

(88) 砕岩棒による海底岩盤の貫入・地盤振動特性

大成建設技術研究所	正会員	○福井	勝則
大成建設技術研究所	正会員	川上	純
大成建設技術本部	正会員	後藤	英一
大成建設四国支店	正会員	八重田	義博

Characteristics of Penetration and Ground Vibration on Seabed Rock Induced by Rock Breaker

Katsunori FUKUI, Taisei Corporation
Jun KAWAKAMI, Taisei Corporation
Eiichi GOTO, Taisei Corporation
Yoshihiro YAEDA, Taisei Corporation

Abstract

Rock breaker is widely used to break seabed rock. The relationship between force and penetration depth appears to be closely related to deformation and fracture characteristics of rock.

Penetration test of rock breaker was conducted on seabed weathered granite at the base of the Kurushima Bridge. The rock breaker weighs 46 tons and is 5m long. The angle of its cutting edge is 45 degrees. Linear relationship is found between force F and penetration depth u :

$$F=k \cdot u,$$

where k is penetration stiffness. This equation has been suggested by many authors based on their experiments where a typical penetration is 0.5mm or less. Though the penetration reaches as much as 500mm in this study, this equation seems still valid even in case of such deep penetration.

Furthermore, a linear relationship is found between k and ground vibration energy E_g :

$$E_g=C \cdot k$$

where C is a constant. Using this equation, the penetration depth can be estimated from the ground vibration.

1. はじめに

砕岩棒による海底岩盤の砕岩掘削は航路浚渫に多用されてきたが、近年橋梁基礎の岩盤掘削にも用いられ始めている。

基礎岩盤掘削では、掘削後の基礎岩盤の健全性についても考慮する必要があり、次の事項が重要となる。

1) 正確な砕岩深さの管理および予測

2) 砕岩深さ以深の岩盤の損傷の評価

しかしながら、砕岩棒による海底岩盤掘削は動的問題を含むなど複雑であるので、経験的に砕岩位置、砕岩間隔、落下高さが決定されており、岩盤の破壊現象を含めた、砕岩現象の検討はほとんどなされていない。

よって本研究では、砕岩棒に計測装置を装着して、実際に砕岩を行い、砕岩棒が岩盤と衝突している時の岩盤に作用している荷重と貫入量の関係を求めた結果および砕岩位置から十分離れた位置の地盤振動を計測した結果について述べ、その関連性について考察する。

2. 実験方法

実験は来島大橋5P鋼ケーソン工事の基礎掘削場所において行った。海底の岩盤は、風化の進行した花崗岩である。砕岩を行った位置を掘削平面図に示したものが図1であり、Aから順に砕岩を行った。図からわかるように砕岩位置は予備調査¹⁾での岩盤分類で示すとCL、CM級である。予備調査¹⁾で得られた各分類ごとの物性値を表1に示す。

表1 橋梁基礎掘削場所の岩盤の物性値

岩盤分類		CL	CM
RQD		0～22	0～43
一軸圧縮強度(MPa)		15.7	3.2～7.5
密度(g/cm ³)		2.33	2.40
弾性波速度 (km/s)	P波	2.0～3.3	2.5～4.4
	S波	0.7～1.6	0.8～2.0

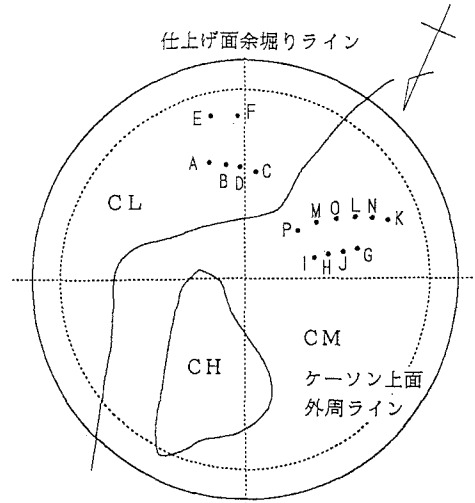


図1 掘削平面図

実線の円は掘削予定領域(直径44m)である

砕岩は、グラブ船『三友2号』より、質量46tの砕岩棒(図2参照)を自由落下させることにより行った。砕岩棒の刃先角は45度である。

実験のパラメータとしては、落下高さ、落下回数、海底岩盤の種類(CL、CM級)の3種類とした。落下高さは、5.0、7.5、10.0、15.0mの4通りとした。設定地盤深度に到達するまで砕岩を行うこととし、同じ位置における落下回数は1～12回であった。CLについては6位置(計25回)、CMについては10位置(計37回)の砕岩を行った。以下では各砕岩の名称として、砕岩位置を表すアルファベットと、同じ砕岩位置での落下回数により表すことにする。ただし、C～Fポイントについては、加速度計が破損して砕岩棒の加速度は計測できなかった。

