

## 孔内打撃応答試験機を用いたグラウチングによる岩盤の力学的改良効果に関する考察 Study on Mechanical Improvement of Rock masses by grouting injection using Borehole Hammer test

猪狩哲夫\* 菊地宏吉\*\* 水戸義忠\*\*\* 野沢是幸\*\*\*\*

Tetsuo IGARI, Kohkichi KIKUCHI, Yoshitada MITO, and Yoshiyuki NOZAWA

On this paper, we discuss in situ experiment carried out in order to explore the grouting effects. These experiments were conducted at six (6) sites, and mainly consisted of operating borehole hammer test and borehole expansion test to expertise of evaluating rock masses properties before and after injection. The major results are listed as follows. 1. 'Strike response value' can evaluate the change of rock masses mechanical properties by injection. 2. The change of strike response value is significant for improvement of consolidation and homogeneity of rock masses. 3. The results of lateral load test and strike response value have good correlation with deformation and/or elastic modules. These relations suggest that we can presume the mechanical properties of rock masses using 'Strike response value'.

### 1 はじめに

土木構造物の基礎岩盤の力学特性を把握したり、工学的な見地から岩盤分類を行うために、各種原位置試験が行われている。原位置試験は、調査・設計段階で想定した地盤条件の検証や修正のために重要であるが、試験によっては多大な労力と時間を要するものもある。その点ボーリング孔を利用した各種試験は、乱されない状態での岩盤物性を知ることができ、またその実施が簡便でかつ経済的にも有利であるものが多く、比較的容易に岩盤物性を把握することが可能になるという利点がある。

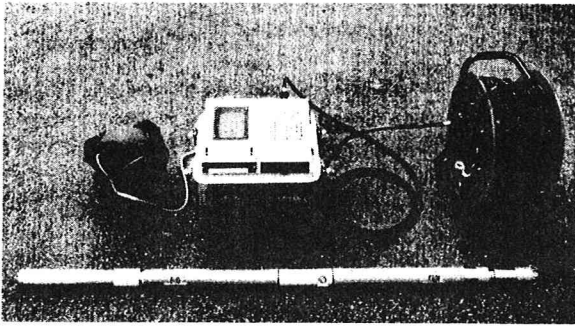
ロックシュミットハンマー試験はハンマー部のバネに依存する反発度から、構造物の設計に関わる基礎岩盤の変形性や強度を推定することができ<sup>1)</sup>、その簡易性や有効性から広く用いられている。このロックシュミットハンマーの原理をボーリング孔に適用することを目的とした試験機に、孔内打撃応答試験機(Photo-1)がある。これは、ボーリング孔の孔壁を小型の電磁ハンマーで打撃し、その際の反発度から岩盤の物性を推定するものであり、孔内載荷試験機に比べ、より簡便で迅速に多量のデータが収集できる利点がある。

孔内打撃応答試験機に関するこれまでの研究では、1987年に野沢ら<sup>2)</sup>により、孔内打撃応答試験機の試作機が開発されて以降、ハンマーの打撃機構を検討及び改良<sup>3),4)</sup>を加え、打撃応答量を定義した。その後、菊地ら<sup>5)</sup>、水戸ら<sup>6)</sup>は、5種類の岩盤と2種類のマスコンクリートにおいて打撃実験を行い、1カ所あたりの最適な測定回数を孔内載荷試験結果を基に検討した。さらに孔内載荷試験器と孔内打撃応答試験器の相関を分析し、岩盤の変形性に関わる打撃応答量による推定式を考案した。さらに割れ目分布密度を考慮した検討を行っている。

