

軟岩における孔内コーン貫入試験 (その1)

——装置および室内試験——

Bore Hole Cone Penetration Test on Soft Rocks (Part 1)

—Apparatus and Indoor Test—

野地正保* 本館静吾**

足田貞良*** 滝ヶ平正美***

Masayasu NOCHI, Seigo MOTODATE

Sadayoshi HIKITA and Masami TAKIGAHIRA

地山状態での軟岩の物性を評価する試験方法として、従来から行われている孔内載荷試験や孔内せん断試験は、必ずしも十分なものではない。そこで、新しく孔内コーン貫入試験装置を開発、作製した。この報告では、まず孔内コーン貫入試験装置の概要を説明し、次に孔内コーン貫入試験に用いるのと同じのコーンを用いた平面コーン貫入試験結果から、コーンの貫入特性の評価を行った。最後に、孔内コーン貫入試験結果から得られる貫入勾配量、貫入量、貫入勾配量と貫入量の平均値という3つの量と、一軸圧縮強度およびP波速度との対応についての検討を行った。その結果、コーンの角度を適切に選択することによって、孔内コーン貫入試験結果から一軸圧縮強度、P波速度をある程度定量的に推定できることが判明した。

《軟岩；孔内試験；コーン貫入試験》

Bore hole load test and bore hole shear tests have been often used for estimating in-situ strength of soft rock. But they aren't always suitable for their purpose. Therefore bore hole cone penetration test apparatus has been newly developed. In this report, firstly, the outline of bore hole cone penetration test apparatus is explained. Next, penetration characteristic of the cones is estimated by cone penetration test on the flat plane of ideal samples. Lastly, quantity of penetration incline, quantity of penetration and the average of these two amounts are gotten by bore hole cone penetration test. The correlation between these three amounts and unconfined compression strength, velocity of P-wave is examined. As a result, it is declared that unconfined compression strength and velocity of P-wave can be estimated quantitatively by bore hole cone penetration test with suitable choice of the cones.

Keywords: soft rock, bore hole test, cone penetration test.

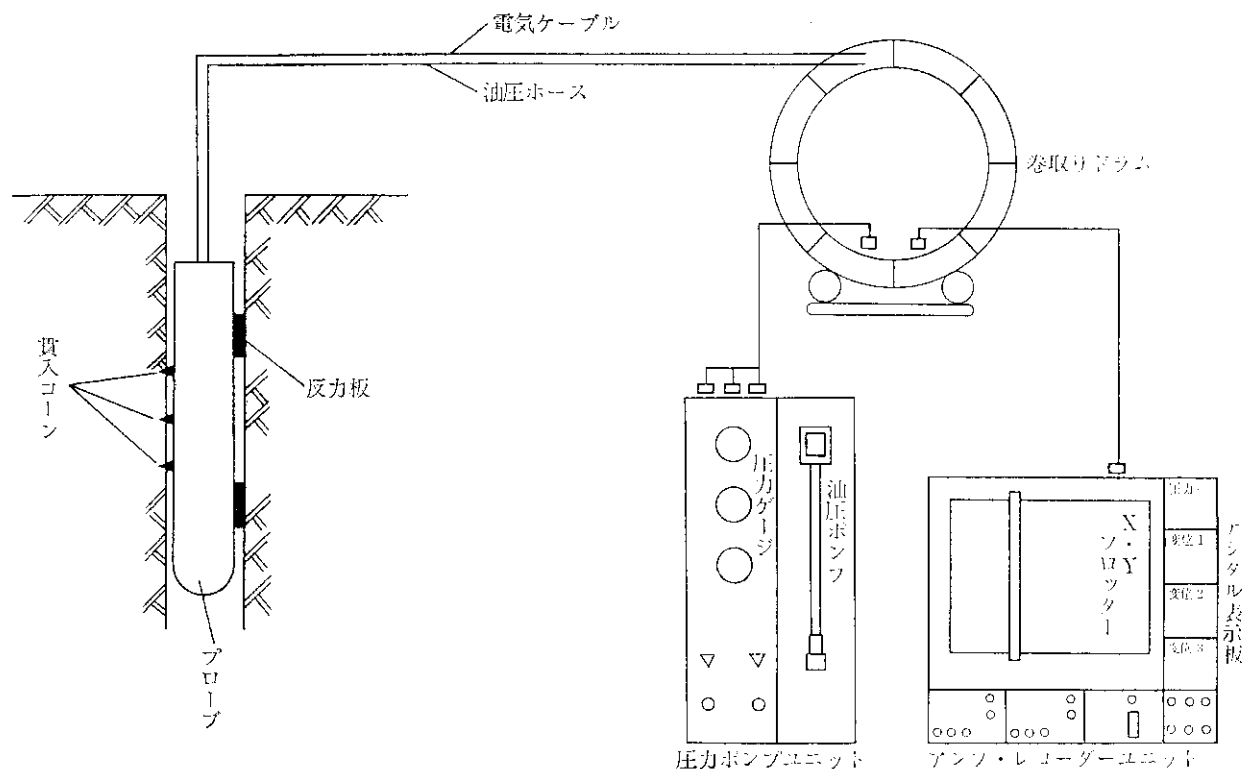
1. はじめに

近年、軟岩それも一軸圧縮強度で数 kg f/cm² から数 10 kg f/cm² の弱い軟岩上にダムなど大型土木構造物を築造する機会が増加していることから、軟岩の物性を正

