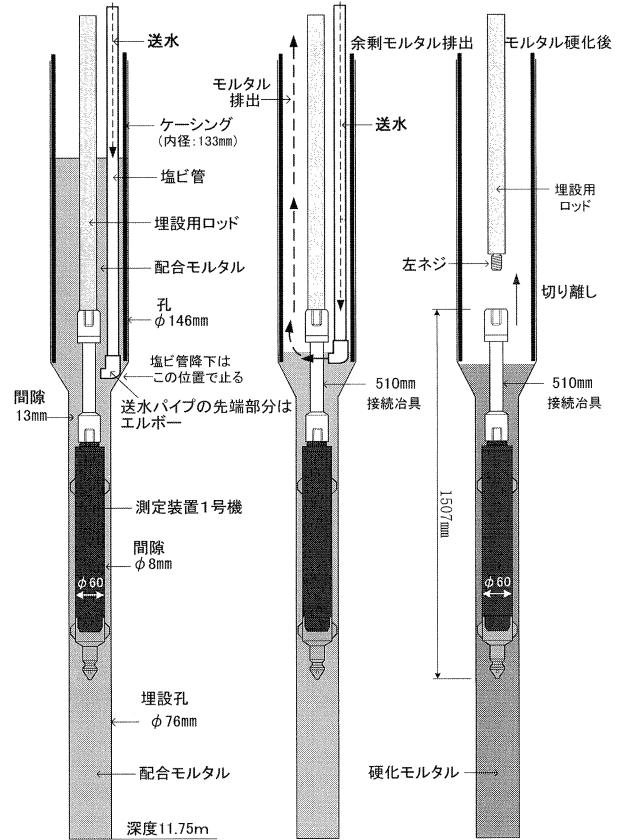


図 10. 浅層ボーリング孔内での測定装置埋設後の余剰モルタル排出 (上の孔径が大きく、下の孔は細いため塩ビ管は予定深度で止まる。)

器使用の感度検定もおこない初期応力測定は成功である。その後の、連続観測用小型ボアホール多成分歪計の埋設・設置も無事に終了した。

a) 原因: No. 1 測定孔はコアサンプルを確認し、湧水・逸水にも特に問題なしで実施したのに「なぜ」と言う疑問が残った。原因は No. 1 孔に 1 号機を埋設しモルタルがまだ硬化していない状態の時に 1.5 m 離れた地点に加圧孔のボーリングを開始したため掘削圧で隣の No. 1 孔に水みちがで、その影響により湧水が発生した結果、モルタルは硬化せず部分的に流され残りの部分はゲル状になった。作業工程の短縮を考え加圧孔の掘削開始を早めたための失敗である。

b) 改良点: オーバーコアリング終了後の深度 12.0 m・孔径 131 mm の No. 1 孔に連続観測用小型ボアホール多成分歪計の埋設・設置が可能かどうか、孔内の湧水 (水みち) 箇所を早急に調べなくてはならない。そこで、セメントモルタルを孔底部から深度 9.3 m まで充填した。翌日、φ131 mm コアビットでコンクリートのコア (径: 102 mm) を採取し検討した結果、9.72 m より上の部分は湧水により流されていた。また、深さ 10.41 m までの 69 cm 区間は虫食い状態であった。それより下の孔底部までの 1.59 m 区間は、