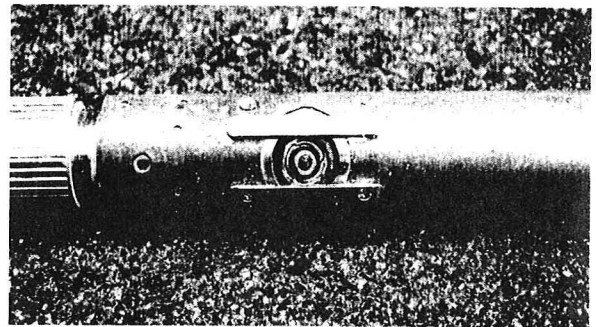
一方グラウチングは、ダム基礎処理工法として多くの施工実績を有する工法である。このうちコンソリデーショングラウチングは、ダム着岩部付近の比較的浅い部分の浸透流の抑制、および力学特性の改良を

\* 正会員 (株)間組 土木本部 \*\* 正会員 京都大学大学院 工学研究科 教授

\*\*\* 正会員 京都大学大学院 工学研究科 助手 \*\*\*\* 正会員 東京電力(株)



a) A outward form of Borehole hammer



b) Closeness of a hammer part

Photo-1 Borehole Hammer

的に実施されている。このグラウチング効果の確認方法は、一般に透水性の変化によって評価しており、力学的性質の改良効果については定量的に効果を確認することが難しいこともあって、岩盤の力学的安定性に対して安全側に作用するであろうという程度の定性的な評価にとどまっているのが現状である。

このような状況に対して菊地（1996）<sup>7)</sup>は比較的簡易でかつ直接的に岩盤の変形性を評価できる孔内載荷試験機を用いて、多くのダムサイトにおいてグラウチング前後の岩盤の力学的変化を測定し、データを集積した。その結果より、グラウチングによる岩盤改良の効果を、①変形性や強度の増加（固密化）、②変形性や強度のばらつきの減少（均質化）、③岩盤中の不連続面が改良されより連続体に近づく（一体化）ことを示している。また筆者ら<sup>8), 9)</sup>は、注入回数ごとにボーリング孔間弾性波探査およびトモグラフィ解析を実施し、回数ごとに弾性波速度が上昇すること、グラウチング後では速度値のばらつきが小さくなること、また並行して実施した孔内載荷試験位置での弾性波速度値の変化を考察し、力学的改良傾向について検討している。

このような背景のもと本研究では、グラウチング前後の岩盤物性の変化を調べるとともに、同位置で実施した孔内載荷試験結果と対比することによる力学改良効果の評価を目的に、孔内打撃応答試験機による現場実験を6カ所で行った。

## 2. 孔内打撃応答試験機

### 2.1 孔内打撃応答試験機の概要

本機の主要構成部及びシステム概念を、Figure-1に示す。当試験機は、ボーリング孔内につ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のある地上計測部に分けられる。孔内挿入部に収納されている機構は、a)小型加速器計を組み込んだ電磁ハンマー、b)ハンマー駆動回路、c)孔壁への固定装置である。また地上計測部は、a)プローブ内のハンマーの打撃制御、b)ハンマー部加速度計及び孔壁部受振加速度計の加速度波形の増幅、プリント及びディスプレイ、c)1/2インチフロッピーディスクへのデジタルデータの記録、d)外部コンピュータへのデジタルデータの転送機能等を有している。

孔内挿入部と地上計測部はケーブルでつながっており、プーリーを介して人力により孔内での上昇・下降を行う。このため、多くの孔内原位置試験機のようにボーリングロッドなどで吊り下げたりはする必要なく、また試験に費やす時間も短いことから、短時間に連続的かつ多数の点で試験が実施できる利点がある。