しく評価することが重要な課題となっている。そのひとつとして、岩盤の変形性や強度をとらえるために、各種の孔内載荷試験や孔内せん断試験の装置が開発されている。

しかし、これらの装置も必ずしも目的に合ったもの

*地質研究室長 **同室主任研究員 ***同室員



図—1 孔内コーン貫入試験装置構成図

とはなっていない、物性値の定量的な把握については不十分なものとなっている。例えば、孔内载荷試験では平板载荷試験によって得られる変形係数との対応がうまくいかず、特に変形係数が 5000 kg f/cm^2 以下では、得られた数値の 1.5~3 倍以上で平板载荷試験の変形係数と一致するのが一般である。この原因として、载荷機構の違いなどがあげられるが、筆者らは軟岩では孔壁の乱れやゆるみが孔内载荷試験の試験値を著しく小さくする原因のひとつと考えている。また、同じ原因が孔内せん断試験の結果を満足いかぬものとしているのであろう。

上記のように、孔内载荷試験や孔内せん断試験のデータに、軟い岩盤においてあまり有効な定量的な結果を期待できないとしたら、定性的であってもこれらの試験より、より迅速で孔壁のごく表面の条件に左右されない試験方法が望ましい。この目的で、開発しようとしたのが孔内コーン貫入試験装置である。

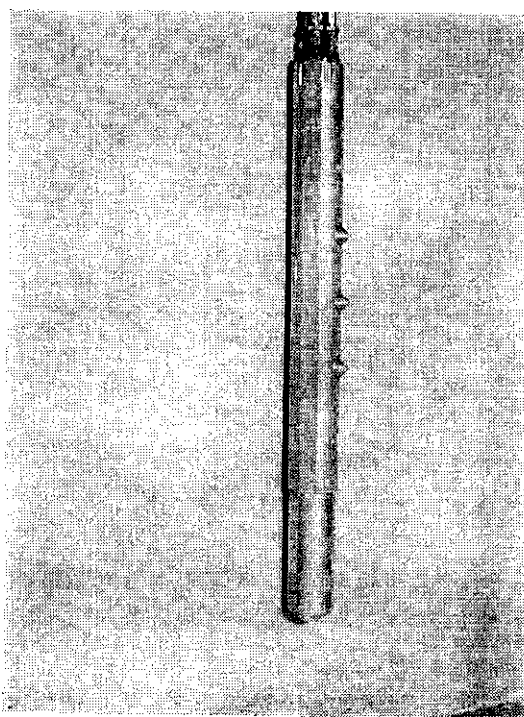
孔内コーン貫入試験装置は、すでに 2, 3 の現場で試験を実施したが、試験時間がきわめて短かいというに、音波検層によって得られた P 波速度値と試験結果がきわめてよい対応を示すなど、有望な調査手段であることが判明した。

この報告では、この装置の概要と室内で実施した予備試験結果について報告し、次報では現場における試験結果について報告する予定である。

2. 孔内コーン貫入試験装置の概要と特徴

孔内コーン貫入試験装置は、 $\phi 66 \text{ mm}$ のボーリング孔内に挿入可能なように設計されている。

装置は径 60 mm、長さ 713 mm の円柱のプローブ、貫入コーンの载荷圧と貫入量を記録するアンプ、レコー



写真—1 孔内コーン貫入試験装置のプローブ

コーンの 角度	コーンの形状	
	コーンの径	
30°	25.3 7.0	
60°	25.3 15.0	
90°	25.3	
120°	25.3	
180° ($r=32$) φ64	25.3	

注1) コーンの径の単位は(mm)である

図-2 コーンポイント形状一覧

ダユニットおよび油圧ポンプユニットならびにこれらを介する電気ケーブル、油圧ホースから構成されている(図-1)。

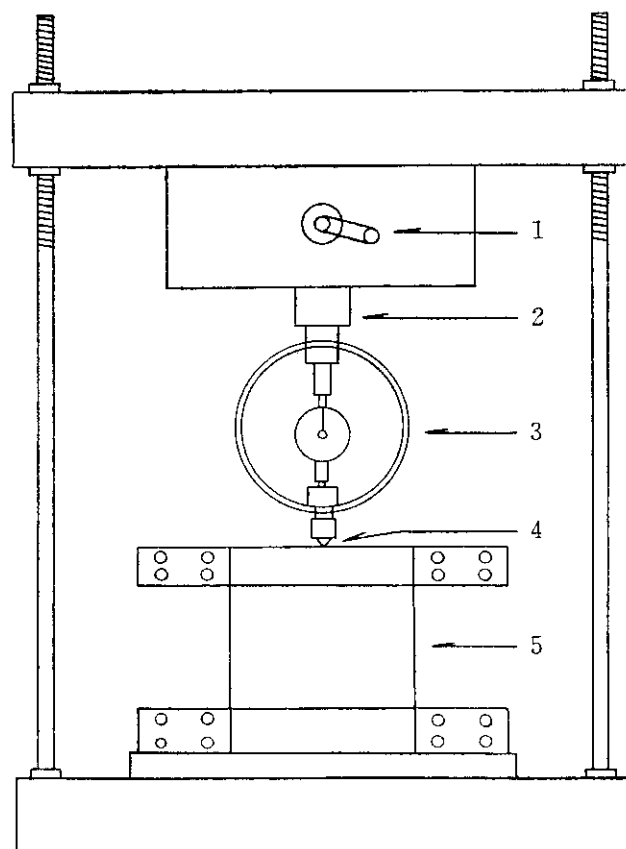
プローブには3組のコーン貫入ポイントが収納されており、地上のポンプユニットからの油圧力でコーンが押し込まれる(写真-1)。

