

軟岩における孔内コーン貫入試験 (その2)

—現位置試験—

Cone Penetration Tests on Soft Rocks in Boreholes (Part 2)

—In-situ Tests—

野地正保* 本館静吾** 石塚達也***

Masayasu NOCHI, Seigo MOTODATE and Tatsuya ISHIZUKA

孔内コーン貫入試験に関する室内試験に引き続き、2つの地点で現位置試験を行った。試験地は、いずれも一軸圧縮強度で数 kgf/cm^2 から 100 数 10 kgf/cm^2 程度の新第三系の堆積岩を基盤とする建設現場である。

孔内コーン貫入試験の結果は、貫入勾配量、貫入量およびこれら2つの平均値という3つの量で整理した。

これらの貫入試験値は、ボーリングコアの硬軟やされつなどの状況をよく反映し、音波検層のインテンシティ・ログともよく対応した。また、ボーリングコアの岩石試験によって得られる一軸圧縮強度やP波速度と貫入試験値を比較検討すると、貫入試験値は直線で近似される良好な相関関係を有し、孔内コーン貫入試験値によって一軸圧縮強度、P波速度がある程度定量的に推定できることを明らかにした。

《孔内試験；コーン貫入試験；軟岩》

Cone penetration tests in boreholes were conducted at two construction sites. The foundations at both locations consist of Neogene sedimentary rocks, with an unconfined compression strength between a few kgf/cm^2 and about 120 kgf/cm^2 . Data of the cone penetration tests are compiled according to the following concepts: penetration ratio (pr), depth of penetration of the cone (pl), and the mean of these two values (pm). These three values reflect the conditions of the core, and correspond to the results of sonic intensity logs. From investigations and comparisons between the results of the cone penetration tests and laboratory tests of rock cores, it is postulated that the unconfined compression strength and P-wave velocity of cores can be quantitatively estimated from the cone penetration tests.

Keywords: borehole tests, cone penetration tests, soft rocks.

1. ま え が き

前報では、新しく開発、試作した孔内コーン貫入試験装置について、その概要とベントナイトセメントによる

人工岩石を使用して実施した室内試験を報告した。この室内試験の結果からは、岩石に応じた適当なコーンを選択することによって、岩石の一軸圧縮強度や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。

*地質研究室長 **同室主任研究員 ***同室員

この報告では、新第三系の堆積軟岩を基盤とする2カ所の現位置で実施した孔内コーン貫入試験の結果について報告する。

孔内コーン貫入試験は原理が簡単であり、試験時間が短かく、岩盤の状況を連続的に把握することができ、さらにボーリングコアの一軸圧縮強度、P波速度とその試験値が良好な相関を示すことから、軟岩における有望な試験法の1つとして発展する可能性があるものと考えられる。

2. 現位置試験

コーン貫入試験装置の概要と特徴については前報で述べたが、ここでは、現位置試験にあたっての試験の作業性などについて追加する。

コーン貫入試験装置は、4つの収納ケースに分けられ運搬される。装置全体の重量は約150kgであり、最大のケースは巻取りドラムを収納するケースで、重量は約70kg、大きさは73cm×44cm×84cmである。

プローブは電気ケーブル、油圧ホースおよびこれらの強度を補強するためのロープで吊して孔中の任意の測定位置に設定されるため、ボーリングロットなどを使用したものに比べ設定時間は短かく、数分の実測定時間を含め、1回の測定は15分程度で終了する。また、連続して測定する場合は、1時間に数回(3点1回)の測定が可能である。今回の試験では、ボーリング深度の50cmごとに1回の測定をコアチューブ引上げごと、または数m間をまとめて実施した。ボーリング工のほかに試験者がつければ、ボーリングのコアだし作業時間を利用して試験を

