

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

松本滋夫*・石井 紘*・山内常生**・窪田 亮***

Development of Overcoring System in Deep Boreholes for In-Situ Rock Stress Measurement

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

Abstract

We have developed an intelligent type strain meter with sensitivity of more than 10^{-8} . This instrument makes it possible to measure in-situ rock stress in a deep underground if the instrument installed in deep boreholes can be taken out to surface with surrounded rocks by over-coring, though it is difficult.

Therefore, we have developed precise over-coring drilling system to take out concentric core sample including strain meter, grout and rock in deep boreholes more than 500 meters. By applying this system, it became possible to measure in-situ stress in deep places.

Key words : In-Situ Rock Stress, Deep Borehole, Intelligent Type Strain Meter, Overcoring, Drilling System

はじめに

地震予知研究にとって歪計や傾斜計などによる地殻変動連続観測は、特に短期的予知のために必要な観測量である。それに加えて地震発生に直接関連した観測量である初期応力が測定できれば、更に重要な情報が得られる。このような考えに基づいて、東大地震研究所において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可能なインテリジェント回収型歪計の開発を継続している(山内ほか, 1998)。この初期応力測定装置の開発の前に我々は、歪測定可能な高感度の小型3成分ボアホール歪計(石井式歪計)を開発した(石井ほか, 1992)。その後さらに、この歪計とともに新しく開発された傾斜計、温度計、ジャイロ、地震計、加速度計などを搭載したボアホール地殻活動総合観測装置を開発・発展させた

(Ishii and Yamauchi, 1998)。この観測装置は伊豆半島沖の群発地震発生地域に埋設・設置され、観測開始以来発生した三つ(1996, 1997, 1998 年)のすべての群発地震において群発地震発生前と最初の大きな地震発生前の前兆的傾斜・歪変動の観測に成功している(石井ほか, 1998)。これにより異常地殻活動発生地域に非常に近いところでノイズの少ない深部ボアホールにおいて高感度の観測を実施すれば前兆的变化の観測が可能であることを示している。しかしながら実際に地震発生との関連において、更に知りたいのは応力の絶対値とその変化である。ボアホール地殻活動総合観測装置の設置前に設置地点のボーリング孔において初期応力の絶対値の測定ができれば、その後の歪連続観測により応力の変化を知ることができる。このような考えのもと、高感度の小型多成分ボアホール歪計をベースにし、深部ボアホールにおいて応力を測定するための測定計器の開発を進めた。現在、インテリジェント回収型歪計は3号機まで開発(山内ほか, 2000)され基礎実験を重ねている。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, 2000)、その時に生じるコアの歪を精度良く計測することにより、地下深部の多成分の初期応力が高精度に求められることが判ってきた(石

2000 年 10 月 11 日受付, 2000 年 10 月 23 日受理.

* 東京大学地震研究所地震地殻変動観測センター,

** 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,

*** 住鉦コンサルタント株式会社.

* Earthquake Observation Center, Earthquake Research Institute, University of Tokyo,

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

*** Sumiko Consultants Company.

井ほか, 2000)。

インテリジェント回収型歪計の概要

開発したインテリジェント回収型歪計は (A) 地下に埋設する測定装置, B) 地表の制御装置, から構成されている。

以下ではインテリジェント回収型歪計を単に測定装置と記す。この測定装置には、電源用のケーブルや、信号用のケーブルがない。測定装置を使用する場合は、地上において測定装置の頭部を開き、コネクタで測定装置と制御装置とを接続して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。通常は、スケジュールした測定開始時刻から、測定終了時刻まで、1分毎にデータをサンプリングして内部のメモリーに記憶する。この測定装置はCPUを内蔵しており、プログラムを変更すれば、サンプリングの間隔を変更できる。測定装置の1号機から3号機までの構成図を図1に示す。測定装置の概要は1号機が長さ697mm 直径60mmの円筒形の密封型で装置の下部に水平3成分歪計(120度分割)、温度計があり、中央部に増幅器・電気回路・CPU・メモリー部、上部に電源部から構成されている。2号機、3号機と開発を進め、2号機から呼称をインテリジェント回収型歪計とした。2号機の概要は直径42mmと細めにし長さ1,768mmで水平歪計3成分を上段・中段・下段とユニット毎に分け、また鉛直歪計も搭載した。温度計は水平歪計の上段と中段の間にあり、装置中央部に増幅器・電気回路のほか埋設方位を求めるため磁気方位計を内蔵しており、上部には電源部とメモリー・CPU・A/D基板部がある。3号機の概要は、上部と中央部については、2号機とほぼ同じであるが、下部の水平歪計3成分を一つのユニットにまとめ、鉛直歪計部との間に、斜め歪計2成分を設けてある。3号機にも測定装置に内部温度を測定するための水晶温度計(精度 $\pm 0.012^{\circ}\text{C}$)と方位測定装置(精度 $\pm 1^{\circ}$)が組み込まれている。3号機の長さは1,924mm 直径42mmで重量は14kgある。また、これらの測定装置には、外部の制御用システムとの間で制御信号やデータの交換をするためのコネクタが装置最上部に設けてあり、外部に電源線や信号線が出ていないため、測定装置のボーリング孔内への埋設・設置や、オーバーコアリングが容易である。