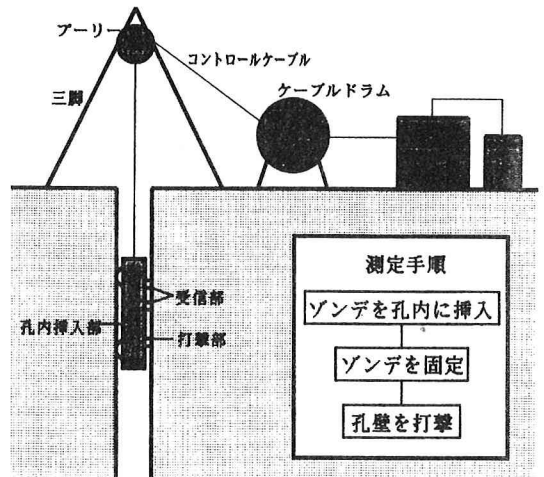


Figure-1 Block diagram of Borehole Hammer test

## 2.2 打撃応答量

孔内打撃応答試験機の打撃応答量(BH)は、式(1)のように定義されている<sup>4)</sup>。

$$BH = \frac{P_{max}}{W \cdot V_0} \dots \dots \dots (1)$$

ここで BH : 打撃応答量 (ms<sup>-2</sup>)      P<sub>max</sub> : 加速度波形の最大値(gal)  
 W : パルス幅(ms)                      V<sub>0</sub> : 孔壁打撃時のハンマーの初速度(kine)

これまでの研究では、この打撃応答量は室内試験の結果、静弾性係数および一軸圧縮強度と相関があること、また理論的岩盤をバネとしてモデル化し、運動方程式を解くと、孔内打撃応答量が岩盤のバネ定数、すなわち弾性係数に比例することが判明している<sup>4)</sup>。

## 3. 原位置における現場実験

### 3.1 現場実験

現場実験は、Table-1 に示す 6 カ所のダムサイトの実験ヤードにて実施した。対象とした地質は、堆積岩系 3 カ所、火成岩系 3 カ所であった。ボーリングはすべて孔径 66mm ロータリー式にて行い、またグラウチングは、注入区間は 1 ステージ 5m とし、高炉セメント B 種を用いた。注入前の水押し試験から得られるルジオン値をもとに注入開始濃度を決定し、規定注入量になり次第順次配合を切り替えた。

注入速度は、4 ℓ/min/m を、注入圧力は 0.3MPa/cm<sup>2</sup>

をそれぞれ上限とした。また注入完了基準は、規定注入圧で 1 ℓ/min/m 以下の状態が 30 分以上継続した場合と定めた。原位置試験時期は、それぞれの孔での注入後セメントミルクの硬化を待って、おおむね 24 時間後に測定を行った。

Table-1 The list of in-suite experimental sites

地点名	呼称	地質時代と主な岩種構成	
Sダム基礎岩盤	S	堆積岩系	中生代砂岩頁岩互層
Uダム減勢工	U		中生代砂岩頁岩互層
Oダム試験ヤード	O		古生代粘板岩
KRダム試験ヤード	KR	火成岩系	中生代流紋岩
Yダム基礎岩盤	Y		中生代花崗岩
KSダム試験ヤード	KS		古第三紀花崗岩

### 3.2 原位置試験方法

ボーリング孔内においては、グラウチング前後で孔内打撃応答試験と、岩盤との力学的対応関係を検討するために孔内載荷試験（等圧分布型）を行った。試験順序は、最初に非破壊破壊試験である孔内打撃応答試験を実施し、その後孔内載荷試験とした。両者の試験実施位置関係は、Figure-2 に示すように載荷試験区間 60cm に 4 カ所の打撃応答試験を行い、一カ所あたり 3 回の打撃応答量の測定<sup>5)</sup>を行った。これにより 1 カ所の載荷試験実施区間に対して 12 回の打撃応答量の平均値と対比させた。

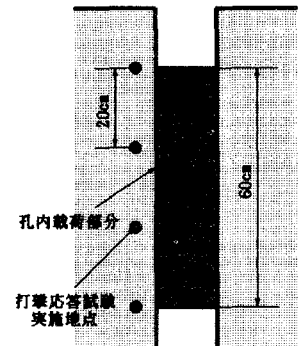


Figure-2 A situation of Borehole hammer test & Lateral load test

### 3.3 実験結果

実験は 6 地点 275 カ所でおこなった。Table-2 にグラウチング前後での打撃応答量の変化（平均値）を示す。打撃応答量はすべての地点で増加する傾向にあり、全測点平均で打撃応答量が 47.8% 増加する結果となった。

