

スーパーコンピュータによる海底岩盤への砕岩棒の衝撃貫入解析

山本 修一 表 佑太郎
鈴木 健一郎 佐藤 峰生
(本社 土木本部設計部)

Analysis by Super Computer of Impact and Penetration of Percussion Rock Breaker at Seabed Rock

Shuichi Yamamoto Yutaro Omote
Ken-ichiro Suzuki Mineo Sato

Abstract

Numerical simulations of seabed rock breaking were carried out with a super computer based on the assumption that seabed rock excavation tests using percussion rock breakers constitute large-deformation elasto-plastic problems. The authors discuss the applicability of large-deformation elasto-plastic impact analysis to rock breaking simulation by comparing the calculated penetration depth of the rock breaker with the observed depth. As a result, both penetration depths show a qualitatively good relation. It is also made clear that application of impact analysis to rock breaking would be possible, with room for some improvement to be made in the rock constitutive model, among other things.

概要

砕岩棒工法による海底岩盤掘削試験を大変形弾塑性衝撃問題として捕え、スーパーコンピュータを用いて砕岩シミュレーションを実施し、砕岩棒の岩盤への貫入量を現地試験結果と比較することにより、大変形弾塑性衝撃解析による砕岩シミュレーションへの適用性を検討した。その結果、砕岩棒の岩盤への貫入量に関して、解析値と実測値とは定性的に良い対応を示し、岩盤の構成モデル等改善の余地は多いものの、本解析が砕岩シミュレーションへ適用できる可能性が確認された。

1. はじめに

海底岩盤掘削は、主に航路浚渫や港湾内障害物の撤去浚渫で行なわれることが多いが、最近では、本四架橋下部工に代表されるように、構造物の基礎掘削として実施されることが増えてきている。構造物基礎用の海底岩盤の掘削は、高い掘削精度が要求される点で航路浚渫等とは異なる。海底岩盤の掘削工法は種々あるが、構造物基礎用の大規模掘削では、発破工法、砕岩棒工法、衝撃式砕岩機工法のいずれかが採用されることが多い。これらのうち、砕岩棒工法は航行船舶に対する安全性、経済性および浚渫における実績など、他の工法に比べて有利な点が多いが、掘削深さの正確なコントロールが難しく、掘削後の基礎岩盤の健全性が不明であるという欠点がある。

こういった状況下、本四架橋来島大橋の基礎建設予定地点において、砕岩棒工法による岩盤掘削試験が作業能率、施工性および砕岩状況等を調査する目的で実施された。

ところで、近年、コンピュータの発達に伴い数値計算への期待と要求が高まってきている。かつては実質的に計算不可能であった大規模な、あるいは高精度な流れ解析、各種連成解析、衝撃解析等の非線形性の強い過渡現象が解析

可能となりつつある。

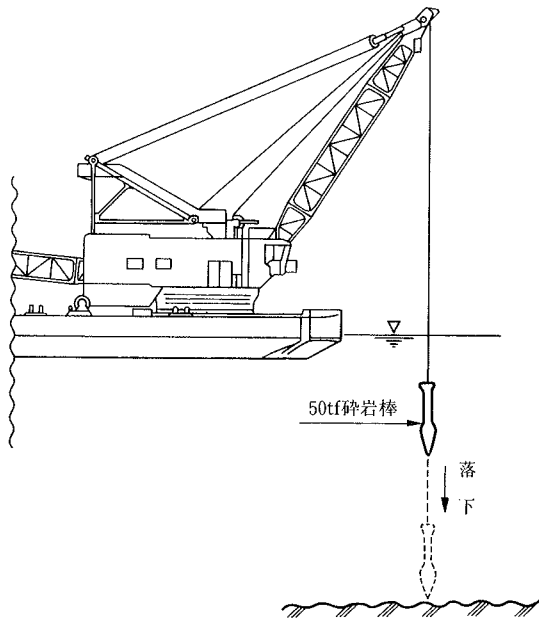
そこで、スーパーコンピュータ（日本電気製 SX-1EA）と汎用非線形解析プログラム ABAQUS を用いて前記砕岩試験の衝撃解析による数値シミュレーションを実施し、砕岩棒の貫入量を実測値と比較することにより、衝撃解析の砕岩シミュレーションへの適用性を検討した。