ボーリング孔の掘削

一般的なボーリング孔の掘削は、ベントナイト泥水を使用して行い、ベントナイト泥水により孔内保孔を行う。また、孔芯のズレに注意しながら10m毎に、孔芯傾斜測定を行いながら掘削を進める。ボーリング孔を掘削後に初期応力の測定を予定した深度のコアを採取し、岩盤に亀裂がないか、地質状況が適切かどうかを判断する。岩盤が軟弱

であれば、条件を満たす岩盤になるまで増掘削を行う。また、逸水や湧水のある地層は、埋設時に配合モルタルとの密着性やその後の硬化状況が著しく悪く、また、岩盤とのカップリングも良くないため、オーバーコアリング時に測定装置を損傷させる。このような地層を掘削する時には、定期的に水位変化を測定し、逸水・湧水を調査することが重要である。この時注意しなければならないことは、逸水・湧水個所が予定している測定装置埋設孔の上の位置にあるのかを確認することが重要である。逸水・湧水個所が埋設孔のかなり上にあるならば、初期応力測定に関して装置に直接影響を与えることがない。

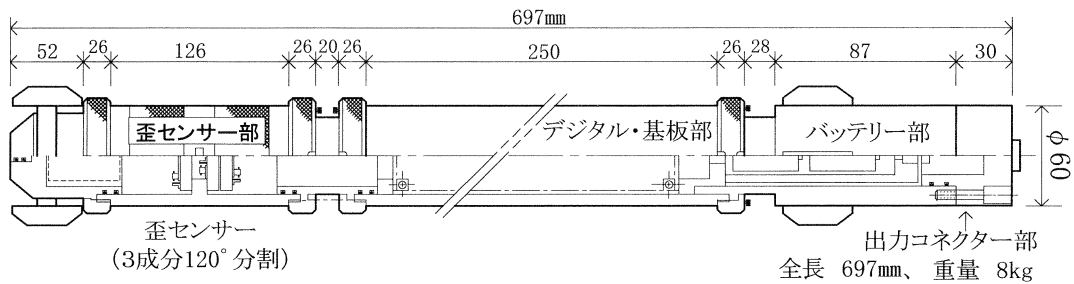
初期応力測定孔(測定装置埋設孔)の掘削

測定装置埋設孔の掘削には、掘削ビット荷重、ロッド回転数などを管理し、かつ孔曲りにしにくい掘削工法を選択する必要がある。埋設条件を満たす岩盤まで達したら、ボーリング孔底に、埋設孔(2号機、3号機用)として小孔径(56mm)、深さ1,700mmのホールを掘削する。埋設孔が孔井の中芯から外れると、オーバーコアリング時に測定装置を損傷させる。そのため考えたのは、ボーリング孔底を角度15度のテーパに仕上げ、小孔径が孔中芯になるように仕上げる。この15度のテーパホールはインテリジェント回収型歪計(2号機、3号機)の上端部に取付けたセントライザー(ガイド)下部テーパが収まるためのものであり、測定装置が傾かず埋設孔の中芯に定置することになる(図2)。また、オーバーコアリングの時の掘削ビット(円筒状)の横振れをなくし掘削ビットの食い込みをより可能にするためのものでもある。埋設孔ができあがった時点で、孔内に残留しているスライムを排除するため泥水から清水に切り替え孔内洗浄を行うが、流体の流速のみで排除しきれない小孔径内の微細な沈殿物を排除するには、スライム採取用ベラー(ピストンベラー)を用いて数回の排除作業を行い、孔井内から泥水、スライムを綺麗に取り除き清水に切り替える。孔内洗浄を丁寧におこない孔壁(岩盤)と埋設時のモルタルのカップリングを良好にさせることが重要である。

