



# 東京大学地震研究所 ニュースレター

2006年 3月号



写真1: 地震研究所の新しい研究棟(写真右: 1号館).  
これまでの本館(写真左奥)は2号館, テレメータ棟(写真左手前)は3号館  
と名称が変わった

## 目次

### 今月の話題

- ・ 地震研究所新研究棟竣工

### 第836回地震研究所談話会

## 今月の話題

### 地震研究所新研究棟竣工

地震研究所には教職員約120名に加え研究院や大学院生など総勢200名以上が在籍し、1960年代に建築された本館と1997年に建築されたテレメータ棟でそれぞれ研究活動を行ってきました。しかしながら、教職員の数に比べ占有面積が狭隘であることに加え、本館の老朽化もあいまって、新しい研究棟の建設をかねてから要望してきたところ、関係各方面のご理解を得て、平成18年3月に鉄筋コンクリート造地上7階建て（地下はなし）の新研究棟がPFI事業により完成しました（これに伴い新研究棟を1号館、旧本館を2号館、テレメータ棟を3号館としました）。

地震研究所は全国の9つの大学と気象庁ならびに（独）防災科学技術研究所と協力して全国の高感度地震観測データを通信衛星経由で収集し、全国の研究者向けに通信衛星で配信しています。また、関東甲信地方の地方自治体が保有する強震動データを収集してデータベース化し、地盤の強い揺れの影響の調査研究を行う研究者に提供しています。このような定常的なデータの収集といった中枢機能を有しているだけではなく、被害を伴うような地震や火山噴火が起こった場合には国内の研究者と連携して直ちに実態調査やその後の活動の推移の把握のために臨時に観測を実施するなど、緊急時にも地震や火山に関する調査観測研究の中枢機能を果たす役割を持っています。このような地震観測研究の中枢機能が大地震の際にも損なわれないよう、新研究棟は免震機構を採用し72時間電力供給可能な非常電源施設および7日間給水可能な貯水設備を備え、たとえ首都直下で地震が発生しても関係機関との連絡、地震活動の実態解明や情報発信が継続して行える危機管理対応が可能な建物として建設されました。

所要の準備を経て、5月の連休以降、約半数の教職員・学生が新研究棟に移動して心新たに研究活動を進めていくことにしています。なお、実験系を中心とする約半数の教職員と学生は引き続き2号館を使用するため、平成18年度に耐震補強工事が行われます。

（アウトリーチ推進室）

\* P F I（Private Finance Initiative）事業：公共施設等の建設、維持管理、運営等を民間の資金、経営能力及び技術的能力を活用して行う新しい手法（内閣府ホームページより）



写真2：地震研究所1号館 正面入り口

## 第836回地震研究所談話会

### 話題一覧

堆積物に残された過去 6000 年間の三陸海岸大槌地域の津波と地殻変動の履歴

原口強 (大阪市立大学大学院理学研究科)、島崎邦彦

強震動計算のための動力学破壊伝播シミュレーション

青地秀雄 (BRGM)、井出哲 (東大理)、宮武隆

再考?1944 年東南海地震?

山中佳子

☆信頼性の高い地殻応力測定法の開発について

佐野修・中谷正生

衛星データによる火山の赤外観測システムの開発

金子隆之・安田敦・高崎健二・青木陽介・古屋正人

次世代の海底ケーブル地震観測研究のためのシステム開発

金沢敏彦・歌田久司・佐野修・塩原肇・篠原雅尚・森田裕一・酒井慎一・山田知朗

地震観測網の高度化および最適化

金沢敏彦、観測センター

建物用 IT 強震計システムの開発と今後の展望

鷹野澄、伊藤貴盛 (応用地震計測 (株))

跡津川断層における応力集中過程の解明を めざして

飯高隆・加藤愛太郎・蔵下英司・岩崎貴哉・平田直

神岡レーザー伸縮計の長期連続観測のための施設整備

新谷昌人・高森昭光、大橋正健・三代木伸二・内山隆 (宇宙線研究所)

防災研究フォーラムの活動

山岡耕春、藤田英輔 (防災科研)

