

(52) 孔内簡易打撃応答試験機の開発と適用 (その2)

東京電力(株) 正会員○野沢 是幸, 正会員 鈴木 英世
東電設計(株) 正会員 菊地 宏吉, 正会員 藤枝 誠
応用地質(株) 正会員 曾根 好徳

Development and Experiment of New Borehole Impact Test Instrument (part 2)

Yoshiyuki NOZAWA, Hideyo SUZUKI (The Tokyo Electric Power Co., Inc.)
Kokichi KIKUCHI, Makoto FUJIEDA (Tokyo Electric Power Services Co., Ltd.)
Yoshinori SONE (OYO Corporation)

ABSTRACT

The authors have developed New Borehole Impact Testing Instrument (named Borehole Hammer by the authors) for evaluation of rock properties using principles of rebounding behavior and propagation of elastic waves by means of small hammer built in a probe, as mentioned at this symposium of 1988. Theoretical background of this testing instrument and its experiment are reported in this paper.

As the results of the experiment, P_{max}/W , which is defined as the ratio of peak acceleration and time length of the small hammer's response behavior, is a sufficient index for estimating the properties of the borehole wall materials.

Also, as the results of theoretical study, P_{max}/W is proportional to the modulus of the elasticity of the rock; that is

$$P_{max}/W = -1/\pi \cdot V_0 \cdot k/m$$

where V_0 is the impacting velocity of the hammer, m is the mass of it and k is spring constant of the rock which is considered as a spring. Shown in this expression, P_{max}/W is also proportional to V_0 . It is necessary to know the value of V_0 , and correct the value of P_{max}/W by using the value of V_0 . Borehole Hammer is being improved on this point, and new index [$P_{max}/(W \cdot V_0)$] is adopted.

After accumulating further data for estimating the properties of rocks, it will come to be more reliable and firm method in the near future.

1. はじめに

著者らは、多量の地質データを精度よく定量的に把握できる岩盤物性簡易試験機の開発を目的として、ブローブ内に収納した小型ハンマーによるボーリング孔壁打撃時の反発現象と、孔壁に沿った弾性波の伝播現象に着目した孔内簡易打撃応答試験機を開発している。昨年のこのシンポジウムで試作機の開発と適用について一部報告(文献1)したが、今回はその後蓄積した試験結果を示すとともに、この試験機(ボアホールハンマーまたはBorehole Hammerと呼ぶ)によって得られるデータの物理的な意味の考察と、その考察の結果を採り入れた試作機の改良について、孔壁打撃時の反発現象を中心に報告する。

2. 試験機開発の概要

詳細は文献1~4に示してあるので、ここではその概要のみを示すことにする。

(1) 試験機の概要

試作試験機の主要機構部及びシステムの概念を図-1に示す。図に示すとおり、当試験機はボーリング孔内に吊り下げる孔内挿入部と地上の打撃制御及びデータ処理ユニットとに大別される。孔内挿入部に収納されている機構は、駆動回路、加速度センサを組み込んだ電磁ハンマー(打撃部)、孔壁を伝播する波

動を受信する2ヶの加速度計（弾性波速度測定部）並びに孔壁への固定装置である。弾性波速度測定部は打撃部が点の情報しか捉えられないのを補う目的で取り付けたものである。地上計測部は打撃の制御、受信加速度波形の増幅、データの記録等の機能を有している。

(2) 打撃部に関する実験

図-2に円柱供試体の上面打撃により得られた応答波形の模式図を示す。

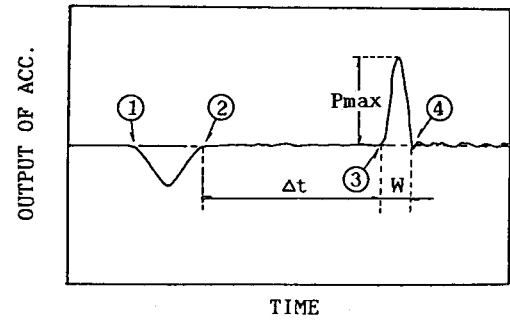


図-2 打撃応答波形の模式図

材料特性を表す指標としては、この図に示す振幅 P_{max} とパルス幅 W の比 P_{max}/W を選ぶことが妥当であることは文献1～4に示したとおりであるが、ここではそれに加えて表-1に示す16種類の供試体