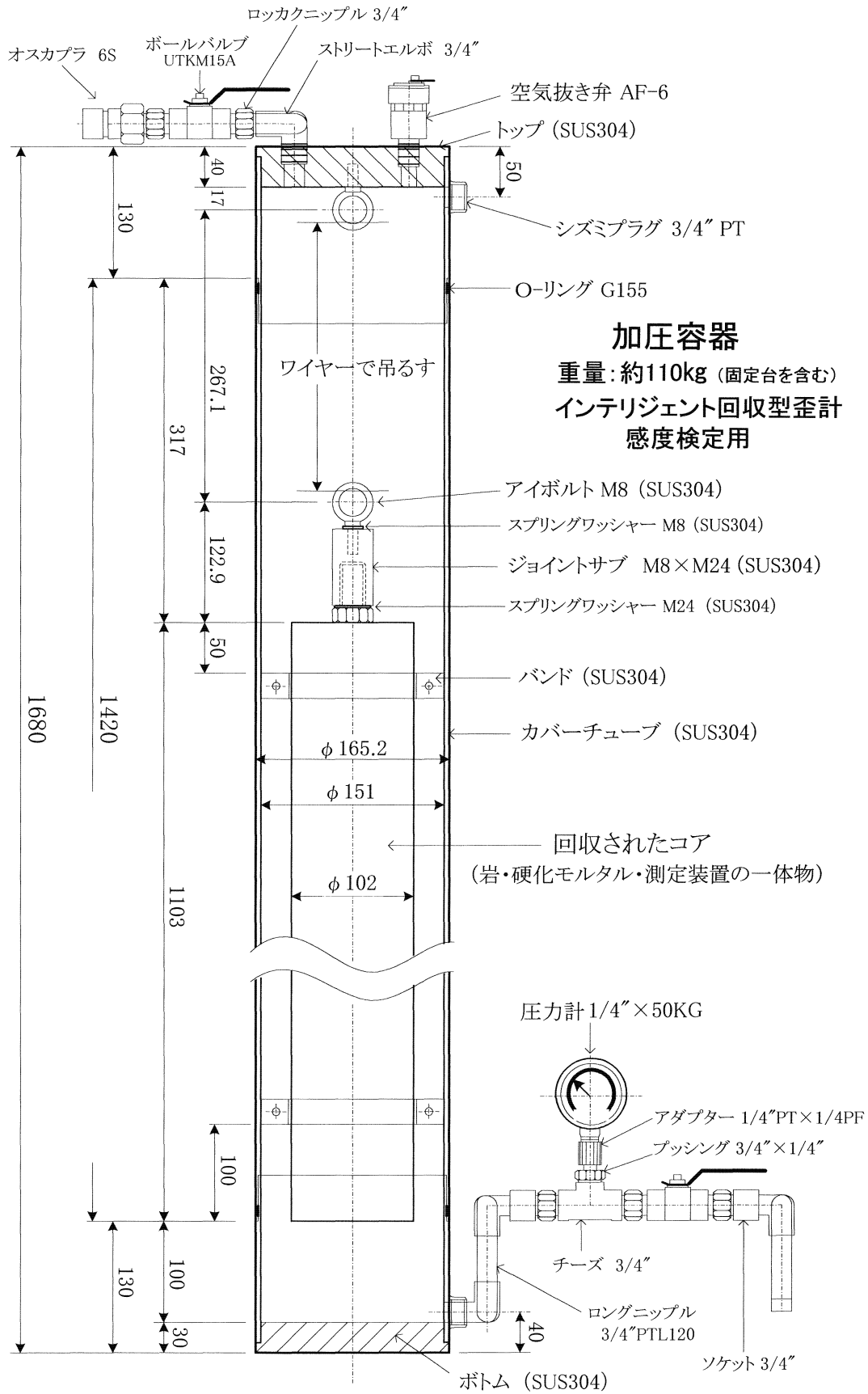


図 11. 回収されたコア (測定装置を含む) の感度検定用に開発した加圧容器

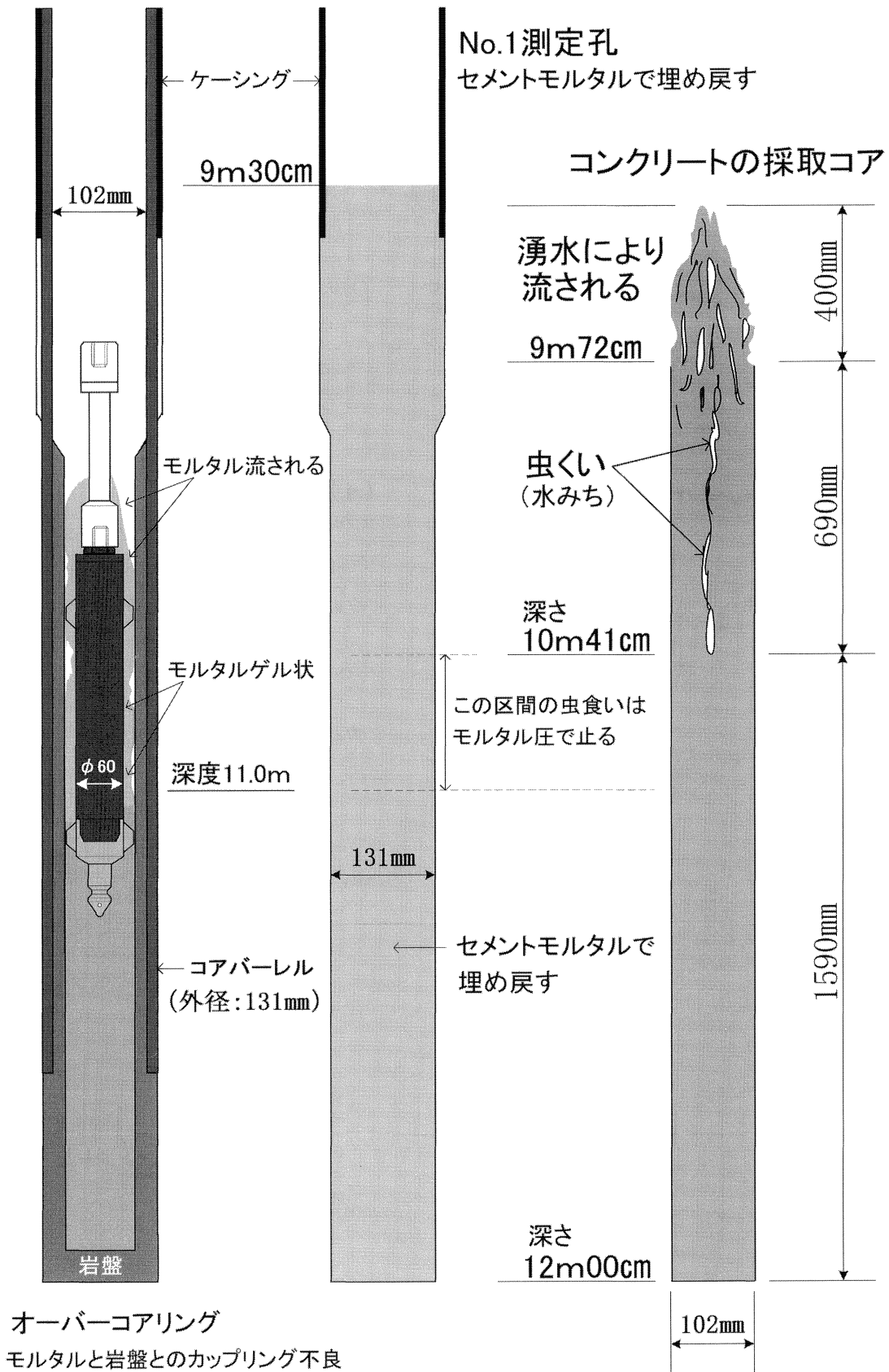


図 12. 孔内部の湧水・逸水を確認するため、孔内部をセメントモルタルで埋め戻した後に、コアボーリングにより回収されたコンクリートのコア。

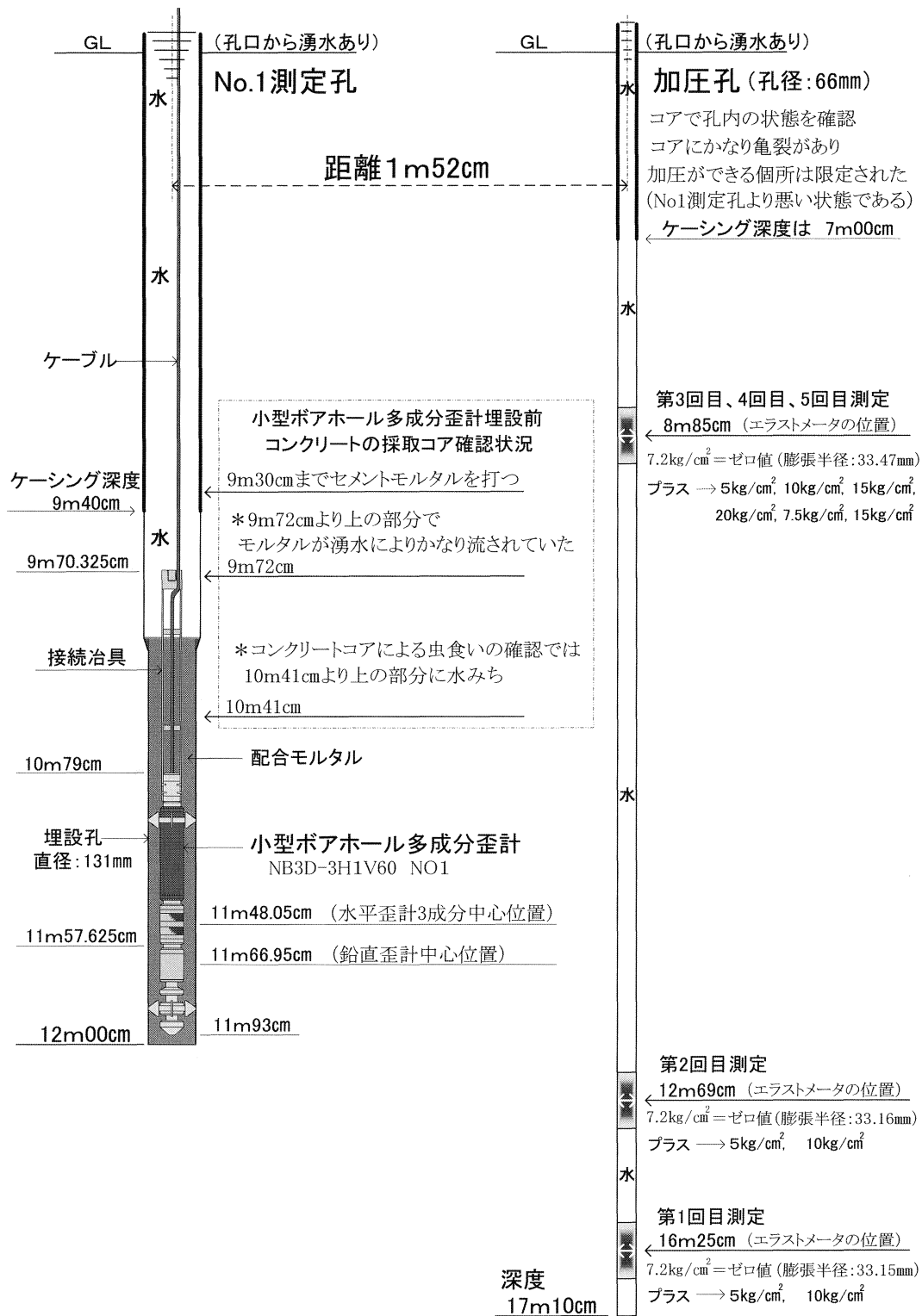


図 13. 加圧孔における加圧実験. 加圧孔と測定孔の位置図.

コアのどこにも異常は認められなかった (図 12)。この確認ができたので、小型ボアホール多成分歪計 (長さ: 1m 13.75 cm) は孔底部より 7 cm 浮かした位置に埋設・設置が可能となった。初期応力測定はできなかったが、現場に