3組のコーンは測定する岩盤の性質により同一形状で、あるいは別々の形状で適宜取替えが可能となっている。

コーンの形状は図-2に示すように、各種のものが用意されており、コーンを送り出す油圧ポンプユニットは径25.3 mm (断面積5 cm²) で、3組のコーンは同一圧力でそれぞれに押し込まれ、そのときのピストンの動きを差動トランス式(LVDT)変位計で測定する。

また、そのときの油圧力をストレインゲージ式圧力計で測定することができ、コーンの貫入量とその貫入油圧力をデジタル表示とアナログ表示(X-Yプロッター)することができる。

孔内コーン貫入装置の特徴は、①ボーリング機械がなくても測定ができるように、プローブに50 mの電気系ケーブル、油圧系ホースを取付けてあるので、プローブを任意の点に設置することにより、連続的に測定が可能である。②コーンのポイント形状は、測定する岩盤の性質により、同一形状あるいは別々の形状で適宜取替えが可能となっている。③コーン貫入量は、差動トランス式(LVDT)変位計とそのときの油圧力はストレインゲージ圧力計を用いるので、高精度な測定が可能である。④記録はデジタル表示(圧力、変位とも)されるとともに、その出力はX-Yレコーダによって直接圧力-貫入量の



1. ジャッキハンドル 2. ジャッキ 3. ブルーピングリング 4. コーン 5. 供試体

図-3 平面コーン貫入試験装置

関係図として得ることができるなどである。

3. 室内予備試験

(1) 平面コーン貫入試験

a. 目的

この試験は、岩盤に対する試験装置の種々のコーンの貫入特性を調べることを目的としている。

b. 試験の方法

試験の方法は、図-3に示す装置を作成し、試料に対する各種コーンの貫入圧力と貫入量との関係を求めた。

試料の大きさは直径、高さとも約20 cmである。

この際に、コーン貫入を実施する試料の表面に升目を区切り、同一コーンの貫入位置の偏りと、貫入位置が重複するのをさけた。また、円筒型試料の側面に鋼製帯を巻き、ボルトで適当にしめ付け、コーン貫入による試料の破壊を防ぎ、表面の貫入条件の均一化をはかった。貫

入試験を完了した後、ただちに試料からコア抜きをし、一軸圧縮強度、P波速度などを測定した。なお、コーンの貫入速度については、装置の関係で力計による貫入力の上昇速度が8.5 kg f/min程度に一定になるようにした。

c. 試料

試料は軟岩程度の強度を想定し、ベントナイトセメントによって一軸圧縮強度が20, 40, 60 kg f/cm²程度になるように作成した。試料の大きさは直径20 cm、高さ20 cmの円筒型であり、試験実施までの養生期間を1ヵ月とした。

コーン貫入試験後の試料の強度など試験結果は表-1のとおりである。

d. 試験結果

各コーンの貫入力と貫入量の関係の試験は、各試料につき4回実施した。この試験の貫入力と貫入量の関係を

表-1 平面コーン貫入試験試料の物性値

試料 No.	見掛け比重		吸水率 (%)	有効間隙率 (%)	V_p (km/sec)	耐圧強度 (kg f/cm ²)
	乾燥状態 (G _d)	飽和状態 (G _w)				
20-1 平均	0.73	1.43	95.31	69.9	2.08	29
40-1 平均	0.82	1.48	79.51	65.3	2.29	53
60-1 平均	0.90	1.54	70.67	63.5	2.42	69