また、各測点における打撃応答量のグラウチング前後の関係を Figure-3 に、またグラウチング前後の打撃応答量の比（グラウチング後打撃応答量/グラウチング前打撃応答量）を改良比と定義し、グラウチング前の打撃応答量と改良比を比較したもの

Table-2 Change of strike response value

Sites	Nos.	Change of Strike response value (ms <sup>-2</sup> )		Increase ratio (%)
		Before	After	
S	18	628	1067	69.9
U	84	1064	1541	44.8
O	45	1958	2810	43.5
KR	29	958	1501	56.7
Y	24	719	950	32.1
KS	75	1120	1712	52.9
Mean value	275	1156	1708	47.8

を Figure-4 に示す. これらによると, グラウチング前後で応答量が上昇していることがわかり, 特に打撃応答量が小さくなるにつれて, グラウチング後の打撃応答量の増加量が大きくなる, すなわち改良比が大きくなる傾向にあることがわかる. これは不良岩盤ほどグラウチングの改良効果が大いことを意味している. この傾向は, 筆者ら<sup>9), 10)</sup> がグラウチング前後で実施した孔内载荷試験による変形係数・弾性係数の改良傾向, 孔間弾性波速度測定による伝播速度の上昇傾向と同じであった.

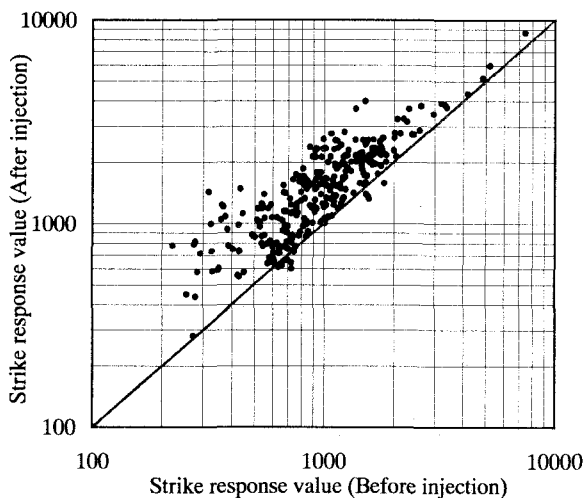


Figure-3 The relation of log(BH) before injection and the ratio of improvement

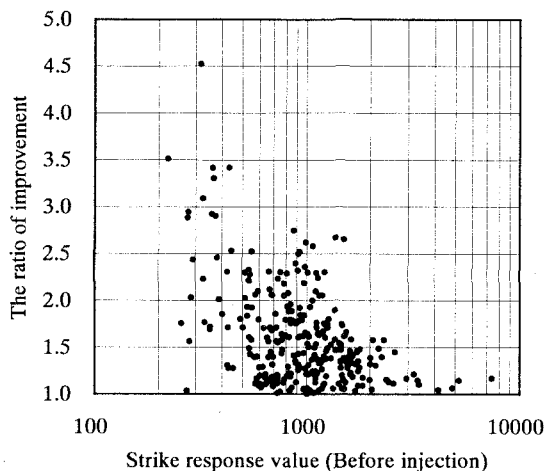
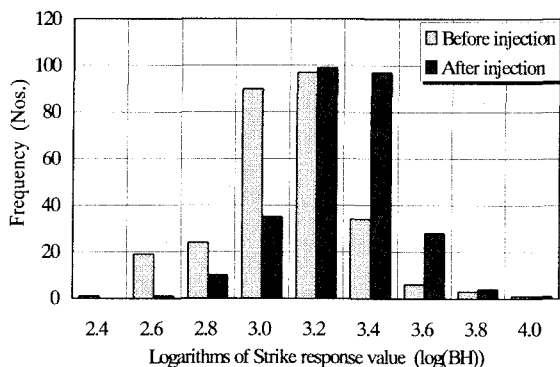
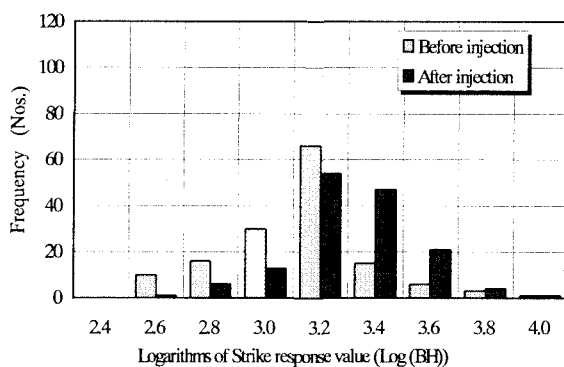