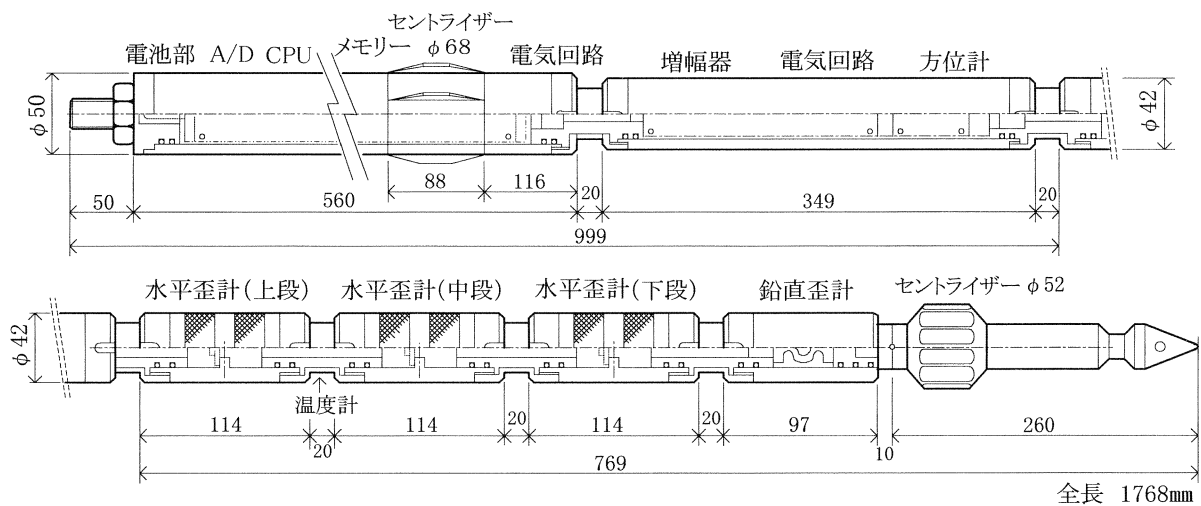
ベラー(配合モルタル置換用) およびダミーテスト

このベラーは、孔底部に配合モルタルを置換するためのもので、パイプ(管)の先端にベラーを取付け、ワイヤーで孔内へ降下させ、孔底部に着底すると先端のベラーが内部に押し上げられた後開き、パイプ内のモルタルが出る構造になっている。本番前に、ベラーの作動試験を地上で行い、正常に作動することを確認する。また、パイプ(管)に取り付けたベラーを孔内へ降下し、孔底(測定装置埋設孔の底部)まで問題なく降下するか、更にベラーが