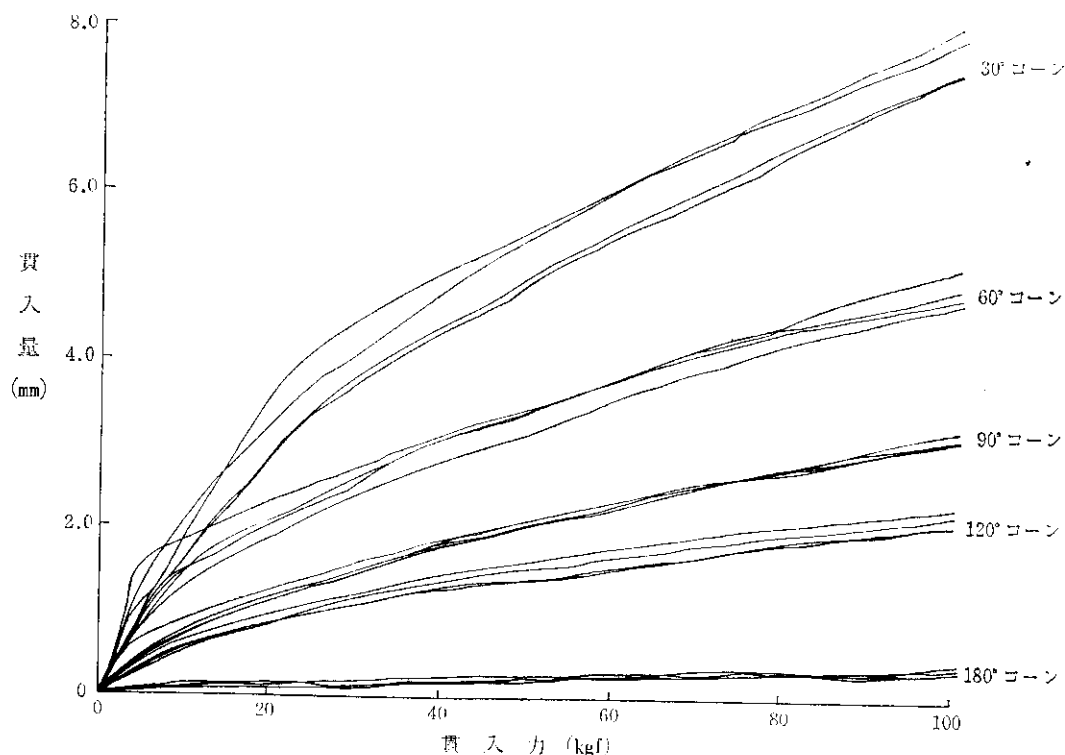


図-4 平面コーン貫入試験の貫入力と貫入量の関係

示す一例を図-4に示す。

この図から、各コーンの貫入圧力と貫入量の関係はそれぞれのコーンごとに曲線がよくまとまっており、スムーズな曲線で表わされることがわかる。これらの曲線から、2つの量、貫入勾配量と貫入量を取りだした。貫入勾配量は次のように定められる。ある貫入力と他の貫入力における貫入量の差を、貫入力差で除した量を貫入勾配とし、貫入量をmm、貫入力をkgfでとると、貫入勾配はmm/kgfで表わされる。しかし、実用的には2つの貫入圧力を特定しておけば貫入圧力差は一定なのでい

ちい貫入量を貫入圧力差で除さなくとも、貫入量を示せば各コーンの貫入勾配の比は変わらないことになる。したがって、データの比較処理のためには、貫入量の差をもって貫入勾配に置換えた方が便利であることから、この報告では、決められた貫入圧力時における貫入量の差をもって貫入勾配量と呼称することとする。

貫入量は、貫入勾配量を決める2つの貫入圧力の中間点におけるコーンの試料への貫入長さをmm単位で表わしたもので、円錐コーンの場合、同一コーンでは貫入量の2乗がコーンの貫入断面積に比例した量となる。