2. 砕岩試験

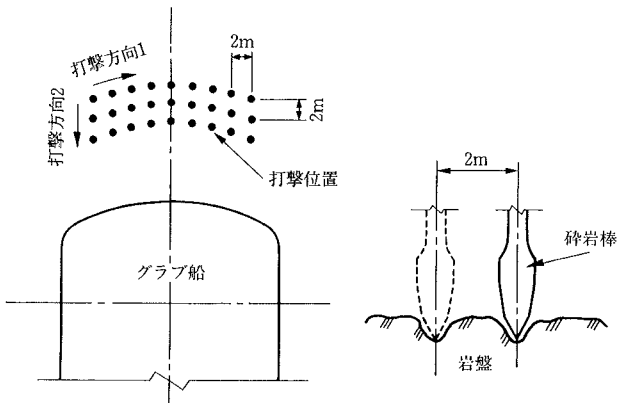
2.1 試験概要

試験は、作業能率、施工性、砕岩状況等を調査するため、種々の岩盤に対し砕岩ピッチ、砕岩棒落下高さおよび落下回数を変化させて行なわれたが、ここでは解析の対象とした試験についてのみ記述する。

砕岩は、図-1 に示すように砕岩棒付きグラブ船により、砕岩棒を水中落下させて行なわれた。砕岩棒重量は 50 tf、落下高さは 20 m である。また、その要領は図-2 に示すように同一ポイントに 15 回落下させた後、砕岩ポイントをピッチ 2 m で次ポイントに移すといった手順で行なわれた。なお、掘削する岩盤は風化の進行した花崗岩で、ダム基礎岩盤分類では CL 級に相当する。



図一1 砕岩棒付きグラブ船



図一2 砕岩要領

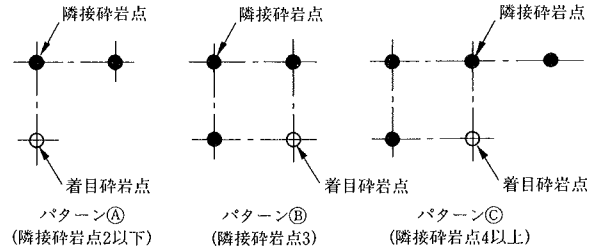
2.2 試験結果

砕岩棒の貫入量は隣接砕岩の影響を受けると考えられるので、図一3に示すように隣接砕岩ポイント数により3パターンに分類する。

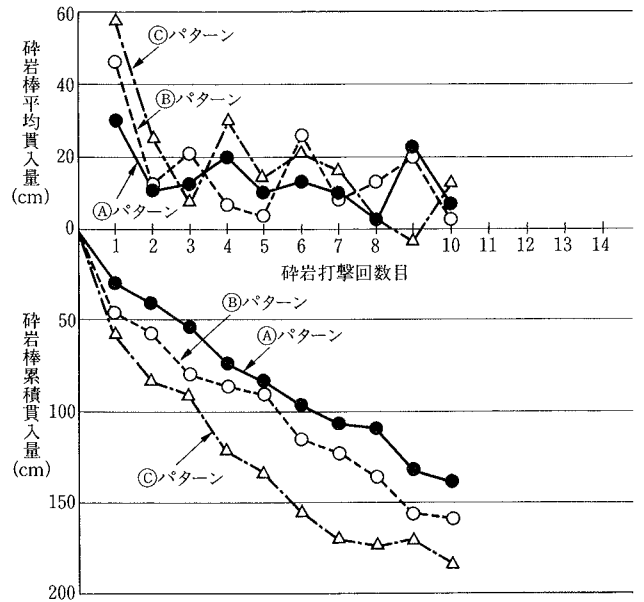
図一4に砕岩位置パターン別の砕岩棒貫入量と砕岩打撃回数目の関係を示す。貫入量は、(Aパターン) < (Bパターン) < (Cパターン) となっており、隣接する砕岩点が多いほど大きくなる傾向が見られる。特に、打撃回数一回目が隣接砕岩点数の影響を大きく受けていることがわかる。