Figure-4 The relation between before and after injection

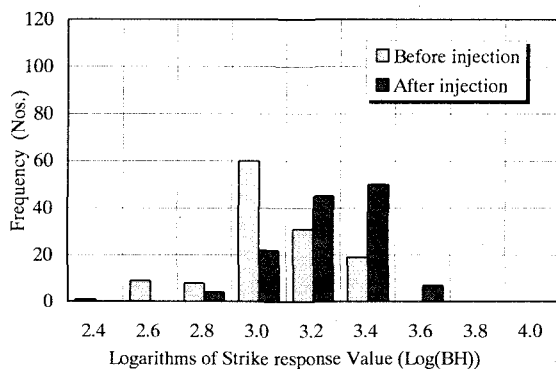
a) All Data



b) Sedimentary Rocks



c) Igneous Rocks



Results of

		Mean value (log (BH))		Standard Dev. (log (BH))	
		Before	After	Before	After
(a)	All	2.997	3.185	0.236	0.204
(b)	Sedimentary Rock	3.032	3.214	0.256	0.225
(c)	Igneous Rock	2.959	3.151	0.206	0.171

Figure-5 Frequency Distribution of Strike response value before and after injection

## 4. 考察

### 4.1 打撃応答量による改良効果

今回実験したサイトの地質を大別すると、中・古生層の砂岩泥岩を主体とする堆積岩系岩盤（S,U,Oの各地点）と火成岩系岩盤（KR,Y,KSの各地点）になる。

Figure-5は、堆積岩系地点（測定データ数:147）と火成岩系地点（同:128）に分けて、グラウチング前後の打撃応答量（対数値）の度数分布を、またその平均値・標準偏差の変化を示したものである。

これらの分布および基本統計量を見ると、打撃応答量は岩盤の種類に限らず上昇しており、さらに標準偏差は小さくなる傾向が認められた。平均値の上昇は、力学特性が全体的に上昇（固密化）していることを示しており、また標準偏差の減少は、全体的なばらつきが減少（均質化）することを意味していると考えられ、これはグラウチングによる変化すなわち力学的改良効果を示している。