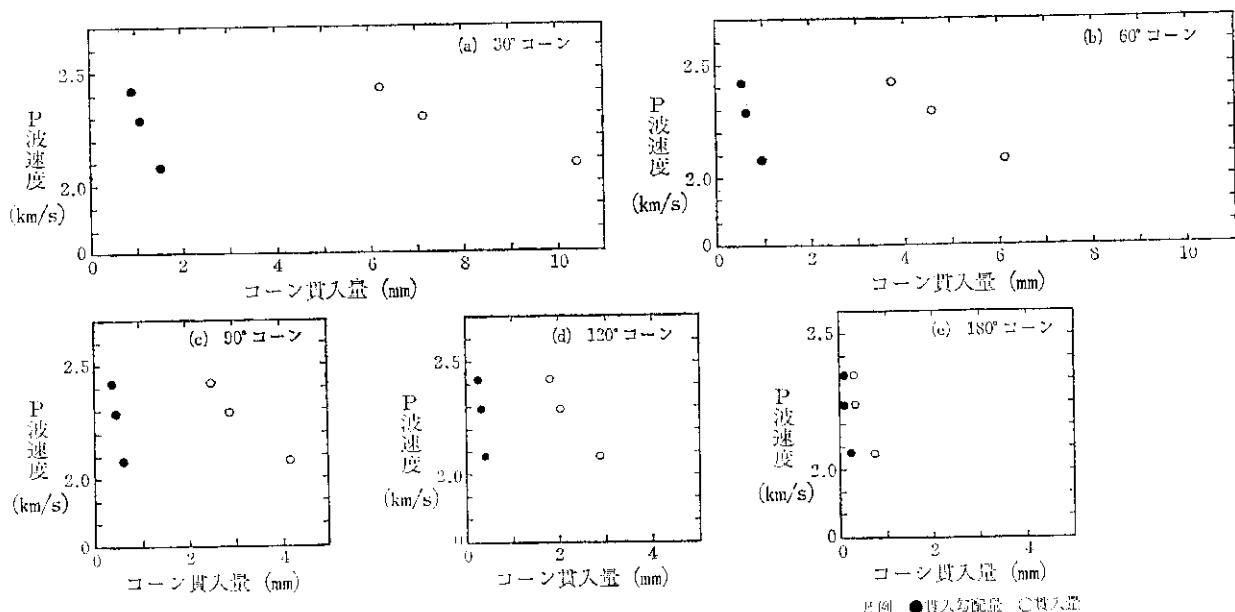


図-5 一軸圧縮強度と各コーンの貫入勾配量および貫入量の関係

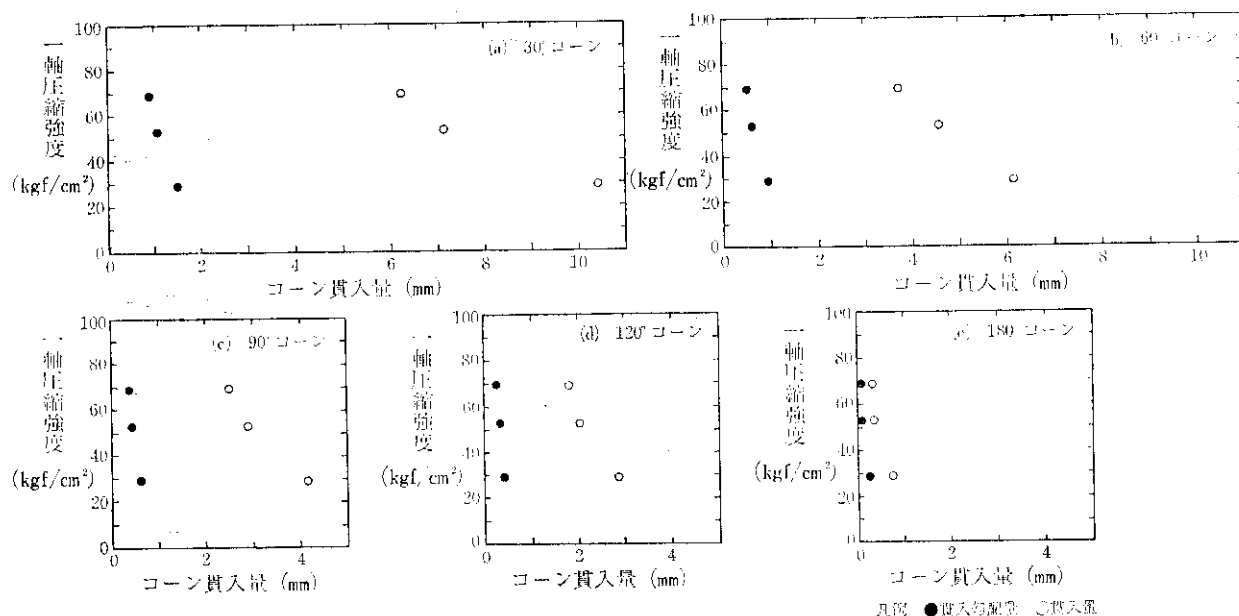


図-6 P波速度と各コーンの貫入勾配量および貫入量の関係

この平面コーン貫入試験では、貫入勾配量決定時の貫入力を 76.6 kg f, 100 kg f とし、したがって、貫入量決定時の貫入力を前二者の中間の 89.3 kg f とした。

図-5 a～e は前記の方法で得られた試験結果で、縦軸には試料の一軸圧縮強度、横軸には貫入勾配量と貫入圧力をとっている。

これらの図から、次のようなことが読みとれる。

各コーンの試験値について貫入勾配量、貫入量ともに、一軸圧縮強度の増加に対し減少する傾向がみられ、特に 60°, 90°, 120° のコーンの試験値では、この関係が直線で近似できる。

図-6 a～e は、試料の P 波速度と貫入勾配量と貫入量についての関係図である。これらの図からも一軸圧縮強度と同様に、P 波速度と貫入勾配量、貫入量との間に良好な関係がみられる。

(2) 孔内コーン貫入試験

a. 目的

平面コーン貫入試験では、一軸圧縮強度および P 波速度と貫入勾配量、貫入量との間に比較的良好な関係がみられたことから、この試験では、ボーリング孔と同様な孔内の条件で、これらの関係をみようとするものである。

b. 試験の方法

この試験では、孔内コーン貫入試験装置の測定プローブを、66 mm ビットでコア抜きした試料にさし込んで測定した。試料の大きさは、平面コーン貫入試験と同じ直径 20 cm, 高さ 20 cm の円筒型で、孔内からのコーンの貫入によって試料が割れるのを防ぐために、試料周辺に鋼製帯を巻きつけ、ボルトで締付けた。孔内コーン貫入試験で使用したのは 60°, 90°, 120°, 180° コーンで、試料の孔内でコーンの貫入跡が重ならないように注意し測定した。

c. 試料

試料は平面コーンと同様に、強度を調整したベントナイトセメントで養生期間は約 1 カ月である。

孔内コーン貫入試験孔を削孔する際に得られたコアの物性値は、表-2 のとおりである。

d. 試験の結果

孔内コーン貫入試験によって得られる、コーン貫入圧力とコーン貫入量の関係のカーブの一例を図-7 に示す。この図にみられるように、カーブは全体的には二次曲線であり、理論的にも二次曲線となるはずであるが、高い貫入圧力では直線で近似できる。この試験では、貫入勾配量をコーン貫入圧力 30 kg f/cm² と 50 kg f/cm² におけるコーンの貫入量の差 (mm 単位) とし、コーン圧力 40 kg f/cm² における試料に貫入されたコーンの長さ

表-2 孔内コーン貫入試験試料の物性値

試料 No.	超音波縦波伝播速度 V_p (km/sec)	耐圧強度 (kg f/cm ²)
20-6	2.08	35
20-7	2.07	33
40-3	2.23	51
40-4	2.16	44
60-5	2.32	47
60-8	2.43	83

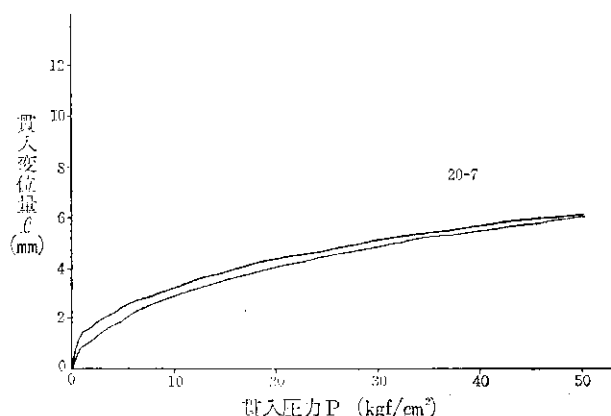


図-7 孔内コーン貫入試験の貫入圧力と貫入変位量の関係の一例

を貫入量 (mm 単位) とした。

一軸圧縮強度と貫入勾配量、貫入量の関係を図-8 a～d, 図-9 a～d に示す。一軸圧縮強度と貫入勾配量の関係についてみるといずれのコーンについても貫入勾配量は一軸圧縮強度が増加すると減少する傾向がみられ、その傾斜はコーンの角度が大きくなると増大する。また、直線で近似させた相関係数は 0.7 程度である。