なお、回数目によっては貫入量が前回回数目より大きくなっているが、その理由としては、

- ・打撃回数目ごとに砕岩ズリの影響が異なること
- ・同一箇所に砕岩棒が落下しない可能性があることが考えられる。



図一3 砕岩位置パターン分類



図一4 砕岩位置パターン別砕岩棒貫入量

3. 解析方法

砕岩棒による砕岩は、いわゆる衝撃問題としてとらえることができる。衝撃問題は簡略化して静的問題として取り扱われる場合もあるが、ここでは、できるだけ実現象に近い状態を再現するため、有限要素法 (FEM) を用いて動的問題として取り扱う。また、砕岩棒を直接モデル化して岩盤に衝突させることにより、砕岩棒と岩盤の接触・摩擦を考慮する。さらに、岩盤は大変形することから変位一ひずみの非線形性 (幾何学的非線形) とひずみ一応力の非線形性 (材料非線形) を考慮する。

以下に、本解析での仮定条件を列挙する。

- ・岩盤は、等方均質材料で、連続体である。
- ・岩盤は、非透水性を有する。
- ・砕岩棒は、変形しない剛体である。

3.1 運動方程式

衝撃問題の有限要素法定式化においては、空間の離散化を行なう場合にラグランジェ表現を用いる場合とオイラー表現を用いる場合とがある。オイラー法は節点および要素が空間に固定されるため、流れによる大きなひずみがある場合に有利であるが、移流項、境界移動を考慮する必要があり、変位履歴に対して特別な処理を必要とする。一方、ラグランジェ法は、物質に固定した節点および要素を用い

るので、材料特性、境界条件、接触による相互干渉などが適切に表現できる。しかし、大きなひずみがある場合には適切な要素分割と境界条件を維持するために要素再分割および境界条件の再設定などの処理が必要である。

どちらの方法を採用するにしても、質量保存則、運動量保存則、構成則などを考慮してエネルギー保存則を仮想仕事の原理に基づいて離散化すると、支配偏微分方程式は次のような常微分方程式に書き換えられる。

$$[M] \{\ddot{u}\} + [C] \{\dot{u}\} + [K] \{u\} = \{f\}$$

ここに、 $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ および $\{f\}$ はそれぞれ質量マトリクス、減衰マトリクス、剛性マトリクスおよび外力ベクトルであり、 $\{u\}$ は未知変位ベクトル、 \cdot は時間に関する微分を表わす。

ABAQUS では、空間の離散化にラグランジェ法を用いているが、その欠点を補うために要素形状がいびつにならないよう適宜要素再分割を行なった。

3.2 接触・摩擦

接触における幾何学的条件と接触法線方向の接触力に関しては、物理的には接触力を表わすラグランジェ乗数により定式化する方法⁹⁾を用いた。

また、接線方向の摩擦・滑りについては、クーロンの摩擦モデルに従う弾塑性非線形パネの考えを用いた。したがって、滑る条件式は

$$T \geq \mu N$$

ここに、

T : 接触面に作用するせん断力

μ : 摩擦係数

N : 法線方向の接触力

さらに、滑り量 r はその弾性成分 r^e と塑性成分 r^p で次式のように表わされる。

$$r = r^e + r^p$$

したがって、せん断力 T は付着剛性 S と弾性滑り量 r^e により、

$$T = S r^e$$

と表わされる。すなわち、図-5 からわかるようにせん断力がクーロンの摩擦力に達するまでは付着剛性 S により弾性的に相対変位を起し、クーロンの摩擦力に達すると塑性流れを起す。

3.3 材料非線形

不連続体岩盤を連続体とみなして、その降伏および構成則を弾塑性モデル近似により解析することが、その問題点

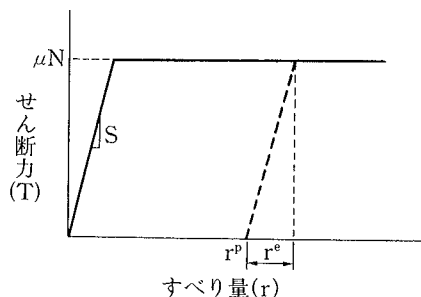


図-5 摩擦モデル

を指摘されつつもまだ主流のようである。それは提案されている不連続体モデルが、現段階では実用性、信頼性に乏しいからだと考えられる。また、一般に、衝撃問題においては材料のひずみ速度依存性を考慮する必要があるが、岩盤材料の高ひずみ速度依存性に関する定量的なデータは非常に少ない。

