

投稿論文(和文ノート)

**TECHNICAL
NOTE**

コーン型プランジャーをもつシュミットロックハンマーを用いた自由断面掘削機の掘削能率評価に関する一考察

荒木義則¹・宮地明彦²・日永田雅司³・中原浩昭⁴・古川浩平⁵・中川浩二⁵

¹正会員 工修 中電技術コンサルト(株)水工部 (元山口大学助手) (〒734 広島市南区出汐2-3-30)

²正会員 工博 日本国土開発(株)第二営業本部土木営業部長 (〒107 東京都港区赤坂4-9-9)

³正会員 日本道路公団 福岡建設局 建設部工務課 (〒810 福岡市中央区天神2丁目14番13号)

⁴正会員 工修 日本道路公団 高松建設局 松山工事事務所 (〒790 松山市北土居町195-1)

⁵正会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科

自由断面掘削機の掘削能率を評価する一つの試みとして、シュミットロックハンマーの反発度試験を行った。試験ではプランジャーを自由断面掘削機のビット形状を模擬しコーン型にしたものと従来から使用されている標準のものを用い、プランジャー形状の違いによる反発度の特徴を示した。そして自由断面掘削機の掘削能率は、コーン形状プランジャーによる反発度を用いた評価が有効であることを示した。

Key Words : schmidt rock hammer , partial face machine , cutting rate , cone shaped plunger

1. はじめに

自由断面掘削機の施工性を評価する要因として、単位時間当たり純掘削能率(以下掘削能率と呼ぶ)、単位時間当たりビット消耗量、稼働率などがあげられる^{1)~3)}。その中で通常、自由断面掘削機の掘削能率は、対象岩盤から取り出された供試体の一軸圧縮強度や現場におけるシュミットロックハンマー反発度などを基準として評価されているが⁴⁾、岩盤の種類や風化変質、節理の状態、湧水などの岩盤の状態が変化すれば、それに伴って掘削能率も影響を受けることが指摘²⁾されており、掘削能率の評価は大変難しいのが現状である。

本研究では、シュミットロックハンマーの反発度に自由断面掘削機の掘削特性を反映させる一つの試みとして、自由断面掘削機のビット形状を模擬したプランジャーを試作した。自由断面掘削機の掘削メカニズムは、切削ビットが多数付いた切削ドラムを切削面にある一定の推力で押し付けることにより、ビットを岩盤内に圧入するとともに、横方向に力を加えることにより岩盤を掘削する。この切削ビットによる圧入現象とシュミットロックハンマーの反発度の類似性をもたせるため、シュミットロックハン

マーのプランジャー形状を自由断面掘削機の切削ビットに似せて作ることにより、シュミットロックハンマーの反発度に自由断面掘削機の岩盤掘削特性をある程度反映できるのではないかと考えた。そして現場における反発度試験からプランジャーの先端形状の違いによる反発度特性および反発度と掘削能率との相関関係から適用性を検討した。またシュミットロックハンマーの反発度と現場技術者により観察された日本道路公団の切羽観察記録を用いて自由断面掘削機の掘削能率を評価した。

2. 現場概要とシュミットロックハンマーの反発度試験

実験を行った現場は、市街地近傍の道路トンネルで、発破工法では騒音・振動公害を発生させる恐れがあると判断された。岩盤は大部分が安山岩で一部に凝灰角礫岩も見られた。地山の一軸圧縮強度は、150~800kgf/cm²程度で自由断面掘削機による掘削が可能であるという判断から自由断面掘削機による掘削が行われた。この現場では極端に脆弱な岩盤や非常に硬い岩盤はなく、自由断面掘削機による順調