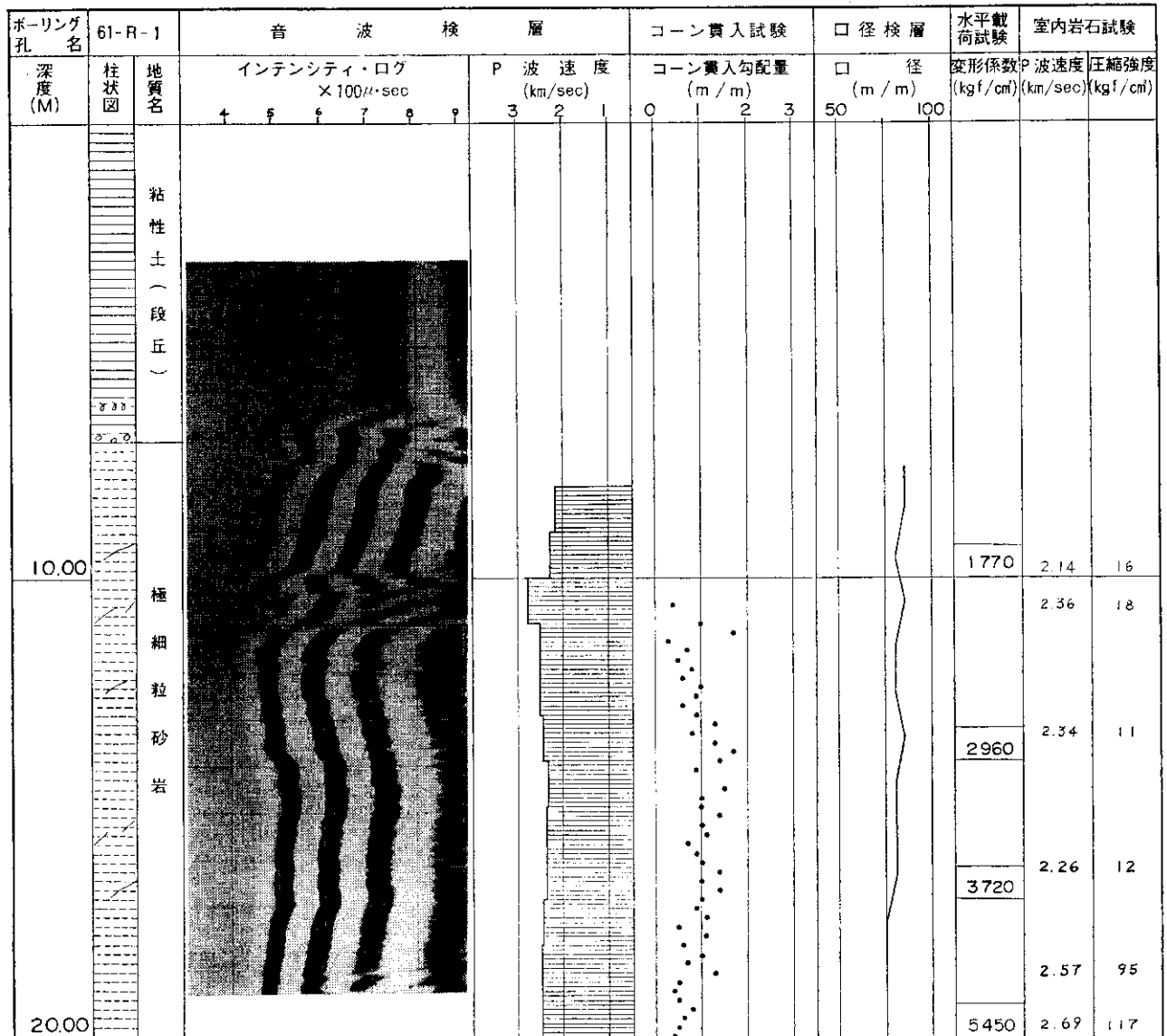


図-1 A地点61-R-1孔総合柱状図(斜面部)

実施することができ、孔内載荷試験などに比べボーリングの作業工程を大きく阻害することなく、試験が実施できる。

今回の現位置測定試験では、音波検層をはじめとする各種検層、孔内載荷試験、ボーリングコアによる岩石試験などを実施し、コーン貫入試験結果との対応をみた。

なお、今回の現位置試験では、90°コーンを使用した試験値のみについて検討した。また、貫入勾配量はコーン貫入圧力が50 kg/cm²と30 kg/cm²におけるコーン貫入長さの差とし、貫入量は貫入圧力40 kg/cm²時の値とした。

3. A地点における試験

(1) 地質概要

A地点の基盤は中新世の盤の沢層からなる。本層は海成の正規堆積物で、塊状無層理のシルトないし細粒砂岩よりなる。岩石は1回の乾燥、浸水で完全に細粒化する著しくスレーキングしやすい性質を有し、一軸圧縮強度は20~120 kgf/cm²、P波速度は2.2~2.8 km/secの範囲に分布する。