SMAC・DC 型強震計記録のフィルム化と画像化

工藤一嘉、古地震・古津波記録委員会

海半球センターの外部評価と将来計画について

川勝均

☆は次ページ以降に内容を紹介しています。



# 地殻応力の絶対量を高い信頼性で求めるための応力測定法に関する開発研究

佐野 修<sup>\*1</sup>・中谷正生<sup>\*1</sup>

所外協力者 伊藤高敏<sup>\*2</sup>・伊藤久男<sup>\*3</sup>・平田篤夫<sup>\*4</sup>・水田義明<sup>\*4</sup> ほか

1 地震研究所 2 東北大学 3 海洋研究開発機構 4 崇城大学

「地殻応力の絶対量を高い信頼性で求めるための応力測定法に関する開発研究」は、所長裁量経費として平成16年度に1910万円、17年度に720万円という高額の予算を頂いております。予知計画で行っている大型プロジェクトへの追加投資という位置付けです。中谷さんには、コメント役ということで入ってもらっています。

所長裁量経費の計画書で掲げた目標は、地殻応力を高い信頼性で求める手法の開発です。具体的には、新たな手法であるポアホールジャッキ式応力測定プローブの高度化と、水圧破砕法の問題点に関する議論に決着をつけたいということで提案しました。さらに、地殻応力の測定法の高度化によって、外部資金導入のための新たなプロジェクトを地震研究所内で将来立ち上げたい。例えば、ひずみ集中帯内外の応力値とその圧力の変化量を高精度で測ることができれば、新たなプロジェクトになり得ると期待しています。

## 同じ亀裂を対象にした複数手法の比較試験

まず、高い信頼性の応力測定システムの開発が今なぜ必要かという観点から、簡単に整理します。地殻応力は、地震予知研究における重要な測定量の一つです。しかし、深部ポアホールを利用した地殻応力測定法の主力である水圧破砕法には、問題点が指摘されています。水圧破砕法では、ポアホールの一部に水圧をかけて岩盤を破碎し、生じた亀裂を水圧で再開口するときの圧力、閉じるときの圧力、亀裂の方位から応力状態を

求めます。この手法の問題点は20年前からしばしば指摘されてきましたが、いまだ決着していないのです。

本研究は予知研究を目的としていますので、500m以上の深いボーリングが必要であると計画書に書きました。しかし、それだけで1億円ほどかかります。今回は測定法の開発のみに絞り、地下空間からの浅いボーリングのみとすることで、予算を圧縮しました。

新たな手法の開発と同時に、水圧破砕法の比較試験を行いました。まず、従来型の水圧破砕法で岩盤内に亀裂を作ります。その亀裂をほかの手法で再開口します。また、水圧破砕法ではコンプライアンスが重要という指摘が、東北大学の伊藤高敏さんからなされています。そこで、CompliantなシステムとStiffなシステムの二つも比較しました。

Stiffシステムは、ステンレスチューブのみの配管で構成されています(図1右)。一方、Compliantシステムは200mの油圧ホースをつないで水圧破砕を行います(図1左)。普通の水圧破砕法では500mから1kmの油圧ホースを地下に伸ばしますが、そのシミュレーションを行ったわけです。

複数手法による相対比較はこれまでに何度もやられてきたはずなのに、今なお決着していない問題になぜ答えることができるのか。その質問に答えておかなければいけないでしょう。一般論として、測定原理が異なると観測方程式レベルの比較がまったくできない。それが普通です。しかも、まったく同じ地点で複数の手法を実施することは、極めて困難です。したがって、