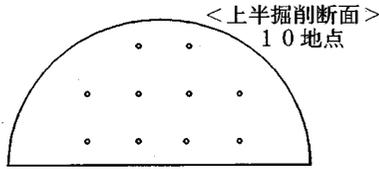


図-1 切羽面の計測地点

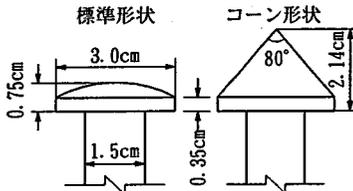


図-2 プランジャー形状

な切削が行われた。また、地山等級は日本道路公団の岩盤分類規準⁵⁾でCまたはDであった。

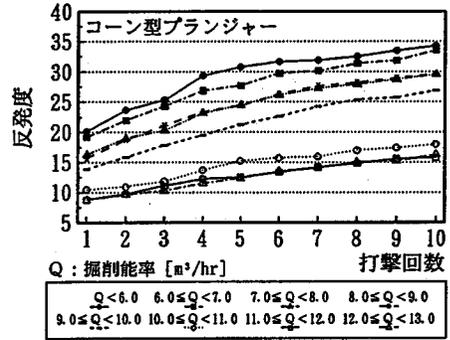
シュミットロックハンマー反発度の測定は、図-1に示すように上半掘削面当たり10点とし、各点10回連続して打撃測定を行なった。実験に用いたシュミットロックハンマーの先端形状は、図-2に示す通りであり、自由断面掘削機のビットを参考に製作したコーン形状のプランジャーと通常岩盤計測に用いられる標準形状のプランジャーの2種類を使用した。以後この形状のプランジャーをそれぞれコーン型プランジャー、標準型プランジャーと呼ぶことにする。また比較のため標準型プランジャーを用いた計測も併せて行った。なお、実測されたデータは、80切羽であった。

3. 実験結果および考察

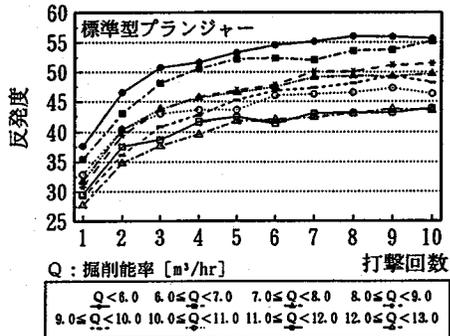
本トンネルの岩盤は前述のように大部分が安山岩であり、凝灰角礫岩の部分はわずかであった。そのため本研究は、安山岩部分のデータのみを対象として行うこととした。また、データの解析では、2種類のプランジャーを用いたシュミットロックハンマーの反発度特性を検討するとともに、シュミットロックハンマーの反発度と一日毎のトンネル進行長と実稼働時間から求めた自由断面掘削機の時間当たり実掘削能率 (m^3/hr) とを対応させることにより、その適用性を検討した。

(1) プランジャー形状の違いによる反発度特性

シュミットロックハンマーの反発度は、図-1に示すように各切羽面に10点の計測点を設け、シュ



(a) コーン型プランジャーによる反発度特性

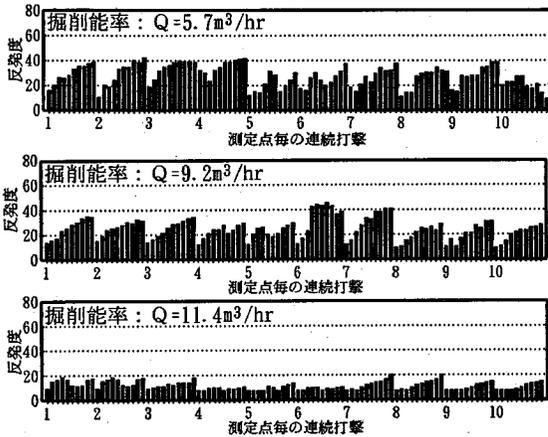


(b) 標準型プランジャーによる反発度特性

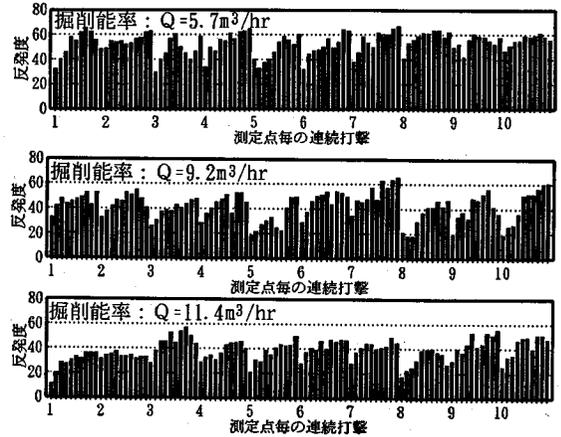
図-3 掘削能率別にみた反発度特性

ミットロックハンマー先端をコーン型プランジャーと標準型プランジャーの2種類変化させて反発度を計測した。反発度の測定は、通常のシュミットロックハンマーの使用 방법에準じて行った。