インテリジェント回収型歪計〔1号機〕



インテリジェント回収型歪計〔2号機〕



インテリジェント回収型歪計〔3号機〕

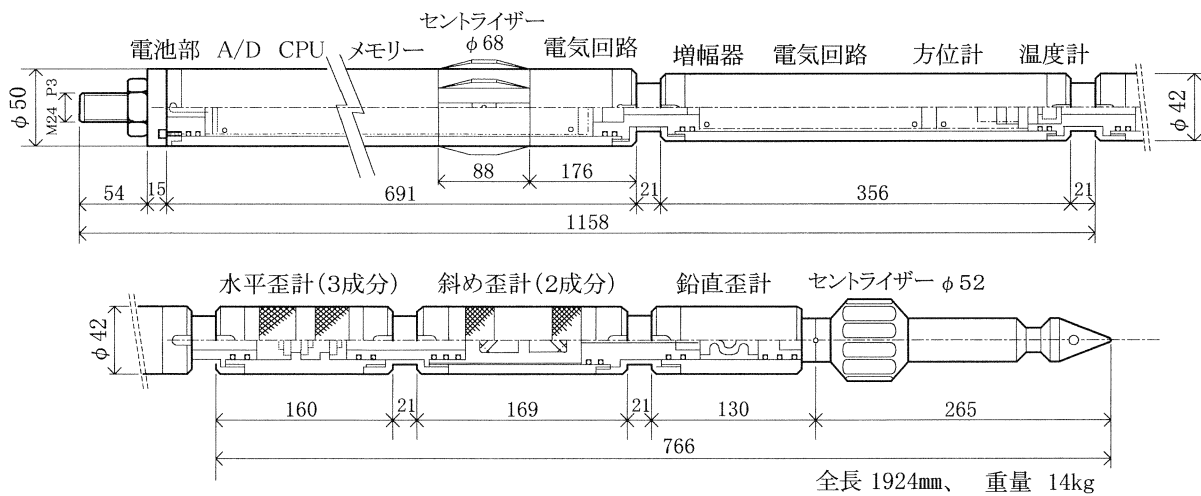


図 1. 初期応力測定用に開発した測定装置 1 号機から 3 号機までの構成図

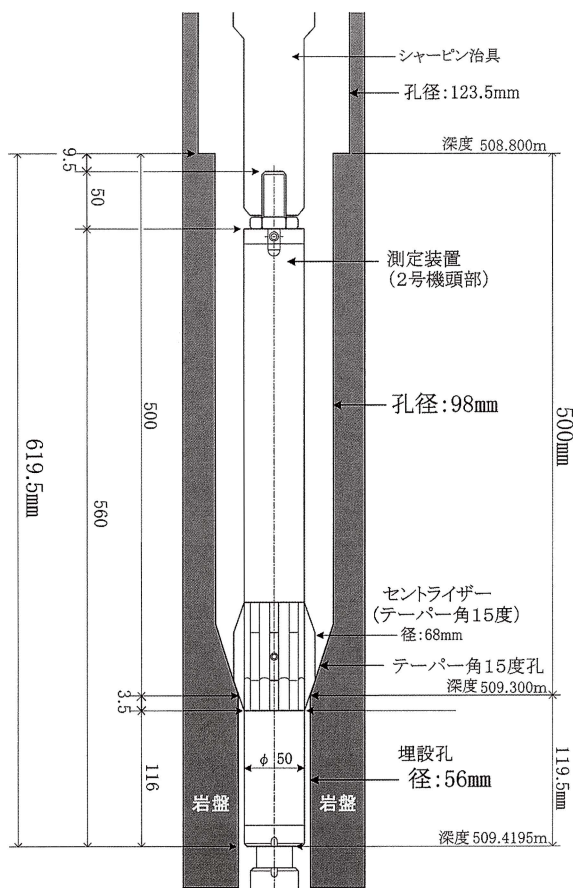


図 2. 測定装置埋設孔の 15 度テーパ部分とセントライザーの中芯定置状態



図 3. 磁気方位計 360 度の出力値測定

孔底部で確実に作動するかを確認する。次に、測定装置が孔内所定の位置に埋設可能であることを確認するために、測定装置と同形状のダミーをワイヤーラインで孔内に降下させる通しテストを行い孔内の状態とダミーによる深度の確認を行う(この時、ワイヤーにマーキングをしておく)。

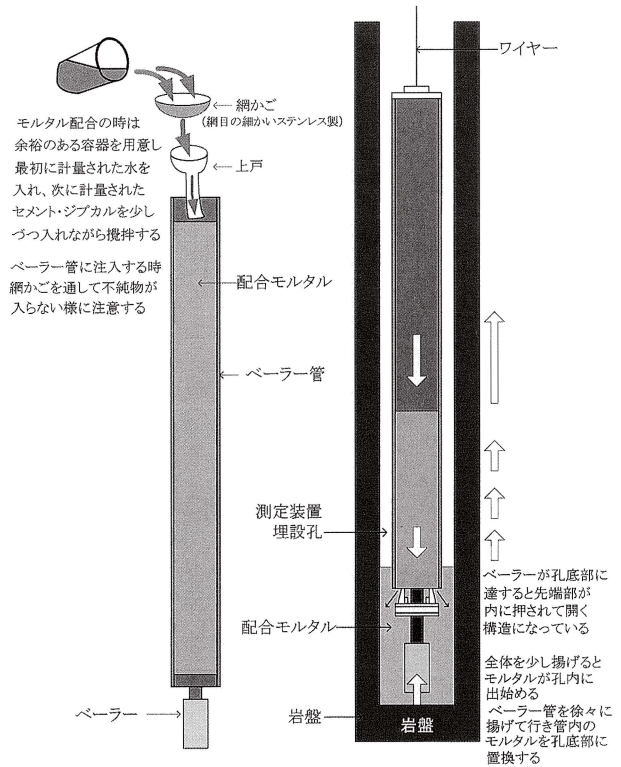


図 4. ベーラーを用いた測定装置埋設孔への配合モルタル置換

磁気方位計の方位測定

測定装置を孔内に埋設する前に、地表において、測定装置を作動させ方位測定台にセットして、回転させつつ360度の出力値測定をしておく(図3)。後に、ボーリング孔の孔底で固着した状態における磁気方位計の出力と、地表で回転させつつ測定した出力値とを比較して埋設・設置方位を求める。