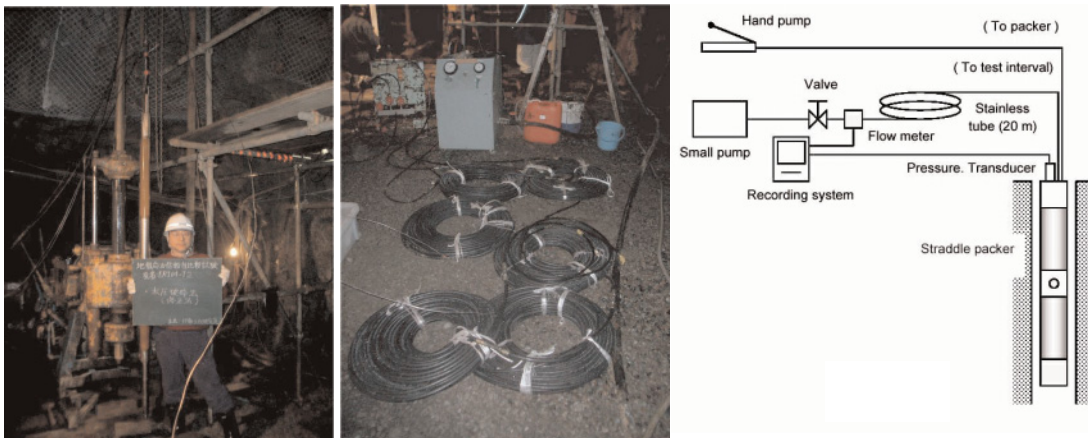


図1：Compliantシステム(左2点)とStiffシステム(右)

複数手法で得られる結果の違いが岩盤の不均質性の影響ではないかと言われると、そこで話が止まってしまうがちです。それに対して今回は、まったく同じ亀裂を複数の手法で再開口し、観測方程式レベルの比較をするという提案です。

再開口圧 (Pr) については、式 (1) が成り立つと考えられています。

$$Pr = 3Sh - SH - Pp \dots\dots (1)$$

SH は水平面内最大主応力値、Sh は最小主応力値、Pp は空隙圧の項です。これに対して、亀裂の開口部に作用する水圧は、ボアホールに水圧を加えている最中から連動して増加しているという説があります。その場合、式 (2) になります。

$$2Pr = 3Sh - SH \dots\dots (2)$$

さらにまた、従来型の水圧破碎法はコンプライアンスが大きすぎて、水圧変化の非線形開始点により定義される再開口圧は真の再開口圧ではなく、むしろ亀裂閉口圧に等しいという指摘があり、その場合には式 (3) が成り立ちます。

$$Pr = Sh \dots\dots (3)$$

式 (3) が成り立つ場合は、原理的に未知数が解けないという問題になります。一方、水を使わず金属で押すボアホールジャッキ式では、式 (4) が成り立ちます。

$$kPj = 3Sh - SH - Po \dots\dots (4)$$

ただし、k は後で述べる感度係数、Pj はジャッキ圧、Po は空隙圧です。

図2は新たに開発したボアホールジャッキ式応力測定プローブで、内部に小さな油圧ジャッキがあります。Pjは、そのジャッキ圧です。加圧すると亀裂再開口部に引張応力が発生します。式(4)のkは、引張応力とジャッキ圧の比で定義される感度係数です。式(1)から(4)を見ると、右辺は基本的に同じです。ボアホール周辺には、さまざまな不均質性の影響がありえます。例えば、主応力方向が回転するかもしれないし、主応力の値も変わるかもしれない。そのため、測定位置が異なると、不均質性の影響の評価から逃れることができません。しかし今回の実験手法では、まったく同じ亀裂を対象ですから、基本的には不均質性の影響は全部右辺に含まれます。すなわち、左側の測定量だけを比較すればよいことになります。

試験を実施するに先立ち、所外の協力者も全員集まって想定リスクをいろいろ考え



図2：ボアホールジャッキ式応力測定プローブ

ました。おそらく最悪のケースは、式(4)が仮に成り立つとして、水平面内最大主応力値SHと最小主応力値Shが1対2、つまり $2Sh = SH$ の場合です。式(2)と式(3)のどちらが正しいのか判定できなくなるからです。また $3Sh < SH$ の場合、水圧破碎亀裂が閉じないので、そもそも水圧破碎法そのものが評価不能になります。過去の測定例と想定リスクを検討し、おそらく大丈夫と判断しました。

### ボアホールジャッキ式による応力測定

図3は、水圧破碎法のStiffシステムとCompliantシステムの比較実験例です。左の図は、鉄管の中で行ったコンプライアンス・キャリブレーションで、水量に対する水圧の上がり方に数十倍の違いがあります。すなわち系のコンプライアンスが数十倍異なることを示しています。右の図は、再開口試験の例です。直線から非線形になるところで再開口したと判断されます。T1孔の深度12.5mの場合、Compliantシステムでは再開口圧は6MPaくらいです。ところが同じ亀裂を