試験結果のうち静弾性係数、S波速度、一軸圧縮強度について図-3、4、5に示す。この図には山梨県の現場(Site-A)での原位置試験結果（文献1、3、4参照）も併せて示してある。

表-1 室内試験に用いた材料の物性

Material		Density	P-wave	S-wave	Uni-axial	Static	Dynamic
Sym.	Specimen	(kg/m ³)	velocity	velocity	strength	elasticity	elasticity
			(km/s)	(km/s)	(MPa)	(GPa)	(GPa)
M1	Cement paste A	1.62	2.48	1.26	10.4	4.40	6.84
M2	Cement paste B	1.66	2.68	1.27	12.7	6.66	7.28
M3	Cement paste C	1.70	2.77	1.41	17.3	6.53	8.92
M4	Cement paste D	1.75	2.84	1.52	27.6	7.62	10.5
M5	Cement paste E	1.74	3.32	1.74	48.6	10.6	13.8
M6	Cement mortar 1	1.98	2.92	1.54	11.5	4.80	12.4
M7	Cement mortar 2	2.07	3.34	1.81	34.7	10.2	17.5
M8	Rubber	1.12	1.57	0.25	—	—	0.21
M9	Polyacetal resins	1.41	2.30	0.95	—	—	3.56
M10	Pumiceous tuff	1.52	2.14	1.16	6.7	1.68	5.27
M11	SHIRAKAWA welded tuff	1.99	2.53	1.40	26.8	5.78	9.90
M12	OGINO tuff	1.79	2.38	1.34	35.4	6.03	8.10
M13	KIMACHI sand stone	2.09	2.64	1.39	38.3	8.33	10.5
M14	IZU AOISHI (Tuffaceous sand stone)	2.03	3.01	1.62	63.2	15.0	13.7
M15	AKIYOSHI mable	2.70	5.67	3.03	84.7	52.5	61.4
M16	INADA granite	2.64	5.65	3.10	154.0	58.3	65.0