配合モルタル練りおよび埋設孔へのモルタル置換

測定装置を埋設するためのモルタル（セメントミルク）の配合については、今までの経験から、配合比（重量比）を、普通ポルトランドセメント：水：膨張剤（ジブカル）＝1：0.5：0.07 として使用している。配合する前に、使用する水が適正温度であることを確認してから、計量されたセメント・ジブカルを少量づつ入れながら攪拌をする。できあがった配合モルタル（比重：1.8，膨張率0.15%）をベレー管に注入する時は網を通して（不純物を入れないため）注入する。このベレー管をワイヤーで吊るし孔底まで降ろし、埋設用小孔径ホールをモルタルで置換する（図4，図6-1(1)）。ベレー着底は、荷重計およびベレー通し試験時のマーキングにより確認する。配合モルタルの硬化状況を確認するため、サンプルを採取し、水を入れた容器



図 5. インテリジェント回収型歪計（3号機）埋設

に漬けて置く。

インテリジェント回収型歪計の埋設・設置

配合モルタルを孔底内に充填した後、速やかに測定装置の埋設・設置に移る。測定装置（図5）をワイヤーライン式特殊装置の下部に装着してロッド内を降下させ地上部での荷重計およびワイヤーのマーキング位置により孔内15度のテーバーホールにインテリジェント回収型歪計センタライザー位置の着底を確認する（図6-(2)）。これによりモルタル内部への埋設を終えたことになるが、特殊装置と測定装置の接続（シャープピン治具）部分にモルタルが硬化した場合は切り離しができなくなる。それを避けるため、ロッドを少し引き揚げ地上部のロッドにシーリングBOXを取付けロッド内に注水を行い余剰モルタルの排出をする（接続ピン下30 cm ぐらいの位置から上のモルタルを排出）（図6-(2)）。この時、シーリングBOXにステンレスワイヤーを通すため一度ワイヤーを切断し、接続ピンの切り離し時には再度ワイヤーをつないでいたが、現在は開発された器具を使用することによりワイヤーを切断することなく直接注水して余剰モルタルの排出を行っている。

モルタル硬化期間

測定装置の埋設・設置を終え、数日間のモルタル硬化期間を経た後、特殊装置と測定装置を切り離す。これにより測定装置が岩盤内に定置された状態になる。切り離しは、ワイヤーからの引張りテンションが特殊装置に伝達される

と、ピンが自動的にはずれる仕組みになっている（図6-(3)）。ここでのモルタル硬化待機時間は、次の掘削作業（オーバーコアリング）を続けるのに十分な強度が必要である。掘削作業を再開するのに必要な強度は、圧縮強度が 35 kg/cm^2 、引張強度は 3.5 kg/cm^2 と言われている。掘削上の観点から判断すると最低でも24時間以上の硬化待機時間が必要であるが、モルタルと測定装置、岩盤のカップリング状況が悪いと初期応力測定の結果が不十分となる。したがって、硬化待機時間が長いほど良好である。今までの実績から判断すると、オーバーコアリングを行うには最低6日以上モルタル硬化期間が必要である。

オーバーコアリングにより初期応力を測定

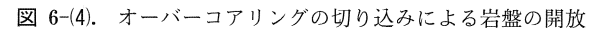
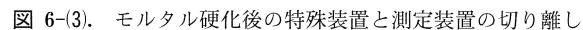
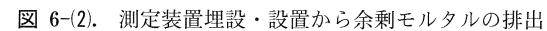
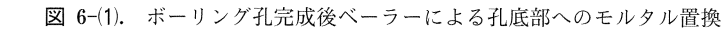
オーバーコアリングは、通常掘削と違い初期応力測定装置の目的を考慮して、慎重な対応が必要となり、可能な限り同芯円での回収が望ましい。オーバーコアリングを精度よく行うには掘削技術・掘削システムの能力も向上させる必要がある。

従来の工法では、深いボーリング孔における測定装置埋設・設置、その後のオーバーコアリングまでの作業において、地上までのロッド揚降管が多く時間がかかりすぎ、ロッドの再降下時にわずかな偏芯をおこす。