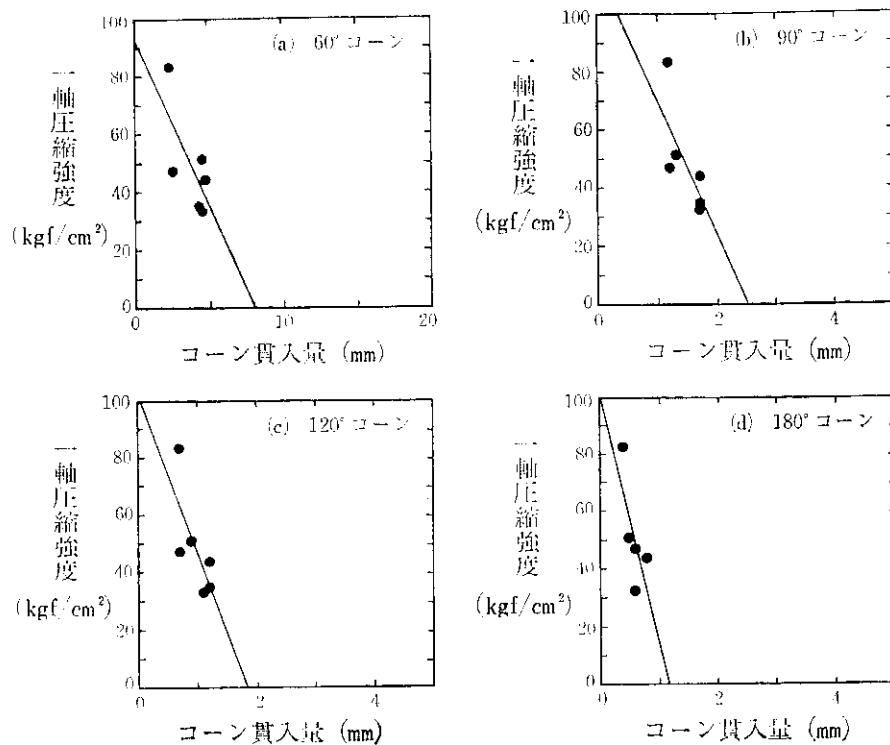
貫入量と一軸圧縮強度の関係をみると、60°, 180° コーンでは不規則だが、90°, 120° コーンでは貫入勾配量と同様な傾向がみられ、直線で近似させた相関係数はそれぞれ 0.7, 0.85 程度である。

P 波速度と貫入勾配量、貫入量の関係を図-10 a～d, 図-11 a～d に示す。

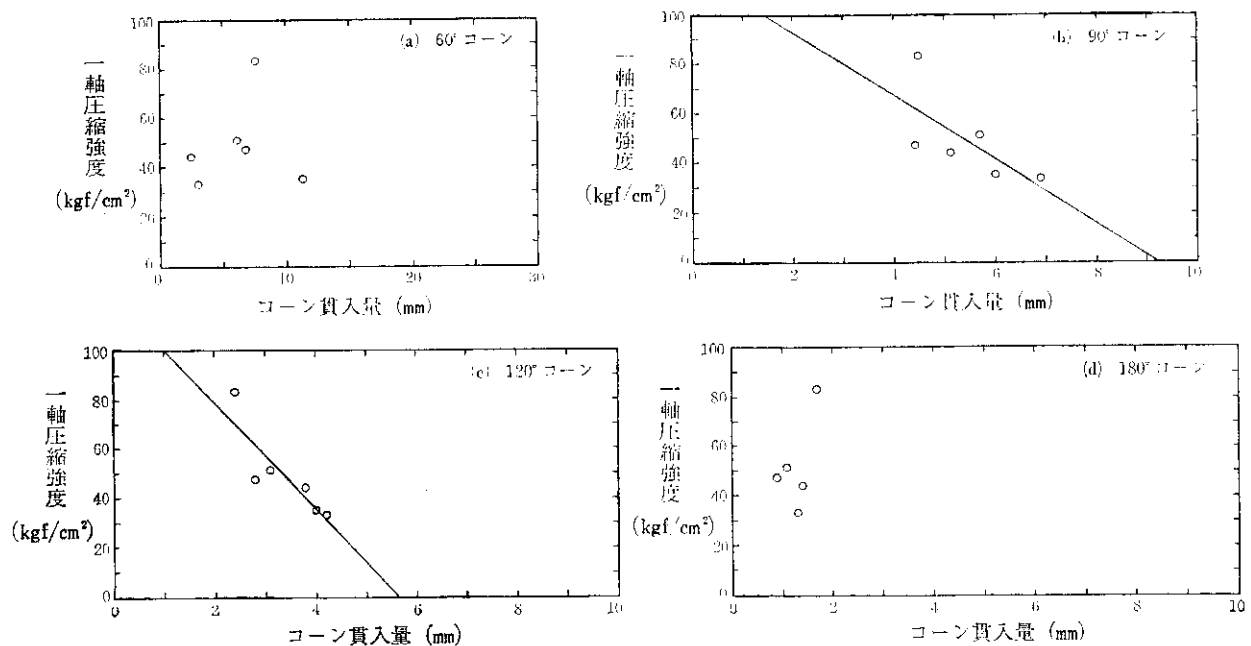
P 波速度と貫入勾配量、貫入量の関係をみると、いずれも一軸圧縮強度と同様な傾向がみられ、一軸圧縮強度よりも良好な関係がみられる。これらを直線で近似させた相関係数でみると、90° コーンでは貫入勾配量、貫入量ともに 0.85 程度、120° コーンでは貫入勾配量で 0.91, 貫入量で 0.98 となっている。