そこで、この解析では岩盤をひずみ速度に依存しない弾塑性体と仮定し、降伏応力が拘束圧に依存する Drucker-Prager の完全塑性モデルを用いた。

4. 解析条件

解析条件一覧を表-1 に示す。

砕岩棒の岩盤衝突時の落下速度は、次式²⁾により求めた。

$$v = \frac{a}{b} - \frac{2a}{b(1+e^{2abt})}$$

$$h = \frac{a}{b} t - \frac{1}{b^2} \ln \frac{2e^{2abt}}{1+e^{2abt}}$$

$$a = \sqrt{g \left(1 - \frac{\rho_w}{\rho_M}\right)}$$

$$b = \sqrt{\frac{\rho_w A C_D}{2M}}$$

ここに、

v : 砕岩棒の落下速度 (m/s)

h : 砕岩棒の落下距離 (m)

t : 砕岩棒の落下時間 (s)

g : 重力加速度 (=9.8 m/s²)

ρ_w : 水の密度 (=1.025 t/m³)

ρ_M : 砕岩棒の密度 (=7.850 t/m³)

A : 砕岩棒の抵抗面積 (=1.980 m²)

C_D : 抵抗係数 (=0.8)

M : 砕岩棒の質量 (=50 t)

動的ヤング率およびポアソン比は、PS 検層試験結果から P 波速度、S 波速度により算出した。また、強度定数は三軸 UU 試験結果、せん断試験結果、岩盤区分別設計地盤定数³⁾、本四公団の推定法⁴⁾を総合評価し決定した。摩擦係数は、海中鉄構と岩盤の設計用静止摩擦係数を用いた。

5. 解析モデル

解析は三次元で行なうのが望ましいが、本解析ではモデルを二次元軸対称回転体として行なった。したがって、隣接砕岩のない、1ポイントのみの砕岩解析である。なお、砕岩棒は回転体ではないので回転体への補正近似を施した。

また、有限要素法による動的応答解析では、モデル境界、要素の大きさおよび時間積分における解析時間増分の設定に注意を要する。以下に砕岩棒および岩盤の有限要素モデルと解析時間増分の設定について述べる。

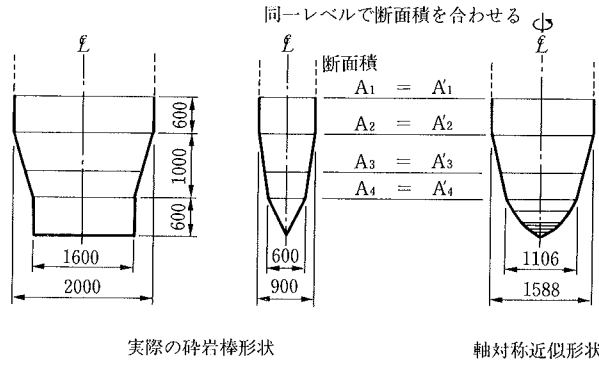
5.1 砕岩棒のモデル化

砕岩棒の岩盤への貫入は、岩盤の破壊と砕岩棒の破壊域への動的支圧が支配的であると考え、図-6 に示すように、貫入深さに対し貫入体積が等しくなるよう同一レベルの断面面積を等しくすることで、軸対称回転体近似した。

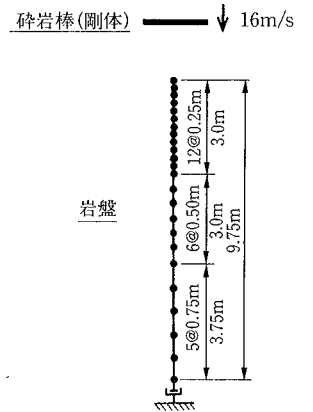
表一 解析条件一覧

項目	設定値
対象土層	CL層
砕岩棒の重量	5.00×10^4 (kg)
砕岩棒の落下高さ	20.0 (m)
砕岩棒の落下回数	5
砕岩棒の落下速度	16.0 (m/s)
質量密度 ρ	2.35×10^3 (kg/m ³)
動ポアソン比 ν_d	0.370
動弾性係数 E_d	3.33×10^9 (N/m ²)*
粘着力 c	3.92×10^6 (N/m ²)*
内部摩擦角 ϕ	38.0 (deg.)
砕岩棒と岩盤の摩擦係数	0.300