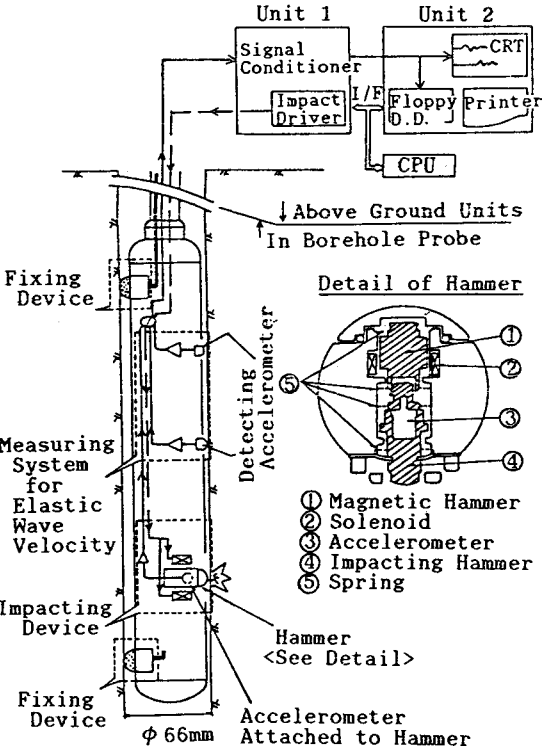


図-1 試験機の概要

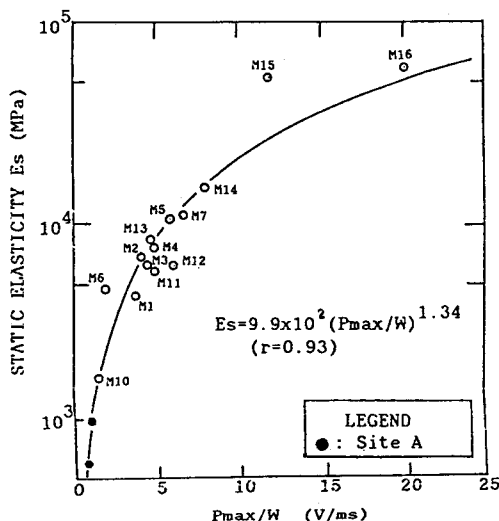


図-3 P_{max}/W と静弾性係数との関係

以上の結果より P_{max}/W が岩盤の諸物性値と良い相関を示すことが分かったが、様々な条件下での適用を考えると、図-2の①～②区間に示す打撃ハンマーの初期エネルギーが不安定である場合や、②～③の区間が水の抵抗などで等速運動しない等の不確定要因が存在することが予想される。したがって、以下において P_{max}/W の持つ物理的な意味を考察することにより、この試験法の原理を明らかにし、そのことによりこの試験機の持つ不確実性を取り除くことで試験機の信頼性の向上を試みた。

3. P_{max}/W の物理的な意味

P_{max}/W の物理的な意味を考察するために図-6に示すような簡単なモデルを考える。すなわち、岩盤をバネ定数 k を持つ減衰0のバネと仮定し、ハンマーを質量 m の剛体とするモデルである。ここでハンマーが孔壁に当たる直前の速度を V_0 、バネの最大変形量を X_0 とすると、エネルギーの釣合から

$$\frac{1}{2} m V_0^2 = \frac{1}{2} k X_0^2 \quad \text{----- (1)}$$

が成り立つ。また、バネの変形を正弦波と仮定すると、

$$X = X_0 \sin \left(\frac{\pi}{W} t \right) \quad \text{----- (2)}$$

である。ここに W は図-2で定義したパルス幅、 t は衝突からの経過時間である。これより、速度 V ・加速度 A は次のように与えられる。

$$V = \dot{X} = X_0 \frac{\pi}{W} \cos \left(\frac{\pi}{W} t \right) \quad \text{-- (3)}$$

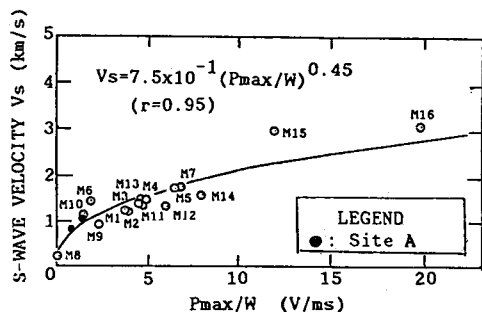


図-4 P_{max}/W とS波速度との関係

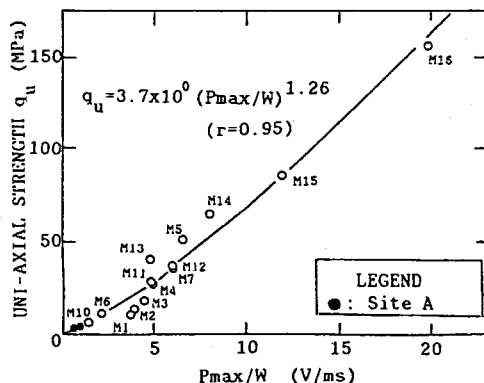
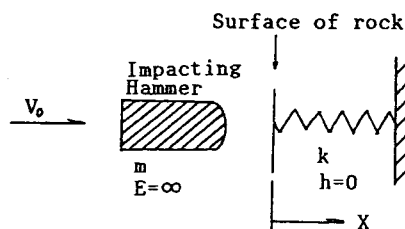


図-5 P_{max}/W と一軸圧縮強度との関係



LEGEND

- m: Mass of impacting hammer
- E: Young's modulus of impacting hammer
- k: Spring constant of spring
- h: Damping factor of spring
- X: Coordinate