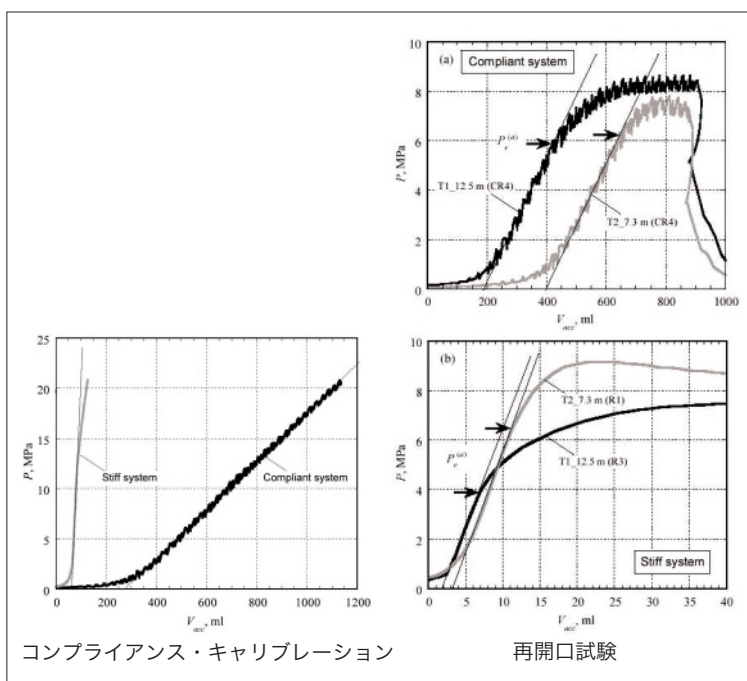


図3：StiffシステムとCompliantシステムの比較実験



Stiffシステムで開くと、再開口圧は4 MPa以下が得られます。すなわち水圧破砕という同じ原理の方法でも、剛性が違うと再開口圧が変わっています。

水を使わないボアホールジャッキ式で得られた結果を示したものが、図4です。この結果は昨年までに得られたものです。横軸がボアホールジャッキ式で決めた再開口圧で、縦軸は複数の手法で得られた再開口圧です。青い丸がStiffシステムの再開口圧、水色の丸が従来型水圧破砕法の再開口圧です。式(2)が成り立つ場合は2倍したものと比較する必要があるので、再開口圧を2倍したものをそれぞれ四角でプロットしました。見てお分かりのように、ボアホールジャッキ式で決められた圧力と、青い四角が比較的良好に合っています。つまり、高剛性のStiffシステムで得られた

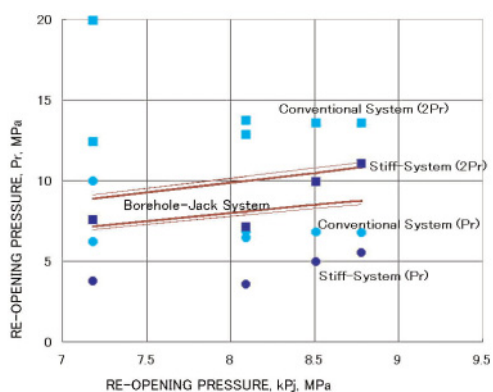


図4：再開口圧の比較

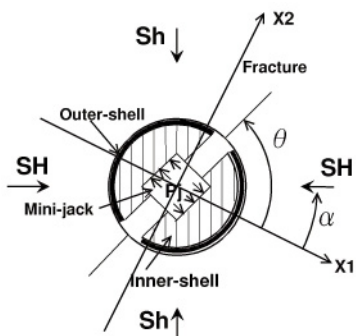


図5：ボアホールジャッキ式応力測定プローブの概念図

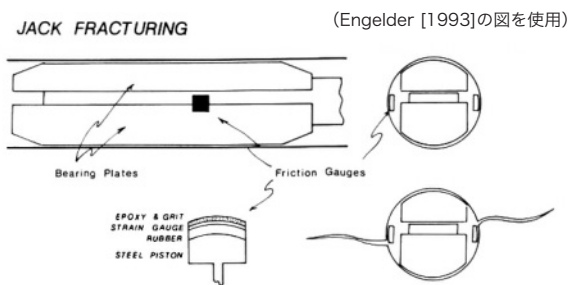


図6：De la Curz [1977]の応力測定プローブ

再開口圧の2倍とボアホールジャッキ式の再開口圧がコンシステントである。去年の所長裁量経費で、ここまでの結果が得られました。

これで20年来の論争が決着するかと言いますと、実は、残念ながらまだです。従来型の再開口圧とStiffシステム再開口圧の2倍の差が小さ過ぎるため、ボアホールジャッキ式の結果に20%の誤差があると判別が不能です。実は、想定リスク(2Sh=SH)の条件に近かったためです。