おいての早急な対応により次のステップをクリアーすることができた。今後、2本の孔を至近距離で同時期に掘削する場合は作業手順などを考慮して行う。

ここで、加圧孔における実験について述べる。加圧装置

はエラストメータ2（メータの膨張半径：40 mm）を使用した。加圧孔内径は66 mm でかなり割れ目があるため、加圧できる個所が限定された（図13）。1回目はエラストメータ2のセンターを深度16.25 m にセットする。圧力を加えていくと7.2 kg/cm²で、半径33.15 mm になった値が孔壁にメータが付いた状態になりこれがゼロ値である。そこから5 kg/cm²の加圧（7.2 kg/cm²にプラス5 kg/cm²で12.2 kg/cm²）を行い10分間待ち、さらに5 kg/cm²を加え10 kg/cm²（17.2 kg/cm²）で10分間待って、1.5 m 離れたNo. 1測定孔の小型ボアホール多成分歪計への変動を計測する。さらに深度を変えて行い、2回目は深度12.69 m にセットした。深度8.85 m においては同じ深度で3回・4回・5回と加圧値を変えて実験を行った。この結果、深度16.25 m でおこなった時は、小型ボアホール多成分歪計の鉛直歪計への変動を期待したが、かなり小さい変化であった。2回目までは加圧値10 kg/cm²で押さえた。その訳は、圧力を上げた場合、岩質の悪い孔壁崩壊を恐れたからである。深度8.85 m でセットして行った時は大きく変化した。この時は加圧値を20 kg/cm²や15 kg/cm²まで上げたが、No. 1測定孔への水みち（湧水）による影響を受けたものと考えられる。このような実験は初めてであるが、今後、岩質の良好なボーリング孔で行えば地下の応力測定に貢献できる。