e. 試験結果の検討

これまで孔内コーン貫入試験結果についてみてきた



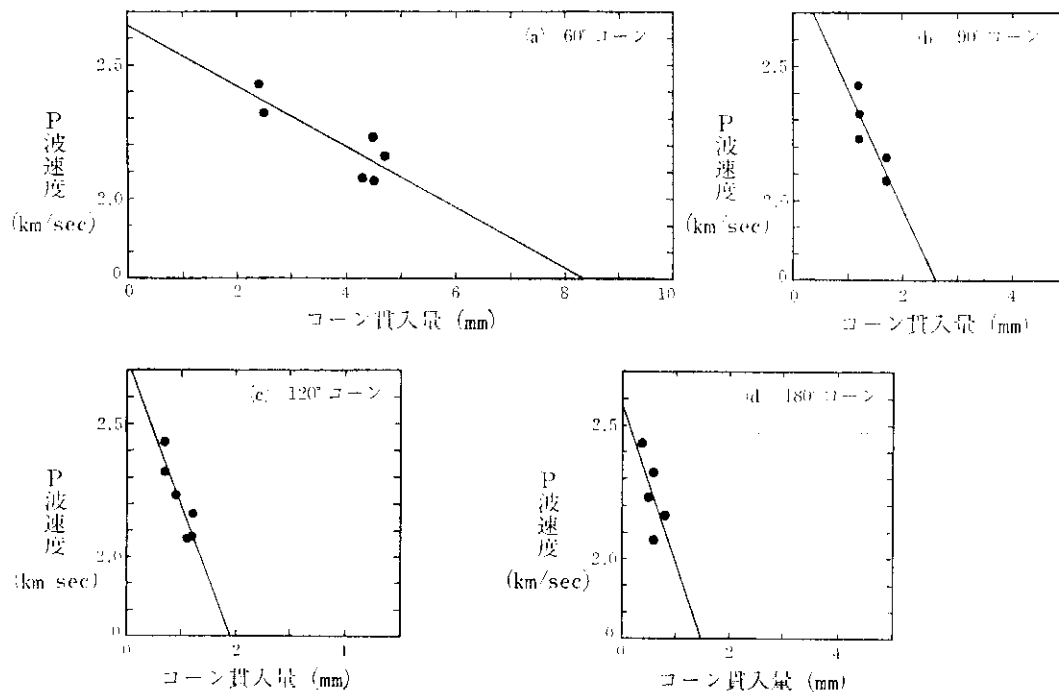
図—8 一軸圧縮強度と貫入勾配量の関係



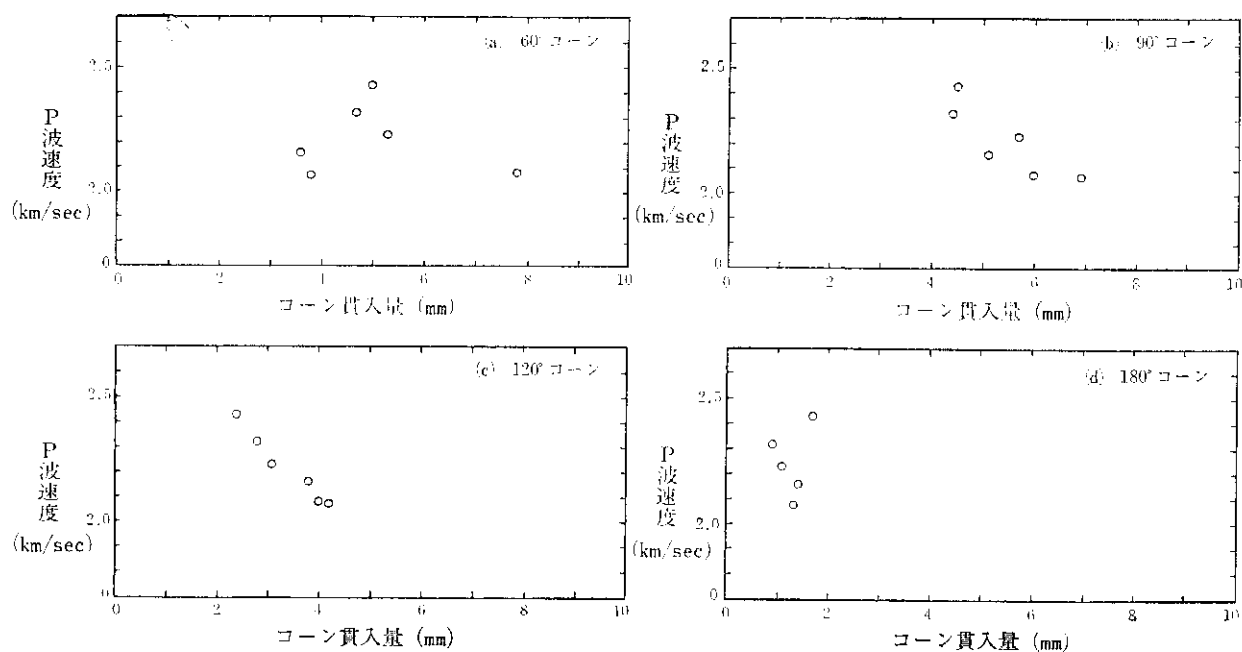
図—9 一軸圧縮強度と貫入量との関係

が、試験結果は試料の一軸圧縮強度、P波速度を定性的に把握することができ、さらに、コーンを適切に選択することによって、定量的な推定が可能なことを示している。コーンの選択については、今回使用した試料程度の物性値の岩盤については、90°、120°コーンが適当であるように見えるが、これについては他の試料や実際の岩盤ので試験をつうじ、さらに検討を重ねる必要があろう。

貫入勾配と貫入量についてみると、貫入勾配量はどのコーンについても、一軸圧縮強度、P波速度とともに、ある程度の相関がみられるが、貫入量に比較して勾配が小さい。一方、貫入量についてみると、一軸圧縮強度、P波速度との関係で、相関がよいものと悪いものに別れているが、コーンの種類によっては、貫入勾配量に比べ相関係数が極端によくなっているものがある。



図—10 P波速度と貫入勾配量の関係



図—11 P波速度と貫入量の関係