### 誤差を1桁減らそう！ ——弾性率・COD精度・カップリング

想定リスクの条件に近かったならば異なる応力状態のテストサイトを探すというのが、一つの選択肢です。もう一つは、測定結果に含まれる誤差を1桁減らす。後者は、ボアホールジャッキ式の応力測定法の高度化です。本来の趣旨と合致するという事で、今年度は後者を徹底的に検討しました。

誤差の原因と考えられるのは、まず、測定結果に及ぼす岩盤の弾性率の影響です。弾性率が変わると感度係数が変わります。二つ目は、COD (crack opening displacement；開口変形率)の測定精度です。再開口圧はCODの測定結果から決めていますから、その測定精度が悪ければ、再開口圧の精度も当然落ちます。そして、これが一番大きいのですが、測定プローブと岩盤壁面のカップリングの影響です。これらの改善について徹底的に検討しました。

図5は、ボアホールジャッキ式応力測定プローブの概念図です。ジャッキが上下に動く鉄の塊が岩を押して、図中のボアホール壁面の左右の中央部付近に引張応力が発生します。数値解析によると、岩盤弾性率が2倍違うとプローブの感度係数が15%ほど変化するので、補正しなければなりません。私たちが開発しているボアホールジャッキ式応力測定プローブは、Goodmanが考案した変形率計測システムを図6に示したようにDe la Curz [1977]が応力測定に転用したものをベースにしています。ルーツにさかのぼり、再開口圧測定に伴うボアホールの変形を測って岩盤の弾性率を決め、補正すれば精度が上がるでしょう。弾性率に対しては、これで解決と考えています。

次に、CODの精度向上です。亀裂の開口部にセットするCOD計測装置はサブミクロンの分解能が必要ですが、これを測定プローブのどこかに固定しなければなりません。問題は、固定している部分がジャッキと連動して動くことです。図7は、実際に岩盤で計測されたデータで、横軸がジャッキ圧、青がCOD、緑がボアホール直径変化です。CODが折れ曲がって

る辺りで亀裂が開いているはずですが。変形量を見ると、せいぜい数ミクロンです。ところが、ボアホールの直径は数十ミクロン動きます。数値計算結果も、ボアホール直径の変化量と COD が 1 桁違うことを示しています。センサーをどこかに固定しなければならないのですが、その固定している位置が測定量より 1 桁大きく動いても計測可能な装置が必要です。

ジャッキ設計の専門家には上下にピストンが動くようなジャッキは不動点が存在しないため機能しないと言われましたが、全体として固定できればよいと考え、両側に向けてピストンが動くように変更した結果、中央部がほぼ固定されました。図 8 右は、花崗岩の中に入れて計測した例です。先週現場から帰ってきたばかりで、プレリミナリーな結果ではありますが、ピストンが上下にほぼ等距離動いていることが分かります。図 8 右の写真は、測定中の計測表示画面です。左側が COD 記録で、横軸は約 10 ミクロンです。圧力が高くなると左側に急激に動いていますが、このとき亀裂が伸びています。さらに除荷時に変形率、すなわち傾きが変わっています。理論的に予測される通り、弾性率が低下していることが分かります。このように、サブミクロンの分解能で安定して測れるようになりました。

次の問題が、カップリングです。これが、一番重要です。チタン鋼とクロムモリブデン鋼でできたプローブと岩盤ボアホール壁面のコンタクト条件をいかに制御するか、という問題です。図 8 左は、設計よりも直径が 1mm 大きいボアホールに入れた例です。完全に密着しているように見えますが、隙間に 1 万円札が入っています。緑の方は 20 ミクロンほどすき間が開いているということです。すなわち、応力測定プローブと岩盤壁面の密着範囲は見た目より小さく、応力分布もすべて密着している状態とは異なるはずですが。

密着範囲をどこまでコントロールできるかを明らかにすることを目的として、図 9 右に示すような配置で歪ゲージをはったステンレスの薄板を用意し、加圧シェルと加圧プレートとの間に薄板を挿入してカップリングをさまざまに変化させた加圧試験を実施し、計測量と数値解析結果の比較しました(図 9)。