まず実測されたシュミットロックハンマーの反発度の基本的な特徴を知るため、連続打撃に伴い反発度はどのような変化を示し、プランジャー形状の違いにより、どのような反発度特性を持つかを調べることにした。そこで、自由断面掘削機の掘削能率(Q)の程度に応じて切羽毎に反発度を分類し、各打撃回数毎に平均値を取ったものを図-3に示した。図-3(a)は、コーン型プランジャーによる反発度の平均値を表したもので、打撃回数の増加に伴い反発度は若干の曲がりはあるもののほぼ直線状に増加し、最終回(10回目)で最大値を示した。また掘削能率別に見た反発度は、最初の1回目の打撃において10~20の値となりその分布幅は10程度であるのに対して、最終回の10回目では15~35の値となり分布幅が20程度と広がっている。さらに、掘削能率別に見ると掘削能率が高いものは、低いものに比べて傾きが小さいことが分かる。特に、掘削能率 $Q=10.0m^3/hr$ 以上になると打撃回数に伴う反発度の変化および掘削能率の違いによる反発度の変化が少ないことがわかる。



(a) コーン型プランジャーを用いた反発度測定例



(b) 標準型プランジャーを用いた反発度測定例

図-4 代表的な反発度測定結果

一方、図-3 (b) は、標準型プランジャーの反発度の平均値を表しており、打撃回数の増加に伴い反発度は曲線状に増加しており、その傾向はどの掘削能率に対するものをとっても打撃回数が4回目付近までは反発度が急激に増加し、その後はゆるやかな増加傾向にあり、10回目付近ではほぼ一定値に落ち着く傾向を示している。このことから先のコーン形状の場合に打撃回数による反発度の増加がほぼ直線状であったことと比べると明かなる違いが見られる。測定の初期段階において反発度特性がコーン形状と標準形状で異なる理由は、コーン形状は先端が尖っているのに対して標準形状の先端は平面であるため岩盤表面の凹凸部の影響を強く受け、反発度の変化が大きくなったものと考えられる。また、掘削能率別に見た反発度は、前述と同様の見方をすると1回目の打撃における反発度の分布幅は10程度であるのに対し最終回の10回目では分布幅が12程度となり、コーン型と比べて分布幅の変化の程度は少ないことがわかる。

次に、代表的な反発度測定例を図-4に示す。図-4 (a) は、コーン型プランジャーを用いた場合であり、掘削能率の低い岩盤順に整理してある。この図より、掘削能率が低いときは、各測定点とも一般に10回の連続打撃により反発度は階段状に増加し10回付近ではほぼ最大値を示している。そして、掘削能率が高くなると連続打撃による反発度は、同様の増加傾向を示すものの、その増加量は小さくなり、掘削能率が低い場合と比べて最大値が減少するのが認められる。それに対して、図-4 (b) は、図-4 (a) と同じ掘削断面における標準型プランジャーを用いた連続打撃例を示している。連続打撃に伴う反発度の変化は、コーン型プランジャーでの

反発度特性ほど明確な階段状の増加傾向にはならず、連打による反発度にばらつきが大きいことがわかる。また反発度は、全体的にコーン型プランジャーの場合と比べて高い値を示した。

(2) 反発度と掘削能率の関係

シュミットロックハンマーの反発度は、各切羽面で10点各10回の連続打撃において測定されているため、切羽面を代表する反発度を求める必要がある。そこで、各切羽面を代表する反発度として表-1に示す5通りのケースを考え掘削能率との関係を調べた。