ま と め

著者らは、地下深部においても初期応力の測定可能なインテリジェント回収型歪計を開発した。本装置は外部に電源線や信号線が出ていないためオーバーコアリングによる回収が可能となり、回収したコア（岩・コンクリート・測定装置を含む）を直接見ることができるので、岩盤とのカップリングが良好か否か、今まで判らなかつたボーリング孔内の地下深部における状態を判断することができる。ボーリング孔の掘削は、孔内保護のためベントナイト泥水を使用して孔芯傾斜測定を行いながら掘削を進める。コア（岩）を採取し、岩盤に亀裂はないか地質状況が適切かどうかを判断する。また孔内検層や水位変化を測定し、湧水・逸水を調査して行いが、これまでの測定実験の失敗・成功を通して判ってきたことは、いかに孔曲がりのない掘削をするかである。特に埋設用小ホールの掘削仕上げとオーバーコアリングにおけるセンタリングは重要である。著者がボーリング孔の孔底部をテーパにすることを考案し、その先に埋設用小ホールを掘削することにより偏芯をおこさない埋設孔ができ上がった。このテーパ孔は15度で仕上げることにより測定装置の埋設・設置時における小ホール内への中芯定置を可能にした。このようなテーパ構造にした結果センタリングが飛躍的に良くなった。オーバーコアリング時には、孔径によりケーシング・ロッド・

コアバーレルなどのクリアランスを最小限にセットすることは当然である。測定装置の岩盤へのカップリングを良くするためには、孔内検層や水位測定による湧水・逸水調査だけでなく、埋設予定深度で孔底部にセメントモルタルを充填し、コンクリートのコアを採取することにより、湧水・逸水および虫食いの状態を微細に診断することが大事である。また孔内洗浄は泥水から清水に切り替えての洗浄だけでなく、残留沈殿物を取り除く方法なども提案した結果、深度511 m ボーリング孔においてほとんど同芯円で回収することに成功している。これらは、失敗による経験から得た知識が基になって生まれた成果である。今後はますます深くなるであろうボーリング孔における初期応力測定においては、測定装置を含む新たな開発や掘削技術・オーバーコアリングシステムについてさらなる検討と想定を重ねていき能力を向上させる必要がある。

謝 辞：防災科学技術研究所の池田隆司博士、地震予知総合研究振興会東濃地震科学研究所の青木治三所長、核燃料サイクル開発機構の陸域地下構造フロンティア研究の関係者に、オーバーコアリングのテストサイトの提供や有益な議論を頂きましたことに感謝申し上げます。また、（有）テクノ菅谷の菅谷日出夫氏にはインテリジェント回収型歪計の開発や測定装置の修理に際して種々のアドバイスと議論を頂きました。住鉦コンサルタント（株）にはボーリング孔掘削や測定装置埋設・設置に関して多大なる協力を頂きました。また、査読者の井田喜明教授、岩崎貴哉教授には有益な助言を頂きました。ここに記して関係者各位に感謝申し上げます。

文 献

- 石井 紘・山内常生・松本滋夫・池田隆司、2000、インテリジェント回収型歪計を用いた超深度ボーリング孔における歪観測とオーバーコアリングによる初期応力測定、物理探査学会第102回学術講演会講演論文集、109-113。
- 石井 紘・山内常生・松本滋夫、2001、最新の地震・地殻変動計測システムによる地震前兆現象の検出、月刊地球号外東海地震、No. 33、188-196。
- 松本滋夫・石井 紘・山内常生・窪田 亮、2000a、超深度ボーリング孔における初期応力測定のためのオーバーコアリングシステムと方法について、物理探査学会第102回学術講演会講演論文集、394-397。
- 松本滋夫・石井 紘・山内常生・窪田 亮、2000b、超深度ボーリング孔における初期応力測定のためのオーバーコアリングシステムの開発、東京大学地震研究所技術報告、No. 6、1-9。
- 山内常生・石井 紘・松本滋夫・平田安廣、1998、初期応力測定用メモリー内蔵型歪計の開発、第19回西日本岩盤工学シンポジウム論文集、73-78。
- 山内常生・石井 紘・松本滋夫、2000、超深度ボアホールにおける初期応力測定のためのインテリジェント回収型歪計の開発、物理探査学会第102回学術講演会講演論文集、104-108。