計測はつぎの3つについて行った。

- 1) 砕岩棒上部に加速度計を設置し、貫入時の加速度を測定する
- 2) 砕岩棒が自由落下している時の砕岩棒の落下速度を測定する
- 3) 砕岩位置から100mほど離れた武志島での地盤振動を測定する

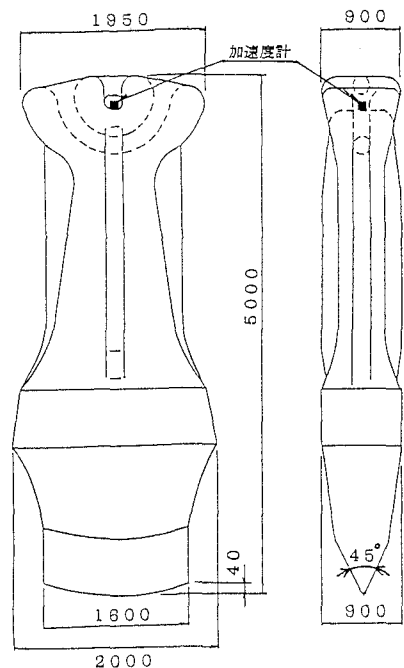


図2 砕岩棒の形状及び加速度計取り付け位置
(長さの単位はmmである)

3. 実験結果

3.1 砕岩棒の落下速度

落下開始直後からの砕岩棒の落下速度と時間の関係を図3に示す。図3では、ほぼ時間に比例して落下速度が増加しており、今回行った実験の範囲（落下高さ15m）内では等加速度運動をしている。各落下試験から得られた衝突時の落下速度と落下高さの関係を図4に示す。最小2乗法で加速度を求めると、 5.4m/s^2 である。自由落下の加速度 9.8m/s^2 に比べて、小さくなっている原因は、砕岩棒に作用する浮力と、砕岩棒を吊るしているワイヤードラムの回転抵抗である。

3.2 荷重と貫入量の関係

砕岩棒の加速度および落下速度より求めた、岩盤に貫入する際に作用する荷重 F と貫入量 u の関係の典型的な例を図5に示す。図5より明らかなように、貫入が進行するにしたがい、荷重はほぼ直線的に増加し、最大荷重に達すると急激に荷重が低下し貫入が停止している。荷重が増加している時には、次式が成立する。

$$F = k u \quad (1)$$

比例定数 k を以下では貫入剛性と呼ぶ。貫入剛性は、砕岩棒の形状、岩盤の力学的特性、海底岩盤の傾斜、凹凸状態によって決定される。掘削中は同じ砕岩棒を用いるので、貫入剛性の違いは岩盤の変形特性、破壊特性などの岩盤固有な特性を反映する。

(1) 式のような関係は、削岩機のビットを用いて求めた荷重－貫入量曲線²⁾とほぼ同じである。削岩機の実験では貫入量は最大で0.5mmであるのに対して、今回はその数百倍程度の貫入量であり、このような大規模の掘削でも(1)式の直線関係が成立した。

図5に示したものは典型的な例であり、この荷重と貫入量の関係についての詳細は、文献²⁾を参照されたい。

3.3 貫入剛性と最終貫入量の関係

砕岩棒が岩盤に与えたエネルギー E は荷重－貫入量曲線の面積である。貫入に伴い、荷重は(1)式に従い直線的に増加し、最大荷重 F_{MAX} を迎えた後、貫入量はあまり変化せず荷重は0まで下がり、最終貫入量 u_{MAX} となっている。よって E は次のように表すことができる。