各ケース毎の反発度と掘削能率の関係を図-5～図-9に示す。図中の記号●はコーン形状を記号□は標準形状のプランジャーを用いた測定結果を示し、直線回帰を行なった結果をそれぞれ実線と点線で表した。さらに r_c 、 r_s はそれぞれコーン形状、標準形状を用いたときの反発度と掘削能率との相関係数である。

図-5のケース1では、各点最初に得られた反発度の平均を用いており、反発度と掘削能率との相関係数は、コーン形状 $r_c=-0.596$ 、標準形状 $r_s=-0.258$ となり、計算ケースの中で最も低い値を示した。これは最初の打撃においては図-3に見られるように、反発度は岩盤の表面凹凸の影響を大きく受けるため岩盤特性を良く反映しないためと思われる。また標準形状はコーン形状に比べて打撃面積が大きくなり、表面凹凸の影響が大きくなるのであろう。

図-6のケース2では、各点初めの3回の最大値の平均を用いており、ケース1と比べて反発度と掘削能率との相関係数は、コーン形状 $r_c=-0.628$ 、標準形状 $r_s=-0.348$ と両者ともやや高くなり、改善が

表-1 計算ケース

ケース	測定内容
1	1断面10点,各点最初に得られた反発度の平均
2	1断面10点,初めの3回で得られた反発度の最大値の平均
3	1断面10点,各点10回の反発度全ての平均
4	1断面10点,各点10回の反発度の最大値の平均
5	1断面10点,各点5回の反発度の最大値と最小値を除く平均

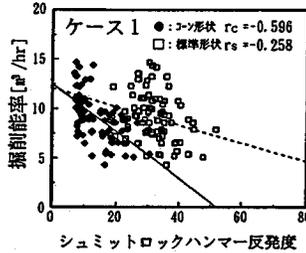


図-5 最初の反発度の平均値と掘削能率の関係

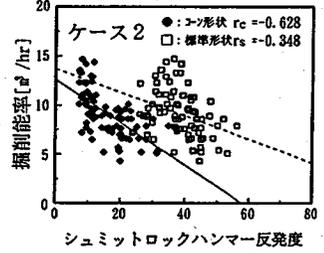


図-6 初めの3回の最大値の反発度の平均値と掘削能率の関係

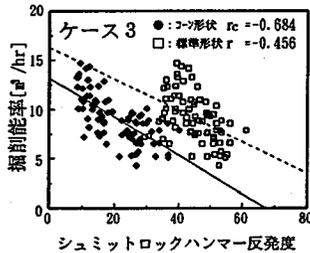


図-7 全ての反発度の平均値と掘削能率の関係

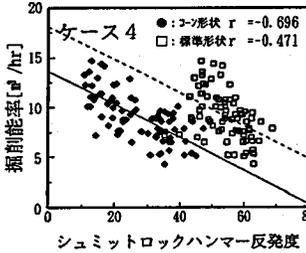


図-8 最大の反発度の平均値と掘削能率の関係

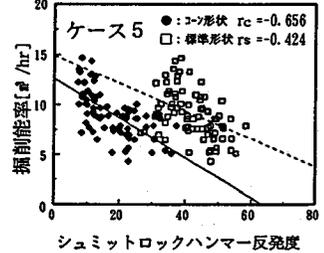


図-9 最大・最小値を除く5回の反発度の平均値と掘削能率の関係

見られた。しかしながら標準形状の相関係数は、コーン形状に比べて低い値を示している。この理由として、すでに図-3で示したように標準形状では、初期の回数における打撃では岩盤面が平滑化の過程にあることから、当ケースでも岩盤本来の反発度が得られなかったものと考えられる。

図-7のケース3では、各点10回の反発度全ての平均を用いている。反発度試験の測定回数を増やすことにより、反発度と掘削能率との相関係数は、コーン形状 $r_c = -0.684$ 、標準形状 $r_s = -0.456$ となり、ケース2よりも高くなった。