図-6 孔壁とハンマーのモデル

$$A = \dot{V} = -X_0 \frac{\pi^2}{W^2} \cos\left(\frac{\pi}{W} t\right) \quad \text{----- (4)}$$

また初期条件として、 $t=0$, $V=V_0$ のとき

$$V_0 = X_0 \frac{\pi}{W} \quad \text{----- (5)}$$

である。

式(1), (4), (5)より

$$\begin{aligned} P_{\max}/W &= A_{\max}/W \\ &= \frac{1}{\pi} V_0 \frac{k}{m} \quad \text{----- (6)} \end{aligned}$$

が得られる。この式より、 $P_{\max}/W$ は岩の弾性係数に関連するバネ定数 k 及びハンマーが孔壁に当たる直前の速度 V_0 にのみ支配されていることが分かる。

4. 試験機の改良

(1) 打撃部の改良

ボアホールハンマーを実ボーリング孔へ適用しようとする場合に問題となるのは、孔内であることから打撃面を直接確認できないということである。このことは、試験機と孔壁のクリアランスを一定に保つことがほとんど不可能であることを意味する。しかし、式(6)より $P_{\max}/W$ は岩の弾性係数以外ではハンマーの初速 V_0 にのみ依存していることから、この V_0 を測定して $P_{\max}/(W \cdot V_0)$ を新しいインデックスとして選べばこの問題が改善されることがわかる。

また、 $P_{\max}/(W \cdot V_0)$ を用いれば、図-2の①~②区間のエネルギーが不安定でも、②~③の区間が水の抵抗などで等速運動しない場合でも何等問題がなくなることがわかる。

そこで、打撃ハンマーの初速を直接測れるように打撃ハンマーの加速度計を速度計に変更し、 $P_{\max}/W$ を求めるための加速度波形はこの速度波形を微分回路により微分して求める方式に改めた。ここで加速度計を用いて積分するのではなく速度計の微分という方式を採用したのは、圧電型の加速度計に比べて電磁式の速度計の防水対策が容易であることによるものである。このときの速度波形及びそれを微分した加速度波形の例を図-7に示す。

改良機を用いて測定した $P_{\max}/(W \cdot V_0)$ とクリアランス（打撃部ハンマーの先端と供試体とのクリアランス）の関係を図-8に示した。この図には $P_{\max}/W$ とクリアランスの関係もあわせて示したが、 $P_{\max}/W$ はクリアランスが大きくなるとともに小さくなるのに対して、 $P_{\max}/(W \cdot V_0)$ はクリアランスに無関係に一定であることがわかる。また、水中と空気中で同じ供試体を打撃する実験も行ったが、