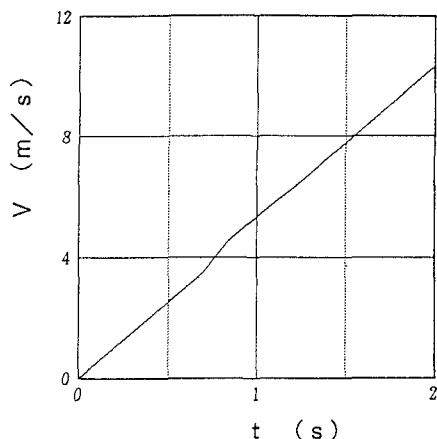


図3 落下速度の経時変化

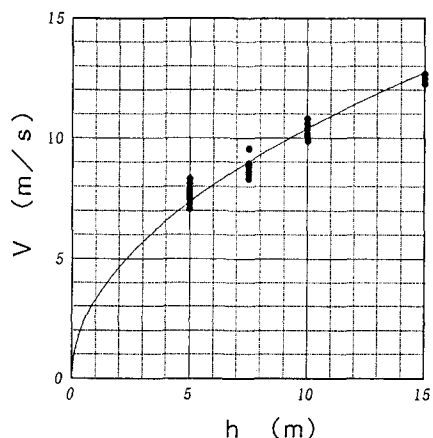


図4 落下速度と落下高さの関係

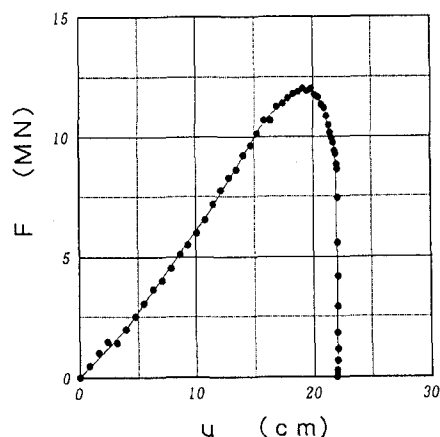


図5 荷重と貫入量の関係

$$E = \frac{F_{MAX} \cdot u_{MAX}}{2} = \frac{k \cdot u_{MAX}^2}{2} \quad (2)$$

一方、衝突時に保有していたエネルギーは次のように表現できる。

$$E' = m \cdot a \cdot h \quad (3)$$

ただし加速度 a は 5.4 m/s^2 である。荷重が 0 となり砕岩が終了した段階で砕岩棒の速度は 0 に近く、岩盤に衝突する時に保有していた運動エネルギーはほぼ砕岩に消費されている。よって近似的に $E = E'$ より

$$\frac{k \cdot u_{MAX}^2}{2} = m \cdot a \cdot h \quad (4)$$

となる。(4) 式によれば落下高さが一定であれば、最終貫入量は貫入剛性の平方根に反比例する。

図 6 に実験で得られた貫入剛性と最終貫入量の関係を示す。図には (4) 式による計算結果も示しているが、荷重が最大となってから最大貫入量は 5cm ほど大きくなっている場合が多い [図 5 参照] ので、計算で最終貫入量は 5cm 減じている。落下高さ 5m の場合にはほぼ一致しており、落下高さ 10m の場合には多少ずれているが、傾向としてはよく合っている。このように貫入剛性から最終貫入量を把握することができる。

3.4 地盤振動の計測結果

図 7 に、武志島で測定した地盤振動の加速度波形例を示す。様々な周期の混ざった波形が観測されたので、FFT 分析を行い、周波数特性を調べた結果を図 8 に示す。図では 20, 28, 35Hz の周波数が卓越している。貫入に要する時間は 60ms 程度であり、貫入現象に近い周波数である。この 3 つの周波数については、ほぼすべての実験で観測された。これより大きい卓越周波数は各落下試験により異なっていた。

3.5 貫入剛性と地盤振動の関係

岩盤が強固な場合には、砕岩時に生じる地盤振動の減衰が小さくなり、より大きな振動が周辺に伝わる。このように考えると、地盤振動と貫入剛性との間に何らかの関係が存在する可能性がある。

前節で述べたように、各砕岩試験により卓越周波数に違いが見られるので、地盤振動の大きさを表すパラメータとして、単位落下高さあたりの地盤振動エネルギー E_g を選ぶことにする。 E_g は、FFT 分析結果のフーリエスペクトラム G とその周波数 f とにより表

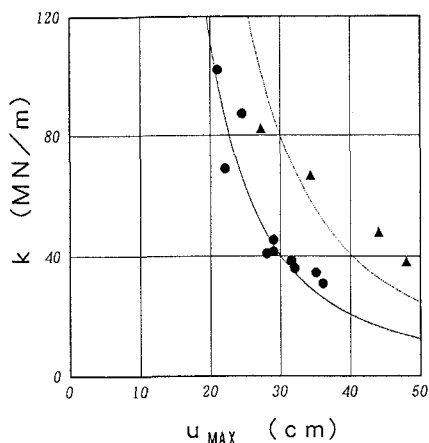


図 6 貫入剛性と最終貫入量の関係
(● 落下高さ 5m、▲ 落下高さ 10m)