図-8のケース4では、各点10回の反発度の最大値の平均を用いており、反発度と掘削能率との相関係数は、コーン形状 $r_c = -0.696$ 、標準形状 $r_s = -0.471$ となり、両者とも計算ケースの中で最も高い相関係数を示した。また図-3で示したように反発度が最大値となるのは、コーン型プランジャーでは打撃回数10回目、標準型プランジャーでは7~10回目であり、連続10回の打撃で得られる最大の反発度は、自由断面掘削機の掘削能率を最も良く表していると考えられる。

図-9のケース5では、各点最初の5回の反発度の最大値と最小値を除く平均を用いている。この方法は、現在シュミットロックハンマーの標準的な測定方法として用いられているもの⁶⁾で、反発度と掘削能率との相関係数は、コーン形状 $r_c = -0.656$ 、標準形状 $r_s = -0.424$ となり、10回の連続測定を行ったケース3や4よりもやや相関係数が低い値を示した。これらのことから、従来の測定方法よりも

ケース4の測定方法のほうが、自由断面掘削機の掘削性をよりよく表すことができるといえる。

全てのケースにおいて、反発度と掘削能率との関係は、負の相関を示しており、反発度が大きくなると掘削能率は低下することを表している。また先端形状では、コーン形状のほうが標準形状よりも全てのケースにおいて相関係数が高い結果を示した。特に、ケース4のコーン型プランジャーによる連続打撃10回における最大の反発度は自由断面掘削機の掘削能率と非常に高い相関関係にあることが示された。これはプランジャー形状をコーン型とすることにより岩盤へのプランジャーの食い込みを可能にし、岩盤の硬さによる反発度の幅を広げる効果があったためと思われる。さらに標準形状は、ケース毎に相関係数の変化が大きいのに対して、コーン形状は、相関係数の変化が少ない。これは、コーン形状が連続打撃における比較的初期の段階から岩盤表面の状態の影響を受けにくく、地山状態になじみ易いことを表していると考えられる。

このことから、本実験を行った安山岩質地山で、地山等級がCまたはDランクの軟岩から中硬岩の岩盤に対しては、コーン型プランジャーを用いる方が標準形状のものより、現場への適用性は高く、有効であると判断される。

4. 自由断面掘削機の掘削能率評価

自由断面掘削機の掘削能率は、シュミットロック

表-2 切羽観察記録

① 切羽の状態	1. 安定	2. 鏡面から岩塊が抜け落ちる	3. 鏡面の押出しを生じる	4. 鏡面は自立せず崩れあるいは流出
② 素掘面の状態	1. 自立 (普請不要)	2. 時間がなつと硬み落ちる (後普請)	3. 自立困難掘削後早期に交換する (先普請)	4. 掘削に先行して山を削り取らなければならない
③ 圧縮強度	1. $e_1 \geq 1000 \text{ kgf/cm}^2$ ハンマー打撃はむ返る	2. $1000 > e_1 \geq 200$ ハンマー打撃でくだける	3. $200 > e_1 \geq 50$ 軽い打撃でくだける	4. $50 \text{ kgf/cm}^2 > e_1$ ハンマー刀先くいい込む
④ 風化変質	1. なし・健全	2. 岩目に沿って変色、強度や低下	3. 全体に変色、強度相当に低下	4. 土砂状、粘土状、破砕、当初より未固結
⑤ 割れ目の頻度	1. 間隔 $d \geq 1 \text{ m}$	2. $1 \text{ m} > d \geq 20 \text{ cm}$	3. $20 \text{ cm} > d \geq 5 \text{ cm}$	4. $5 \text{ cm} > d$ 破砕、当初より未固結
⑥ 割れ目の状態	1. 密着	2. 部分的に開口	3. 開口	4. 粘土をはさみ、当初より未固結
⑦ 割れ目の形態	1. ランダム方形	2. 柱状	3. 層状、片状、板状	4. 土砂状、細片状、当初より未固結
⑧ 湧水	1. なし、浄水程度	2. 湧水程度	3. 集中湧水	4. 全面湧水
⑨ 水による劣化	1. なし	2. 硬みを生ず	3. 軟弱化	4. 崩壊・流出