### 4.2 孔内载荷試験による力学特性との対比

グラウチング前後において孔内载荷試験により求めた変形係数と、同じ位置で計測した孔内打撃応答試験の打撃応答量の関係を示したものがFigure-6である。また打撃応答量と変形係数・弾性係数との関係を、最小二乗法近似により求めた回帰式（近似式）と標準偏差、相関係数の一覧をTable-4に示す。両者より、岩盤の変形性と打撃応答量とは、非常に良好な正の相関が認められる。またグラウチング前後の比較（左右の図）では、注入後で散布図の分布が全体的に右上方に集中していく傾向も認められる。このことは、岩盤の打撃応答量から概略の変形係数・弾性係数を予測することが可能であり、同様にグラウチング後の打撃応答量の上昇傾向についても変形係数の上昇傾向と関連があることを示すことを表している。堆積岩系と火成岩系を比較すると、特に花崗岩を主体とする火成岩系では、変形係数との相関係数や標準偏差がともに0.9以上と非常に強い。これは、グラウチング前後の変形係数・弾性係数の上昇と打撃応答量のそれが、良好な関係にあることを示しており、対象岩盤が火成岩系の場合、高い精度で岩盤の力学的物理量を予測することが可能であると考えられる。対象岩盤が火成岩系のほうが、力学特性とより良好な関係を示す理由については、岩盤壁面の均一性に起因していると考えられる。すなわち砂岩、頁岩、粘板岩のような堆積岩では、節理面や層理面などによる力学的な不連続面が多いことに対して、火成岩系では、その岩盤の生成形態から節理面以外は、等方均質体に近い性状である。これに対し打撃応答量の測定は局所的な打撃によって得られるために割れ目の存在の影響を強く受け、割れ目の多い岩盤ほど打撃応答量に対する変形性が小さくなり、割れ目が少ない岩盤ほど打撃応答量に対する変形性が大きくなる傾向がある<sup>5)</sup>。一方孔内载荷試験はこれらの状況を孔壁全周の平均的な値として算出するために、岩種による差異が生じているものと考えられた。

いずれにしても、孔内打撃応答量が岩盤の力学的特性ならびにグラウチングによる変化を、工学的に適切な精度で表現しており、原位置試験として有効な物理指標であることがわかる。

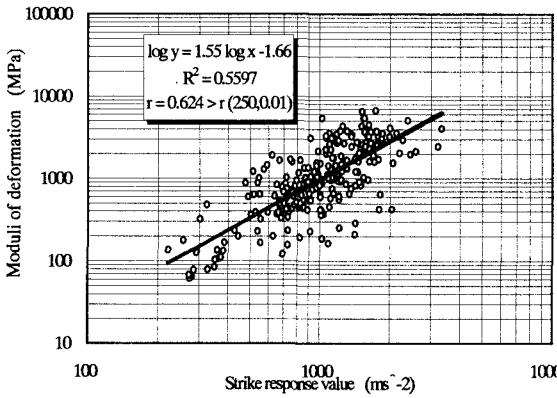
## 5. 結論

孔内打撃応答試験機は、約10年前に試作機が開発されて以降、現場実験を繰り返しデータを蓄積してきた。本研究においてはこれらのデータを基に、グラウチング注入前後の岩盤物性の変化を考察するために現場実験を6地点、275箇所で行った。さらに孔内载荷試験結果と対比することにより岩盤の力学改良効果を評価した。その結果、以下のような知見が得られた。

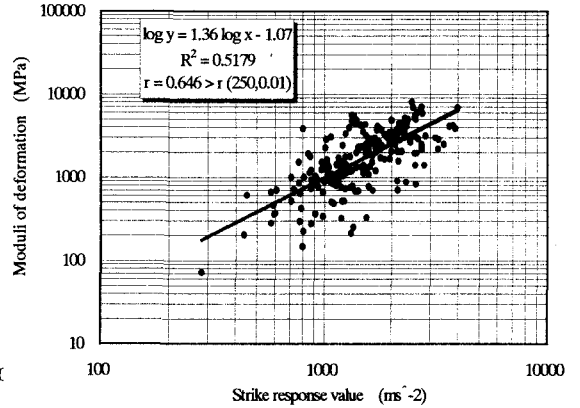
1. グ라우チングによって、孔内打撃応答量が増加する。とくに打撃応答量が概ね $200\text{ms}^{-2}$ 以上 $1000\text{ms}^{-2}$ 未満において改良比（グラウチング後の打撃応答量/グラウチング前の打撃応答量）が大きくなる傾向にある。これは、岩盤の低強度領域でのグラウチングによる力学的改良効果が大きいことを意味しており、この傾向はこれまでの孔内载荷試験、孔間弾性波探査による研究成果と整合する。
2. その改良傾向を基本統計量から見ると、打撃応答量分布の平均値が上昇すること、標準偏差が小さくな

a) All data

(Before injection)