図 10 の実線は計算結果で、丸

で示したものが実験結果です。ただし対称問題なので 90 度の範囲だけ示しています。赤の実線は 80 度、青は 70 度、緑は 60 度、黄色は 40 度密着した場合の数値解析結果です。左図はカップリングが密着範囲 40 度以下、右図はカップリングが 70 度の場合です。重要なのは亀裂開口部なので、0 度付近に着目して下さい。丸で示された計測結果と実線で示された結果は 0 度付近に着目すれば、左図で 40 度以下、右図で 70 度という設定とそれぞれよく合っています。

このように密着領域が制御可能であることが分かりましたが、深さ 500 m あるいは 1000m というボアホール内で設計した通りのカップリング状態になっているか、どうやって確かめるのかという問題が残ります。そこで、カップリング条件の変化に伴う応力測定プロ

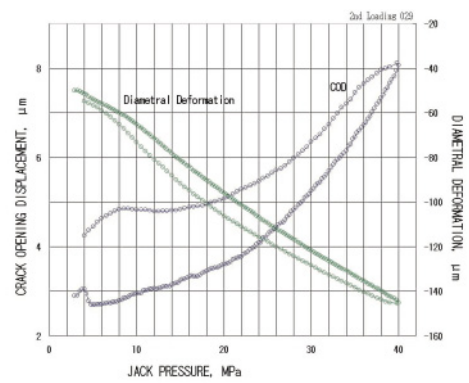


図 7：ボアホール直径および COD の変化とジャッキ圧の関係

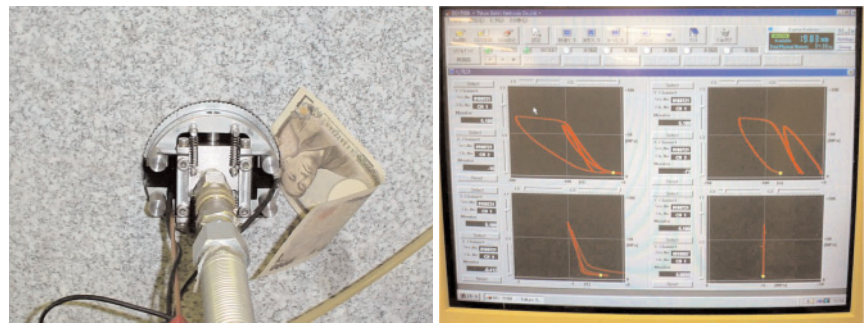


図 8：ボアホールジャッキ式応力測定プローブによる花崗岩計測例(室内実験)