ハンマーの反発度と相関が高いことが前述のように明らかになった。しかし、掘削能率は岩盤そのものの強度だけでなく割れ目や湧水などの岩盤の状態の影響を受けることが指摘²⁾されていることから、本研究では、自由断面掘削機の掘削能率を評価する上において、シュミットロックハンマーの反発度のみによる場合とシュミットロックハンマーの反発度と岩盤の状態を表す地質的要因として切羽観察記録を用いた場合の2通りについて検討を行った。ここで切羽観察記録は、表-2に示すように切羽や素掘面の状態・圧縮強度・風化変質・割れ目の状態・湧水等の9項目からなり、1~4までのランクで評価されたデータである。

シュミットロックハンマーの反発度と切羽観察記録の各項目が自由断面掘削機の掘削能率に対してどの項目がどの程度影響を与えるかを分析する。分析には、多変量解析の重回帰分析(ステップワイズ法)を用いた。説明変数間に相関性の高い項目が含まれる場合に生じる多重共線性の問題⁷⁾については、計算の結果、説明変数間に単相関係数が1に近い項目は無く、説明変数をそのまま使用しても問題ないと判断した。ただし、切羽観察記録のなかで圧縮強度(C)、割れ目の形態(G)、水による劣化(I)の3項目は、全データ間での変動が無く、それぞれランク3、1、2を示し、掘削能率に関わらず一定値を示していたため、説明変数から除外した。

次に、コーン型プランジャーを有するシュミットロックハンマーの反発度のみにより得られた単回帰式を式(1)にコーン型と標準型プランジャーの両者のシュミットロックハンマーの反発度と切羽観察記録を用いた重回帰分析により得られた重回帰式を式(2)に示す。

$$Y = 13.47 - 0.16X_1 \quad (1)$$

$$Y = 8.76 - 0.17X_1 + 1.16X_2 + 1.01X_3 \quad (2)$$

表-3 標準重回帰係数と精度

採用項目	標準重回帰係数	精度
コーン型反発度	-0.718	重相関係数0.733 寄与率53.66% 分散比 $F_0=29.33$ >2.73 (5%有意水準)
割れ目の頻度	0.231	
湧水	0.160	

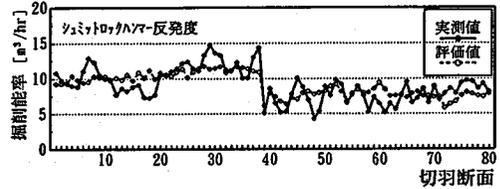


図-10 掘削能率のシステム同定(1)

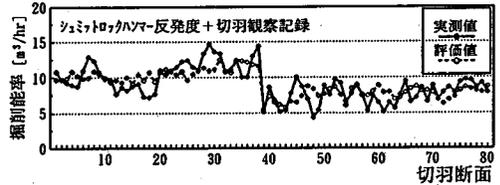


図-11 掘削能率のシステム同定(2)

ここで、 Y : 自由断面掘削機の掘削能率 (m^3/hr)
 X_1 : コーン型プランジャーを有するシュミットロックハンマーの反発度
 X_2 : 割れ目の頻度 (E: ランク)
 X_3 : 湧水 (H: ランク)

式(2)において採用された説明変数は、コーン型プランジャーを有するシュミットロックハンマーの反発度、割れ目の頻度(E)、湧水(H)の3項目となり、標準型プランジャーを有するシュミットロックハンマーの反発度は、システムから棄却された。ここで、採用された説明変数の各項目が目的変数に与える影響の度合いおよび重回帰式の精度を表-3に示した。表-3より、説明変数が目的変数に与える影響の度合いは標準重回帰係数で表され、コーン型プランジャーによる反発度が最も影響が大きく、続いて割れ目の頻度、湧水の順番となった。また、重回帰式の予測精度は、重相関係数 $R=0.733$ 、寄与率 $R^2=53.66\%$ 、分散比 $F_0=29.33$ で5%有意水準 $F_0=2.73$ を十分に上回っており、評価式として利用できる。

自由断面掘削機の掘削能率評価においてコーン型プランジャーを有するシュミットロックハンマーの反発度だけを用いた場合では、相関係数が0.696であったのに対し、岩盤の状態である切羽観察記録を加えることにより重相関係数は0.733を示し、シュミットロックハンマーの反発度だけの相関よりも精