*1N=0.102kgf, 1N/m² (PA) = 1.02 × 10⁻⁵kgf/cm²



図一六 砕岩棒の軸対称近似 (単位: mm)



図一七 検証解析モデル

5.2 解析時間増分

本衝撃問題においては、衝突初期に著しい変化が起こることが予想される。したがって、解析初期の解析時間増分 (Δt) はきわめて小さくする必要がある。しかしながら、時間と共に変化は緩やかになるであろうから、それと共に Δt は大きくした方が経済的となる。そこで、本解析では解析精度をおとさずに効率的に計算を進めることができる自動時間増分法¹⁾、すなわち、解の収束性を常にチェックしながらそのつど Δt を決定していく方法を用いた。その際、初期 Δt は 2.0×10^{-7} (sec) とした。

5.3 岩盤の有限要素メッシュ分割

5.3.1 検証解析 岩盤のメッシュ割りは、一次元弾性モデルによる検証解析結果をもとに決定した。以下に検証解析モデルとその結果について記述する。

検証解析モデルは、図一七に示すもので、飛来する剛体の衝突速度、質量および一次元でモデル化した岩盤の物性は、4章で設定した条件と同等である。モデルの下端には衝撃応力波が反射しないよう粘性境界 (ダッシュポット) をセットし、岩盤の無限性を考慮した。

図一八に解析結果の軸応力分布を示す。剛体が一次元弾性体に衝突した場合の衝撃応力度 σ の理論式は、衝突速度 V 、ヤング率 E 、質量密度 ρ により、

$$\sigma = V\sqrt{E\rho}$$

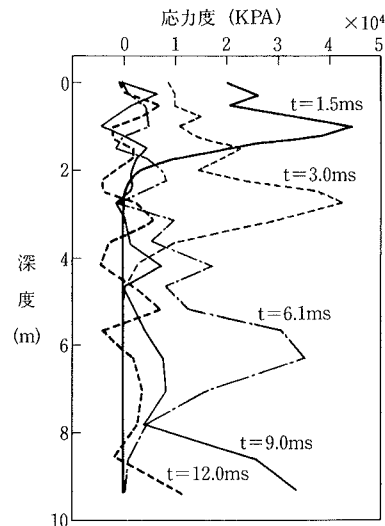
で表わされる。したがって、

$$\sigma = 4.48 \times 10^4 \text{ (KPA)}$$

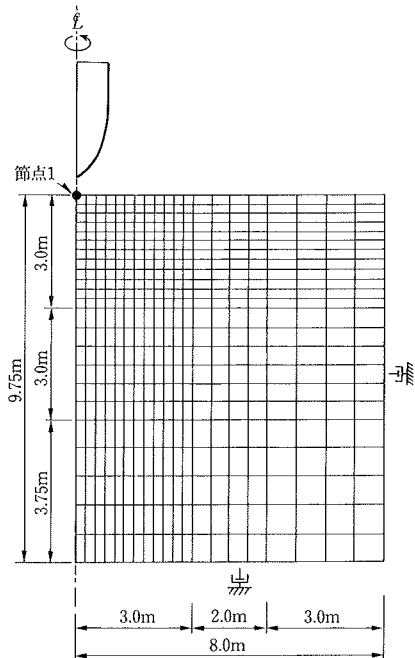
図一八より、解析結果の応力波ピークの下方面への伝播は深度 3m 付近まで理論値にほぼ一致していることがわかる。また、下端まで達した応力波はダッシュポットで吸収されている様子が見える。すなわち、この解析は少なくとも砕岩の影響を受ける表層部の応力伝播を適切に表現することができているといえる。