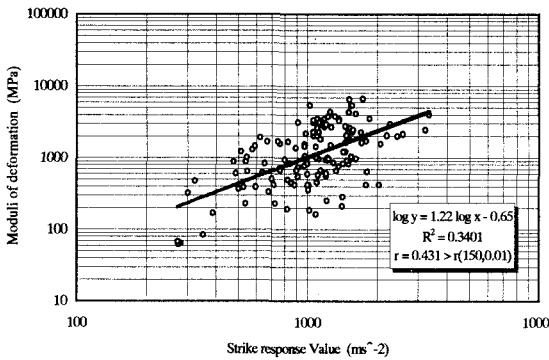


(After injection)

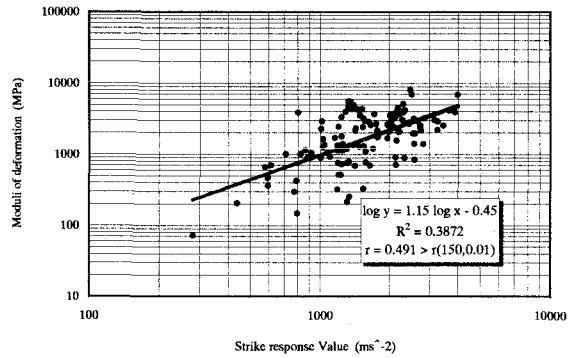


b) Sedimentary rock masses

(Before injection)

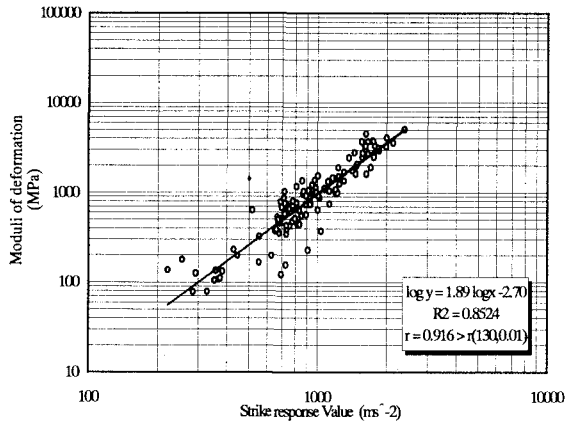


(After injection)



c) Igneous rock masses

(Before injection)



(After injection)

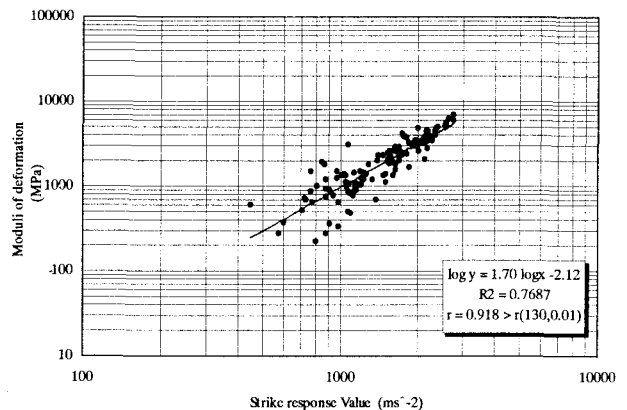


Figure-6 The comparison between the strike response values and moduli of deformation

ることがわかり、これはそれぞれ岩盤の固密化（強度物性の増加）、均質化（岩盤が連続体に近づく）ことを意味していると考えられる。

3. この効果を同地点で実施した孔内载荷試験結果と対比すると、孔内载荷試験により求めた変形係数・弾性係数と打撃応答量は良好な相関関係がみられ、岩盤の力学的特性の評価するうえで有効な物理量である。特

Table-4 The comparison of an approximate expression between before and after injection