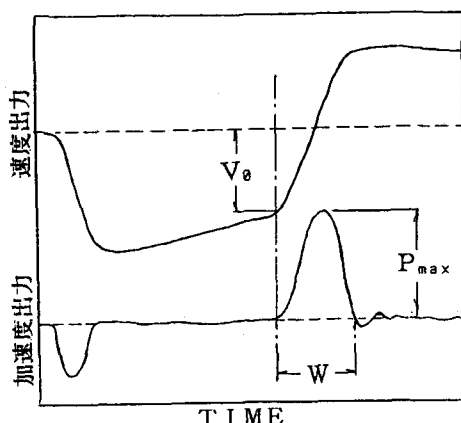


図-7 打撃応答波形の模式図

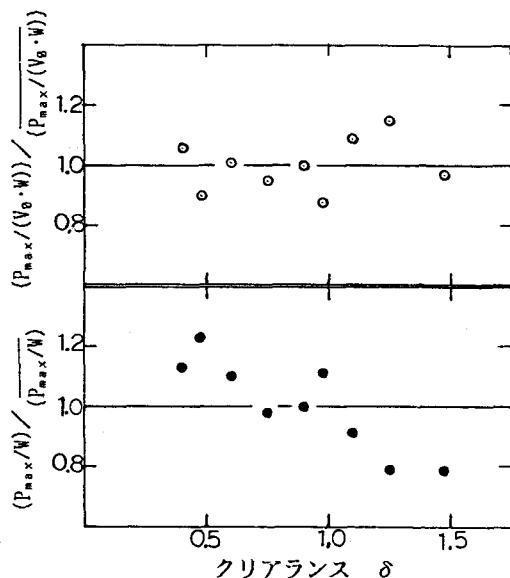


図-8 打撃応答値とクリアランスの関係

結果は良好であった。

(2) 操作性の改良

これまでの原位置試験の結果を含めた操作性に関する総合的な検討の結果、以下に示すような改良を行った。これらの改良を施した試験機の写真を写真-1に示す。

- ①当初約2mの1本物であった孔内挿入部（プローブ）を3分割し、その間をケーブルでつなぐことで、試験機の軽量化、フレキシブル化（孔曲がり追従性の向上）を図った。
- ②プローブ固定方式を最近新たに開発された機械式固定法（応用地質（株）製ボアホールシャトル）に変えることで操作性の向上を図った。
- ③地上計測部のコンパクト化を図り、これまでの2ユニットを1ユニット化した。

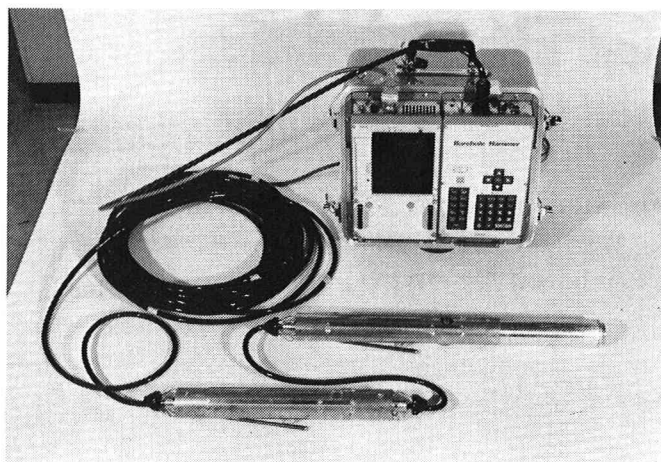


写真-1 改良型試験機概観

5. おわりに

打撃応答と弾性波動伝播の原理を応用した試験機を開発し、現場実験を含めた総合的な検討・改良を行った結果、岩盤物性の推定及び操作性について良好な結果が得られる見通しを得た。今後も、当試験機の信頼性向上のため一層のデータ蓄積を図っていく所存である。

また、今回は弾性波速度測定部についてはあまり記述しなかったが、この部分がPS検層結果のS波速度とよく対応していることは既に報告（文献1～4）してきたとおりである。したがって、この部分より得られるS波速度のデータと、打撃部の $P_{max}/(W \cdot V_0)$ との関係から求められるS波速度のデータとの比較から、打撃部によって得られる点だけの情報を補うことのみにとどまらず、今後は岩盤の割れ目の評価にも役立てることができるものと期待して、著者らはデータの収集を行っていく予定である。

〔参考文献〕

1. 鈴木英世, 野沢是幸, 菊地宏吉, 藤枝誠, 曾根好徳; 「孔内簡易打撃応答試験機の開発と適用」, 第20会岩盤力学に関するシンポジウム, 土木学会, 1988年2月
2. 鈴木英世, 野沢是幸, 菊地宏吉, 藤枝誠, 曾根好徳; 「ボーリング孔を利用した簡易打撃応答試験機の開発」, 第7回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, 岩の力学連合会, 1987年12月
3. Y. Nozawa, H. Suzuki, K. Kikuchi; New Borehole Test Machine and Its Application to the Construction of Dams, ISRM 1988, Madrid
4. 曾根好徳, 鈴木英世, 野沢是幸, 菊地宏吉; 「孔内簡易打撃応答試験機による原位置測定結果とその評価」, 第43会年次講演会第3部, 土木学会, 1988年10月