なお、その他に検証解析から次のことが明らかになった。

- ・メッシュ幅が大きい (要素分割が粗い) ほど応力波の伝播速度の低下と、伝播過程における応力ピークの低下が著しい。



図一八 検証解析結果 (軸応力度分布)



図一九 軸対称解析モデル

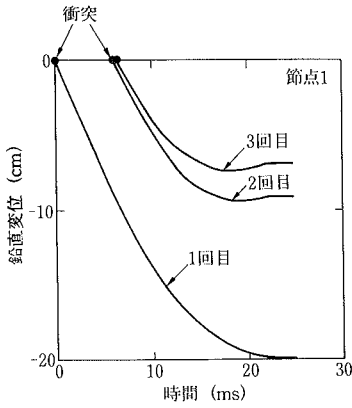


図-10 鉛直変位時刻歴

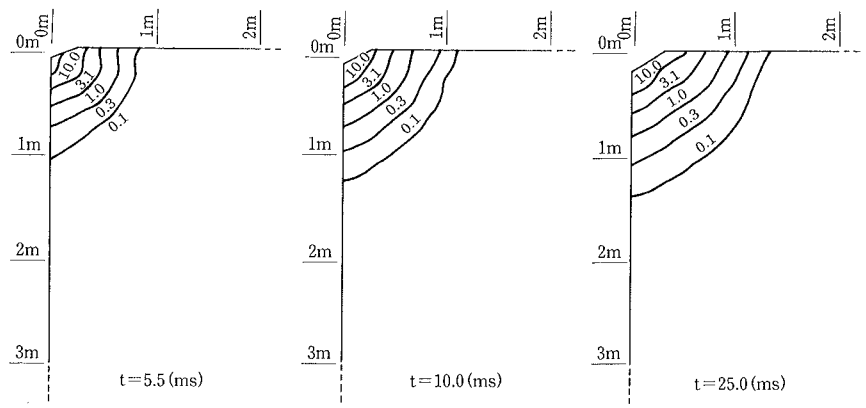


図-11 打撃1回目の塑性ひずみ分布 (%)

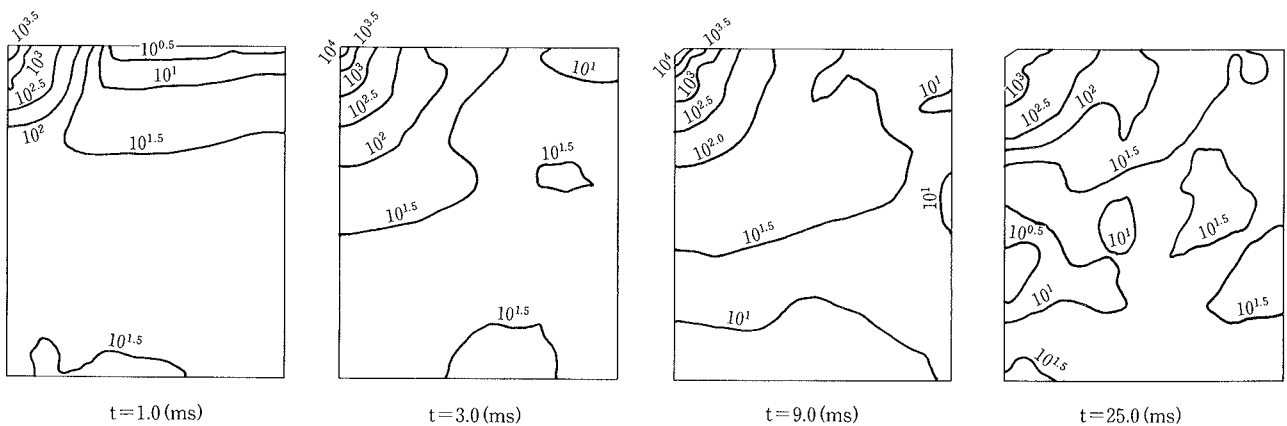


図-12 打撃1回目の相当応力度分布 (KPA)

5.3.2 岩盤の FEM モデル 図-9 に軸対象解析における FEM モデルを示す。岩盤の要素分割は、深さ方向に関しては前記検証解析と同一とした。また、側方および下方の無限性を考慮するために、両境界の全節点にダッシュポットを取り付けた。