現在の特種装置ワイヤーライン工法は一度降ろしたロッドは揚降管をしないで、掘削用ロッドを孔底に置いたまま、埋設孔掘削からオーバーコアリング用掘削ビットの交換ができるため、孔曲りしにくい構造となり同芯円上でのオーバーコアリングが可能となる。また、測定装置の埋設からオーバーコア掘削および回収に至まで、特殊装置ワイヤーライン工法により作業工程を能率よく向上させている。

特殊装置にオーバーコアリング用の掘削ビット（円筒状）およびコアを採取する容器等（以後ここではビットおよび容器を一括してコアパーレルと呼ぶ）を装着する。特殊装置に装着した後、ワイヤーを使用せず、送水圧を利用してロッド内を搬送・降下させる（図6-(4)）。これらのアセンブリーがロッドの先端に達すると、特殊装置の羽根が開いてアセンブリーとロッドが一体化し、掘削ロッドの先端にコアパーレルを真芯にセットできる構造になっている。これにより地上でのボーリングマシンの回転力がロッドを介して先端の円筒状の掘削ビットに伝達されることになる（図6-(4)）。

オーバーコアリングは測定装置を埋設した小孔径ホールの外側の岩盤を包み込むようにして円筒状に切り込む形で行う。なお、切り込み（コアリング）は小孔径の孔軸と完全に一致させる。コアパーレルの先端が特定深度（水平歪計下部の位置）になった時点で切り込みを中断し、コアパーレルを測定装置頭部（硬化モルタル上面より上）の位