度は若干向上した。そこで、単回帰による式(1)と重回帰分析による式(2)を用いて実測された掘削能率値と比較したものを図-10, 11に示した。ここで、●印は実測値を○印は評価値を表している。図-10および図-11とも全体的な傾向としては、評価値が実測値と比較的よく一致しており、特に切羽番号38までの掘削能率が高かった部分及び切羽番号39以降で岩盤が硬くなって掘削能率が落ちた部分が適切に評価されている。しかしながら、両者に顕著な差異は認められなかった。

5. まとめ

現在、自由断面掘削機の掘削能率評価には、岩盤の一軸圧縮強度またはシュミットロックハンマーの反発度が利用されているものの、実際の掘削能率をうまく表わさないことが多い。これは掘削能率の評価において自由断面掘削機の切削メカニズムに対する岩盤の強度および岩盤の状態の影響が十分に考慮されていないことが原因であると考えられる。そこで自由断面掘削機のビット形状を模擬したコーン型プランジャーをシュミットロックハンマーに取り付けて現場実験を行い、その有用性を示した。本研究の成果を取りまとめると以下の通りである。

1) 現場実験より、コーン型プランジャーをもつシュミットロックハンマーによる反発度と自由断面掘削機の掘削能率との相関性は高く、標準型プランジャーに比べて掘削能率の評価には有効である結果が得られた。

2) 測定方法としては10回の連続打撃を行い、その中で現れる最大値をその地点における反発度として利用した方がよいことが確認できた。

3) 自由断面掘削機の掘削能率は、コーン型プラ

ンジャーをもつシュミットロックハンマーによる反発度だけでも十分に評価することが可能であり、岩盤の状態として切羽観察記録のうち割れ目の頻度や湧水の影響を考慮することにより若干精度の向上につながることを示された。

以上のことから、コーン型プランジャーを用いたシュミットロックハンマーの反発度試験は、今後より多くの岩種、岩盤の状態に対して実験を積み重ねることにより、より良い自由断面掘削機の掘削能率評価の指標となりうると考えられる。最後に、本実験では連続打撃回数を最大10回として行っており、11回目以降の測定は行っていない。これは、現場測定における実用面から考えた著者らの判断であり、その妥当性については今後の検討の余地が残されている。

参考文献

- 1) ジェオフロンテ研究会編纂：山岳トンネルの新技術，土木学社，pp. 288-301，1991年11月。
- 2) 三谷 哲：ロードヘッダーの施工性評価基準案，熊谷技報，第45号，pp. 1-7，1989年3月。
- 3) 向 正，岡 清一郎：武田山トンネルの施工，土木技術，42巻，5号，pp. 33-42，1987年5月。
- 4) 菊地宏吉，斉藤和雄：岩盤計測におけるロックハンマーの考案とその適用，発電水力，No. 145，pp. 1-7，1976年11月。
- 5) 日本道路公団：設計要領第三集第9編トンネル，p. 34，1985年10月。
- 6) シュミットロックハンマー取扱い説明書，p. 5，富士物産株式会社。
- 7) 田中豊・垂水共之・脇本和昌：パソコン統計解析ハンドブックⅡ多変量解析編，pp. 16-19，共立出版，1989年7月。

(1994. 12. 16受付)

A STUDY ON THE EVALUATION OF THE CUTTING RATE OF THE PARTIAL FACE MACHINE BY USING A SCHMIDT ROCK HAMMER WITH A CONE SHAPED PLUNGER

Yoshinori ARAKI, Akihiko MIYAJI, Masashi HIEDA, Hiroaki NAKAHARA,
Kohei FURUKAWA and Koji NAKAGAWA

We performed the evaluation of the cutting rate of the partial face machine by means of the rebound number test using a schmidt rock hammer. In this test, we examined the process of the cutting rate by using two types of plunger, one was a cone shaped plunger imitating of bit shape of the partial face machine and the other one was a standard shaped it. And the rebound number test using a schmidt rock hammer with a cone shaped plunger was a help to the evaluation of the cutting ratio of the partial face machine.