6. 解析結果と考察

打撃1～5回の解析を通して、砕岩棒が岩盤から離れて跳ね上がるような現象は起こらなかった。このことは、実現象とも調和的であり、これは、岩盤の塑性化と砕岩棒と岩盤との摩擦によるものと考えられる。

図-10は打撃1～3回目の節点1 (図-9 参照) の鉛直変位量の時刻歴である。3回とも、衝突初期は砕岩棒の衝突速度 (16 m/s) とほぼ同等の一定速度で変位するが、その継続時間は回数を重ねるにつれ短くなっている。この初期速度の継続時間の違いが最大変位量 (= 砕岩棒の貫入量) の違いに大きく影響している。また、打撃回数が増加とともに、衝突初期の砕岩棒と岩盤の接触面積が増加することを考えあわせると、貫入量は衝突時の接触形態の影響をかなり受けていることが推測される。

図-11に打撃1回目の塑性ひずみ (ϵ^p) 分布の経時変化を、図-12に相当応力度 ($\bar{\sigma}$) 分布の経時変化を示す。

$$\bar{\epsilon}^p = \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{\epsilon_{ij}^p \epsilon_{ij}^p}$$

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{S_{ij} S_{ij}}$$

ここに、

ϵ_{ij}^p : 塑性ひずみテンソル

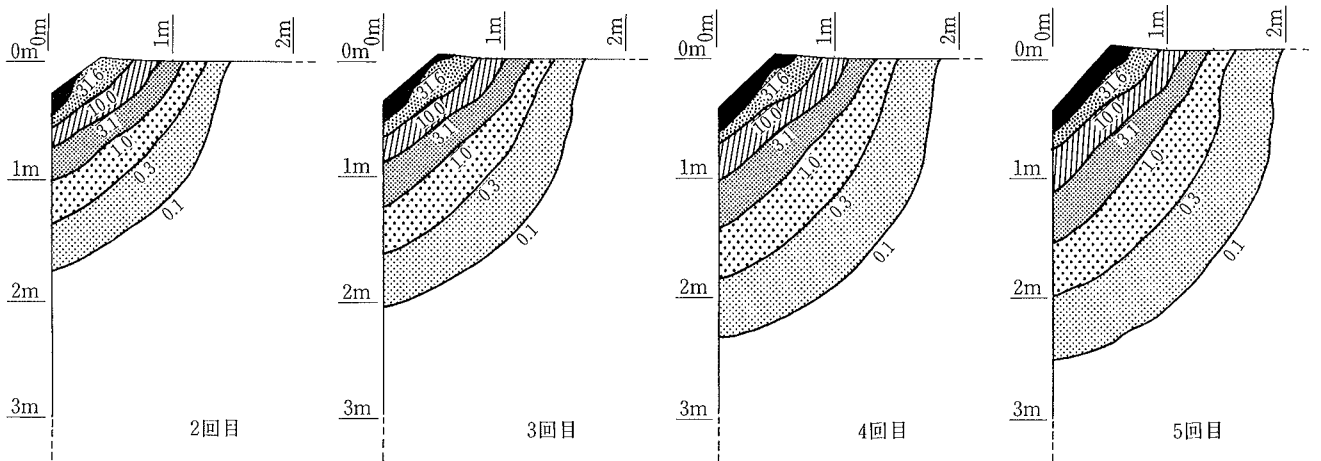
S_{ij} : 偏差応力テンソル

塑性ひずみおよび応力は、各時刻とも砕岩棒衝突ポイント近傍 (左上) が非常に高く、そこから離れるにしたがって指数関数的に減少している。

応力波の伝播は、一次元弾性解析の結果とは異なり、応力ピークの伝播は認められない。これは、塑性ひずみの分布およびその経時変化からわかるように、岩盤が塑性化し岩盤内に塑性ひずみが累積することで衝撃エネルギーが吸収されているためである。

図-13は、打撃2回目から5回目の打撃終了時の $\bar{\epsilon}^p$ の分布を変形図上に表わしたものである。回数を重ねるごとに塑性領域が拡大していき、5回目の打撃終了時には少なくとも、中心軸上で深さ方向に2.5 m、岩盤表面で水平方向に半径2 mの範囲まで塑性化していることがわかる。