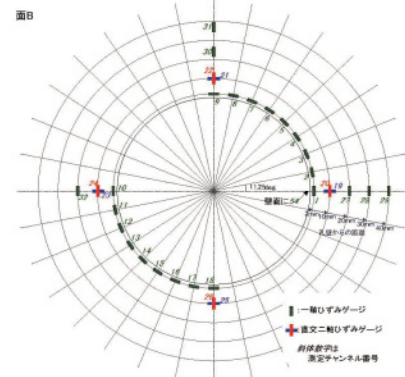


図 9：カップリング条件を変化させた加圧試験



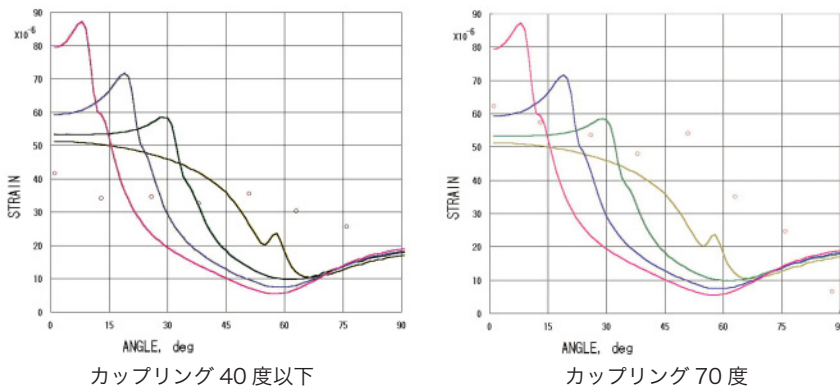


図 10 : カップリング条件の変化に伴うボアホール孔壁近傍の円周方向のひずみ

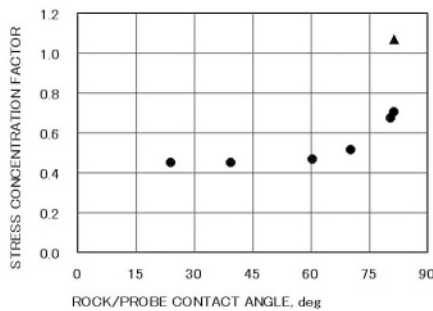


図 11 : カップリング条件の変化に伴う  
応力測定プローブの感度係数の変化 (数値解析結果)

ープの感度係数の変化を解析しました (図 11)。横軸が天頂部からの角度、縦軸が感度係数です。天頂部から密着している角度が大きくなると、感度が上がります。また 60 度以下では感度がほぼ一定であることが分かります。したがって、密着領域を 60 度以下程度に設定すれば、測定の信頼性が高くなります。しかし、破碎時は引張強度だけ高い圧力が必要なので、感度係数が高い方が望ましいのも確かです。すなわち、できるだけ感度係数が高い状態を実現すればよい。破碎時のデータは解析に使用しないので、割れさえすればよいのですから、実際のカップリング状態がどうであったかは計測精度に影響しません。再度確認しますと、引張強度分だけハイパワーが必要な破碎時は右端の条件を採用して破碎し、再開口時は 60 度程度にすればよい。これが、重要な結論です。

### まとめと今後の展望

平成 16 年度には、高剛性水圧破碎試験結果とボアホールジャッキ式応力測定プローブの結果に良い一致が認められました。また、論争の決着にはボアホールジャッキ式応力測定プローブの精度向上が必要であることが明らかになりました。

平成 17 年度の実験が終わったばかりなので、ここに示した結果はまだプレリミナリーなものが多いので

すが、応力測定プローブ内に不動点を作ったことにより、COD 計測の精度および再現性が格段によくなりました。また、岩盤の弾性率の問題は同時に計測するボアホール変形量に基づいて補正できること、カップリングの問題は破碎時のみハイリスク高出力で、再開口時には一定の出力条件で実施すればよいことが明らかになりました。

この 2 年で、応力測定プローブの信頼性が格段に高まったと考えています。今後の展望としては、応力測定プローブを深部を持って行くための技術開発が必要ですが、ボアホール内の回転機構を除けば、既存の技術の中から探すことができます。ピストン形状を工夫することによりハイパワーにすることもできます。計測機構や加圧装置は、東北大学伊藤高敏グループの高剛性水圧破碎法のダウンホール化と共通です。

### 質疑応答

— 最終的な実用化、決定版はどういうもので、いつごろになりますか。

佐野：決定版を作る前に、原理がうまくいくかどうかを今まで徹底的にやってきました。同時に本当に新しい応力測定システムを作る必要があるのかという疑問に答えることも必要と考え、水圧破碎法の問題を明らかにするための研究、この 2 点を実施してきました。

深部対応のための技術のほとんどは、すでにあります。計測機構や加圧装置については、伊藤高敏さんのグループも活発に動いています。工場試験までできていると聞いています。あとは、ボアホール内回転機構だけ。これも、そんなに難しくないと思います。あとは、予算があれば。

— 地震予知研究計画への追加投資として所長裁量経費を配分したので、現在の研究計画はあと数年で終わります。それまでには、一通りの結果が出ますか。

佐野：深いボアホールを掘らないと測れないのは事実ですから、なんとかしたいと考えています。跡津川断層近辺で他機関などが掘削したボアホールを調べて、対応可能なものを探しているところです。



東京大学地震研究所ニュースレター

発行: 東京大学地震研究所広報委員会

〒113-0032 東京都文京区弥生1-1-1

電話・FAX: 03-5841-5643

電子メール: [outreach@eri.u-tokyo.ac.jp](mailto:outreach@eri.u-tokyo.ac.jp)

ホームページ: <http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/index-j.html>

著作権所有: 東京大学地震研究所 2005

Copyright 2005 Earthquake Research Institute, University of  
Tokyo, All rights reserved