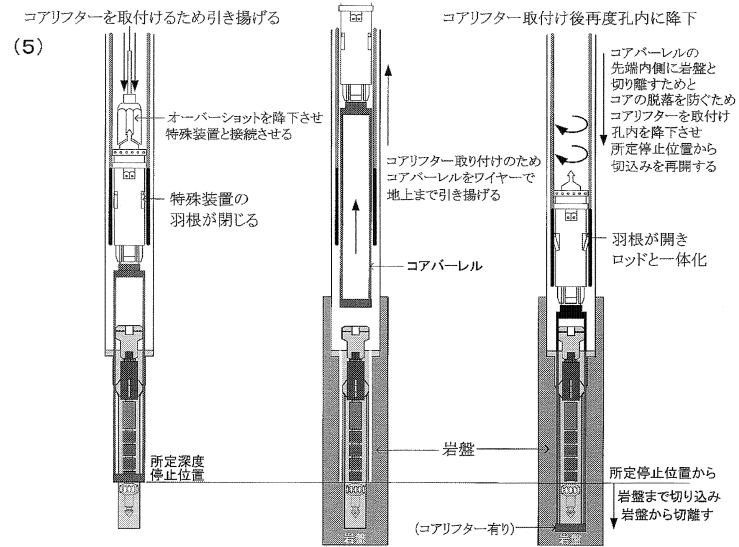


図 6-5. コアリフター取付けのためコアバレルを地上に引き揚げ、再降下

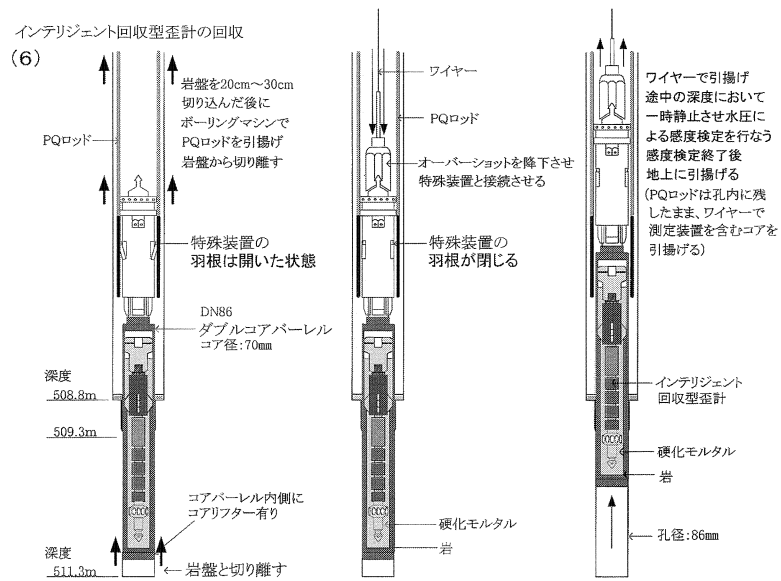


図 6-6. 測定装置の回収と孔井内の水圧による感度検定

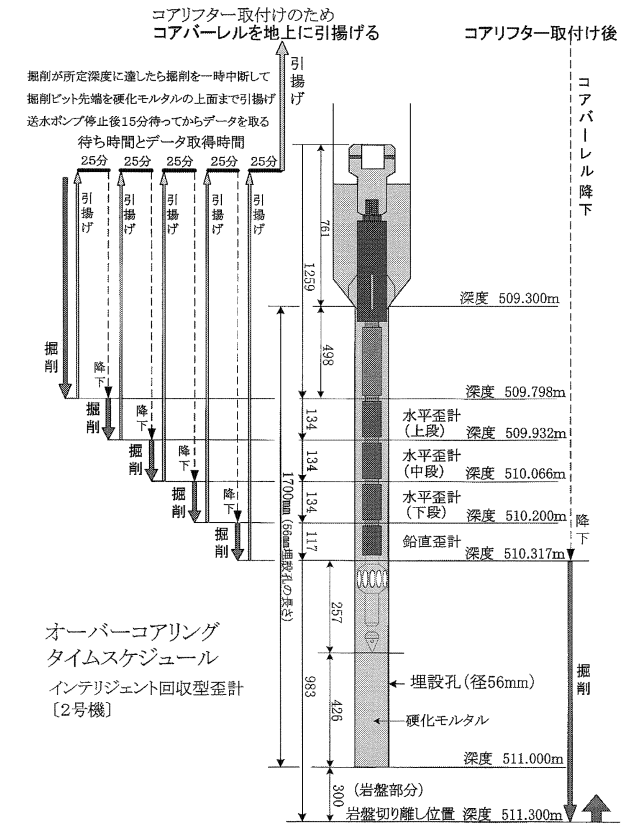


図 7. オーバーコアリング時のタイムスケジュールによる岩盤の応力開放に伴う変動測定と掘削深度

置まで引き揚げ、送水ポンプを止め、コアリングと送水ポンプによる測定装置への歪変化の乱れがなくなるまで15分程度の休止時間を設けて、その後、岩盤の応力開放に伴う変動を10分間測定し、再度コアバーレルを降下させ切り込み作業を再開した後も、各所定深度（斜め歪計下部・鉛直歪計下部）において一時的に切り込みを中断して、コアバーレルを上記の位置まで引き上げて同様の休止時間を設けて変動を測定する（図7参照）。予定した深度まで切り込んで初期応力の開放を終えた後、コアリフターを取付けるため、一度コアバーレルを地上に引き揚げる。この作業工程はアッセンブリーを降下させた工程の逆をたどる。特殊装置の上部はジョイント構造になっているので、ワイヤーライン方式によりこのジョイントをオーバーショットで接続し、特殊装置の羽根を閉じてロッドとアッセンブリーの一体化を解く。これにより、アッセンブリーはロッド内をワイヤーによって高速に巻き上げられて地上に引き揚げられる（図6-(5)）。地上で、コアの脱落を防ぐためのコアリフターを取付けた後、再度、ロッド内を搬送・降下させ、予定深度まで達してから岩盤を切り進んだ後、岩体と切り離し、測定装置を含むコアをコアバーレルに収納する（図6-(6)）。

インテリジェント回収型歪計の回収と感度検定

コアバーレルに収納された測定装置を含むコアは、ステンレスワイヤーで地上に引き揚げる際、100m程度引き揚げた状態で、孔井内に静止させ、歪計の出力が安定するまで待機しデータを取り込む。その後も、測定装置を含むコアを必要深度において引き揚げを一時的に静止させ、孔内に充たされている水の圧力を利用して測定装置の感度検定を実施する。地上に回収されたコアバーレルからコア（岩・コンクリート・測定装置の一体物）を取り出す時に、測定装置へ衝撃を与えないように現在は手動ポンプを用いて水圧でコアバーレル内からコアをスムーズに取り出している。その測定装置を含むコアの岩の剝離を避けるためコアにテーピングをした後、ステンレスワイヤーで吊るし、再度、孔内に降下させ、必要深度に停止させ感度の検定を行う。これらの操作を繰り返し、時間をかけて地上に引き揚げる。地上に回収されたコア頭部の岩盤やコンクリートを取り除き、測定装置の頭部を開けて、制御装置をコネクターに接続して測定装置内部のデータを制御装置に伝送する（図8）。最後に、コアからインテリジェント回収型歪計を取り出す際は、コア外側の岩を縦方向にコアカッターで切り、岩とコンクリートを丁寧に剥がしていく（図9）。現在までインテリジェント回収型歪計のオーバーコアリングの最深は2号機を用いて行った深度511mでありほとんど完全な同芯円で回収することに成功している（図10は1号機による509mボアホール）。このような試みは精度よ