Deformation moduli	Before injection			After injection		
	An approximate expression	Standard Deviation	Correlation	An approximate expression	Standard Deviation	Correlation
All data	$\text{Log } Y = 1.55 \log X - 1.66$	0.748	0.624	$\text{Log } Y = 1.36 \log X - 1.07$	0.720	0.646
Sedimentary rocks	$\text{Log } Y = 1.22 \log X - 0.65$	0.583	0.431	$\text{Log } Y = 1.15 \log X - 0.45$	0.622	0.491
Igneous rocks	$\text{Log } Y = 1.89 \log X - 2.70$	0.923	0.916	$\text{Log } Y = 1.70 \log X - 2.12$	0.877	0.918

Elasticity moduli	Before injection			After injection		
	An approximate expression	Standard Deviation	Correlation	An approximate expression	Standard Deviation	Correlation
All data	$\text{Log } Y = 1.08 \log X + 0.03$	0.650	0.637	$\text{Log } Y = 1.32 \log X - 0.78$	0.682	0.574
Sedimentary rocks	$\text{Log } Y = 1.27 \log X - 0.58$	0.596	0.471	$\text{Log } Y = 1.05 \log X + 1.09$	0.562	0.417
Igneous rocks	$\text{Log } Y = 1.83 \log X - 2.26$	0.889	0.884	$\text{Log } Y = 1.71 \log X - 2.02$	0.845	0.885

にこの傾向は火成岩類に顕著である。

4. 孔内打撃応答量から求まる打撃応答量から岩盤の変形係数・弾性係数を推定する簡易な近似式を示した。

今回の研究により、孔内打撃応答量が岩盤の客観的・定量的な力学評価が可能になったと考える。本試験はボーリング孔壁を打撃するのみの試験機であるため、測定に要する時間が短いこと、広い範囲の岩盤を容易にかつ迅速に評価することが可能であることから、数多くの定量的データを効率的に採取することができる利点を有している。今後は、たとえば岩盤分類上の指標や岩盤の掘削性（硬岩・中硬岩・軟岩）区分などへの展開が期待できるものと考えている。

## 6. 参考文献

- 1) 齊藤和雄, 菊地宏吉: 岩盤計測におけるシュミットハンマーの適用, 電力中央研究所報告, 1972
- 2) 野沢是幸, 鈴木英世, 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の開発, 第7回岩の力学国内シンポジウム講演論文集 pp.217-222, 1987
- 3) 野沢是幸, 鈴木英世, 菊地宏吉, 藤枝誠, 曾根好徳: 孔内打撃応答試験の開発と適用第20回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集 pp.11-15, 1988
- 4) 野沢是幸, 鈴木英世, 菊地宏吉, 藤枝誠, 曾根好徳: 孔内打撃応答試験の開発と適用(その2), 第21回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集 pp.256-260, 1989
- 5) 菊地宏吉・水戸義忠・宇津木慎司: 孔内打撃応答試験機による適用性に関する検討, 応用地質, 36-1, pp.14-23, 1995
- 6) 水戸義忠, 菊地宏吉・宇津木慎司・武藤光: 孔内打撃応答試験における打撃応答量と変形性の関係, 第27回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集 pp.101~105, 1996
- 7) 菊地宏吉: グ라우チングによるダム基礎岩盤の力学的改良効果に関する評価技術の現状と課題, ダム技術, No117, 3, 1996
- 8) 猪狩哲夫, 菊地宏吉, 水戸義忠: グ라우チングによるダム基礎岩盤の改良過程の考察, 第10回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp.317-322, 1998
- 9) 猪狩哲夫, 菊地宏吉, 水戸義忠: グ라우チングによる岩盤改良の評価方法に関する考察, 材料, Vol.47, No.5, pp.515-520, 1998
- 10) K.KIKUCHI, T.IGARI, Y.MITO, S.UTSUKI: In Situ Experimental Studies on Improvement of Rock Masses by Grouting Treatment, Int. J. Rock Mech. & Min. Sci. Vol.34 No.3-4, P.N. 00138