次に、打撃回数ごとの貫入量とその累積量を図-14に示す。解析は隣接砕岩の無い場合を想定しているため、観測



図一13 各打撃終了時の変形と塑性ひずみ分布 (%)

値として、2章に示す砕岩位置パターンAの隣接砕岩点数2以下の場合を比較対象とした。図より、全般的に計算結果は観測値より小さいが、1回目が2回目以降に比べてかなり大きく2回目以降徐々に小さくなる傾向をよく表現している。

7. まとめ

砕岩試験に対し、岩盤を連続体と仮定した衝撃解析を行った結果、砕岩棒の岩盤への貫入量に関して解析値は実測値と定性的に良い対応を示した。これは、本解析法の砕岩シミュレーションへの適用性を示唆するものと思われる。

しかし、本解析は、砕岩棒のモデル化、岩盤の透水性および構成則等、仮定条件が多く、これらの影響については不明である。また、解析の妥当性を検討するには、砕岩棒の貫入量だけでなく、岩盤の破壊性状(破壊範囲、形状等)の実測との対比が必要と思われる。

今後の課題として、以下に示す項目に対する検討、パラメータスタディおよび実測データの収集、蓄積が必要である。

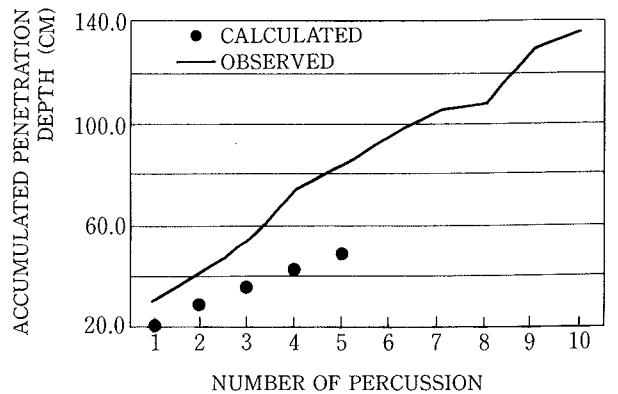
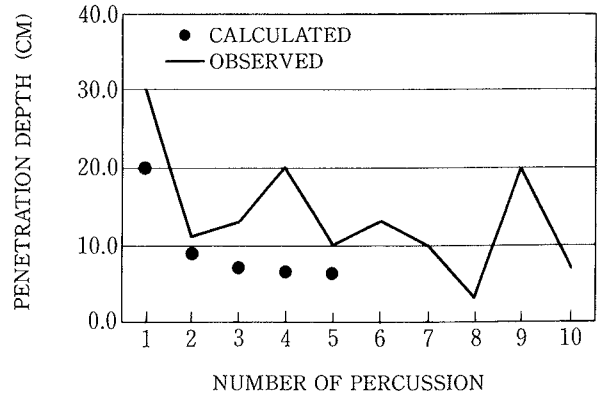
- ・砕岩棒のモデル化
- ・高ひずみ速度での岩盤物性とモデル化
- ・砕岩ブリの影響とモデル化
- ・岩盤の破壊状況の把握
- ・隣接砕岩の影響

あわせて、ひび割れ、破碎等、岩盤の不連続性を考慮した解析手法を検討する必要がある。

最後に、本報告で述べた解析結果のポスト処理はエンジニアリングワークステーションSUN4によって行ない、巻頭グラビアに示す画像をアニメーション化することによって動的現象の理解を容易にした。

参考文献

1) Hibitt, Karlsson & Sorensen, Inc.: ABAQUS theory



図一14 打撃回数と砕岩棒貫入量の関係

manual, Version 4. 6, (1987)

2) 八鉦, 川向, 稲垣: 香川県直島海底岩盤掘削工事, 建設の機械化, (1980, 2), p. 19~24
 3) 井上: 伯方・大島大橋岩盤試験解析, 本四技報, No. 18, p. 30~35 (1981. 10)
 4) 本州四国連絡橋公団: 風化花崗岩の支持特性判定要領(案), (1980. 3)