このような貫入勾配量と貫入量について、次のような理由を考慮すると当然にみえる。すなわち、貫入勾配量は、本来コーンの試料への貫入断面によって変化する量であるが、ここではそれが考慮されておらず、貫入量はある貫入圧力におけるコーンの試料への貫入断面を示す量であるので、適切なコーンの選択によって試料の物性との相関がよくなるのであろう。

それでは、試料の物性とコーンの貫入について、貫入

勾配量や貫入量と比較してよりよい量はないであろうか。これについては、現在さらに検討中であるが、一例として、貫入勾配量と量入量の平均量があげられ、これを図-12 a, b, 図-13 a, bに示した。これらを見ると、一軸圧縮強度、P波速度の関係について、貫入勾配量、貫入量よりも、より安定した良好な関係がみられる。

このような平均値自体は理論的ではないが、帰納的に試験値を取扱う場合、有意な量といえそうである。

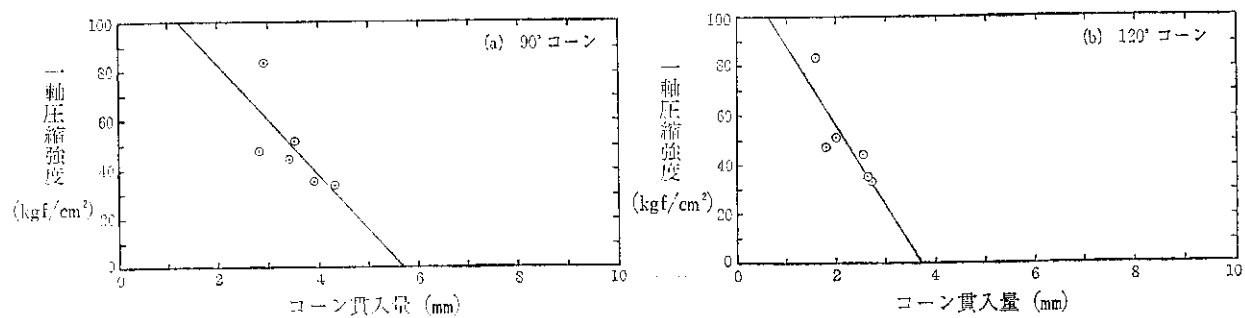


図-12 一軸圧縮強度に対する貫入勾配量と貫入量の平均値の関係

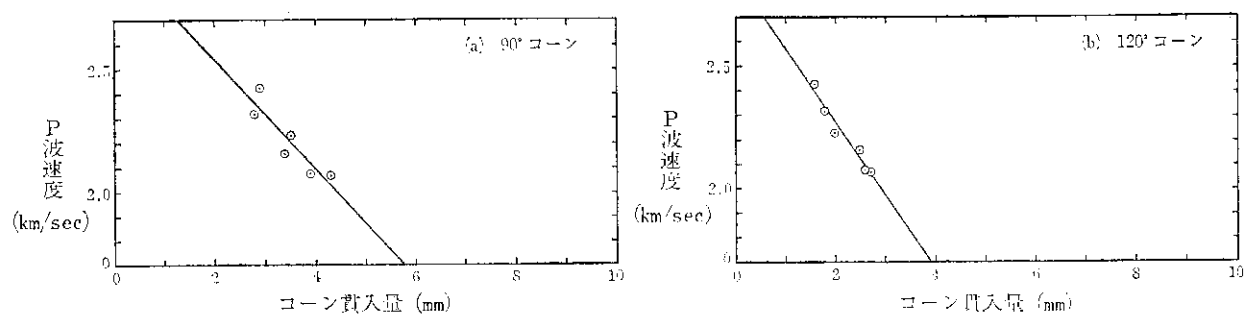


図-13 P波速度に対する貫入勾配量と貫入量の平均値の関係

*

*

*