図 8. 測定装置からデータ伝送

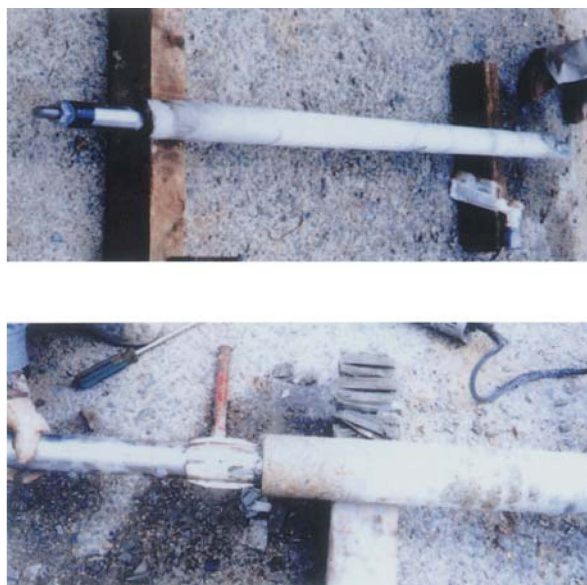


図 9. コアから測定装置の取り出し

いオーバーコアリングシステムの開発により可能になった。

ま と め

著者らは、地下深部でも応力開放法により初期応力の測定ができるインテリジェント回収型歪計を開発した。この測定装置を用いての深部ボーリング孔におけるオーバーコアリングは、今まで世界的にも前例がなく、初めてのことが多いので困難な問題もあったが、何回かの現場実験の経



図 10. 509 m ボーリング孔から回収された同芯円のコア（インテリジェント回収型歪計 1 号機使用）

験を積みながら開発を進めてきた。測定装置の埋設・設置時における埋設小孔径ホールへの中芯 positioning 方法、オーバーコアリング掘削過程のタイムスケジュール設定による応力開放、その後の測定装置の回収方法、感度検定、測定データのパソコンへの伝送とその解析までの一連の作業が順調に行えるようになった。また、測定装置に斜め歪計も製作でき、歪計の成分を多くすれば、1 回のオーバーコアリングで 3 次元の応力状態を求めることができる。このような試みは初めてであり、今まで不可能であった地下深部での応力開放による測定が可能になり、このような測定システムを完成させることは重要である。現在、解析や処理ソフトも含めた初期応力測定システムの確立も目指している。

謝 辞：本研究を進める際には、防災科学技術研究所の池田隆司博士、地震予知総合研究所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種々の助力を頂いた。また、インテリジェント回収型歪計開発製作にあたり(有)テクノ管谷の関係者、特に菅谷日出夫氏には多大なる協力を頂いた。記して関係者各位に謝意を表す。

文 献

石井 紘・松本滋夫・平田安廣・山内常生・高橋辰利・鈴木喜吉・渡辺 茂・若杉志雄・加藤照之・中尾 茂, 1992, 新しい

小型多成分ボアホール歪計の開発と観測, 物理探査学会第 86 回学術講演会講演論文集, 32.

石井 紘・中尾 茂・松本滋夫・平田安廣, 1998, ボアホール地殻活動総合観測装置で観測された伊豆半島東方沖群発地震の前兆的地殻変動, 地下深部における地殻変動連続観測に向けて, 研究会集録, 47-51.

Ishii, H. and T. Yamauchi, 1998, Multi-component Borehole Instrument for Earthquake Prediction Study and Its Application for Rock Mechanics. Proceedings of International Workshop on Frontiers in Monitoring Science and Technology for Earthquake Environments, W 2-5, 1-6.

石井 紘, 1998, 地震予知研究のためのボアホール地殻活動総合観測装置と岩盤工学への応用, 第 19 回西日本岩盤工学シンポジウム論文集, 3-10.

石井 紘・藤森邦夫・向井厚志・中尾 茂・松本滋夫・平田安廣, 1998, 深度 800 m のボアホールにおける地殻活動総合観測装置, 月刊地球号外 断層解剖計画, No. 21, 14-20.

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.

松本滋夫・石井 紘・山内常生・窪田 亮, 2000, 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.

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.