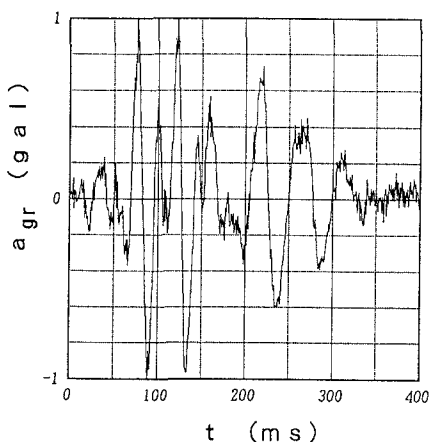


図 7 地盤振動加速度波形

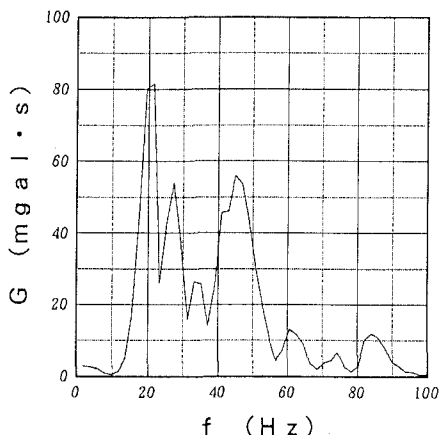


図 8 FFT 分析結果

現でき、次のような式で表すことができる。

$$E_g = \frac{C}{h} \cdot \int_0^{\infty} \left(\frac{G}{f} \right)^2 df \quad (5)$$

ただし、Cは岩盤の密度、弾性波速度などからなる定数である。Cを現実的に定めることは難しいので、(5)式の積分値を落下高さで除したものをを用いることとし、以下では相対地盤振動エネルギー E_g^* と呼ぶ(E_g^* の次元は[L]である)。

相対地盤振動エネルギー E_g^* と貫入剛性kの関係を図9に示す。図ではばらつきは存在するものの、貫入剛性が大きくなると地盤振動も大きくなっていることがわかる。この傾向は、貫入剛性が大きい場合、岩盤はより健全であり、振動の減衰は起こりにくく、地盤振動が大きくなるといった考えと一致する。相対地盤振動エネルギーと貫入剛性の間に原点を通る直線関係が成立するとし、最小2乗法により傾きを求めると次のようになる。

$$k = 14.6 \cdot 10^{11} \cdot E_g \quad (6)$$

相対地盤振動エネルギーは砕岩位置から比較的離れた地点で測定することができるので、施工時には容易に測定できる。この関係を用いることにより、相対地盤振動エネルギーより貫入剛性を推定することが可能である。ただし、相対地盤振動量―貫入剛性曲線の傾きは、地盤振動の測定位置と砕岩位置の距離およびその間の岩盤の物性により変化することが予想されるので、図9の関係を用いる場合には何点かの調査を事前に行い、傾きを求める必要がある。

4. まとめ

今回行った原位置試験の結果、次の事項が判明した。

- 1) 貫入量と岩盤に作用する荷重とはほぼ比例関係が存在する。このことは従来より、0.5mm程度の貫入量で成立することは指摘されていたが、50cmにもおよぶ場合についても成立した。
 - 2) エネルギーの釣合い式より、貫入剛性、最終貫入量、落下高さの間に(4)式のような関係が存在した。
 - 3) 貫入剛性と、単位落下高さあたりの地盤振動エネルギーとの間に比例関係が見られた。
- 上記の結果を用いると、砕岩中に容易に地盤振動から掘削深さを推定することができる。この原理をシステム化することにより容易に貫入量の把握ができ、次回の掘削の落下高さを判断することもでき、掘削効率を向上させることが可能である。

今後の課題として、図9に示した貫入剛性と地盤振動エネルギーの実験により求めた関係をFEMなどの数値計算により理論的に検討していきたい。

この研究を行うにあたり、御指導ならびに御協力いただいた本四公団第三建設局今治工事事務所殿、東京大学大久保誠介教授に謝意を表します。

参考文献

- 1) 本四公団：来島大橋海峡部地質調査総括概要書(1990)
- 2) 大久保誠介他：資源・素材学会誌, 108[No. 2], pp. 134~140(1992)
- 3) 後藤英一他：海底岩盤への砕岩棒の貫入特性, 資源・素材学会誌投稿中

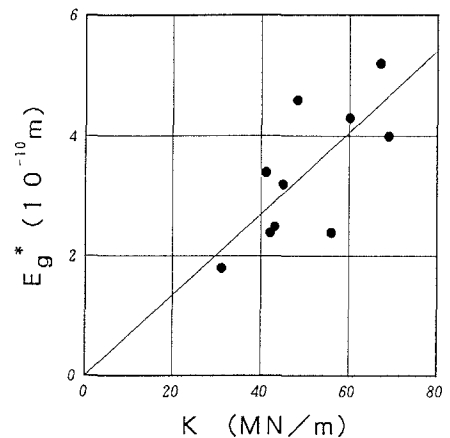


図9 相対地盤振動エネルギーと貫入剛性の関係