試験地点の付近には、幅10数mの破碎帯があり、これから派生する小断層、構造的な節理が数10cm~数mの間隔で分布する。

(2) 音波検層結果と貫入試験値

A地点では孔内コーン貫入試験を、河床部の破碎帯、破碎帯の影響の少ない健岩部、両者の中間部、斜面部の

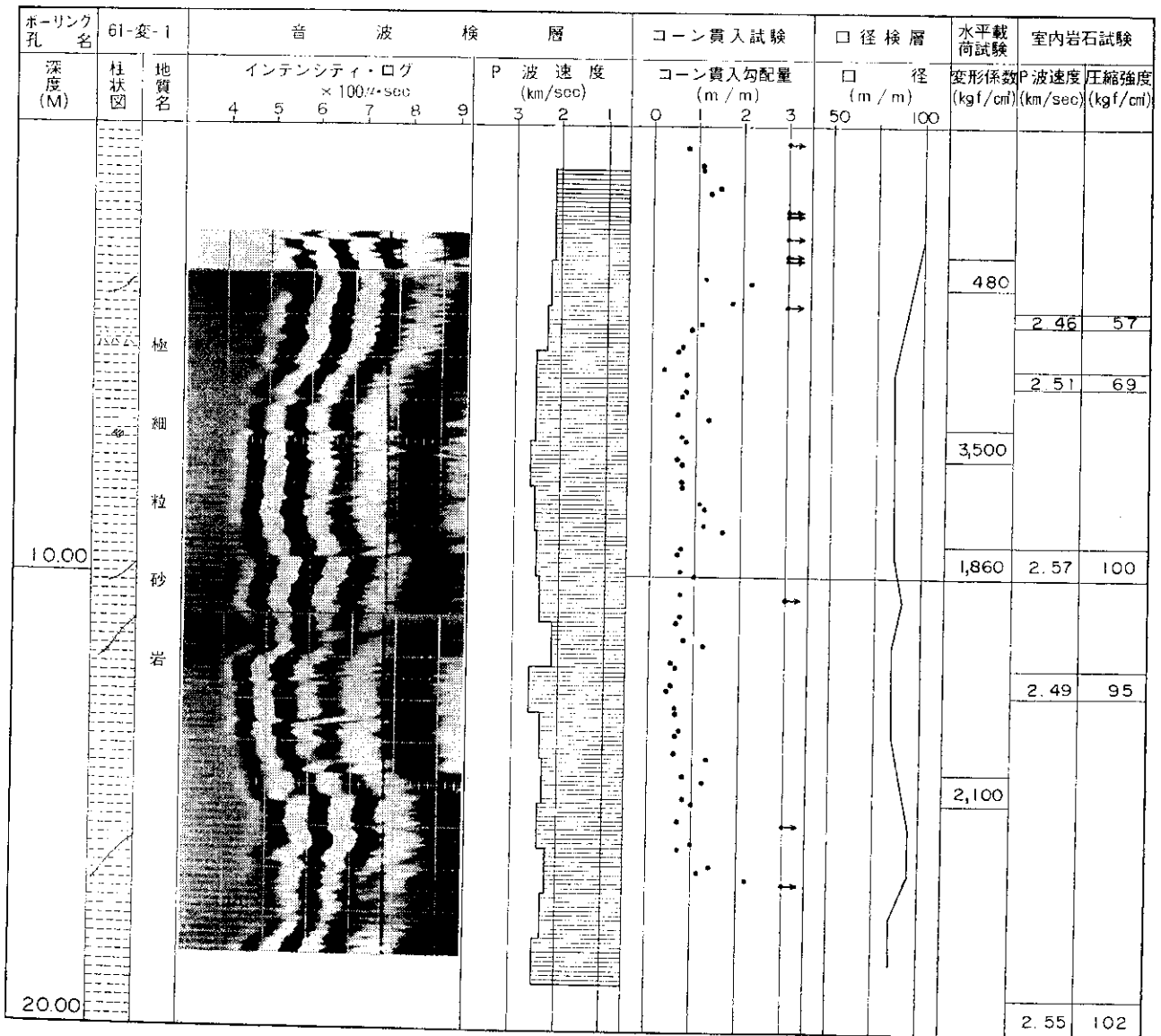


図-2 A地点61-変-1孔総合柱状図(健岩部)

被覆層の下の風化部から新鮮部にかけてと数多くの孔で実施した。これらのうち、破碎帯で実施したものについては、孔壁の保持が困難であり、孔径が拡大したため、比較的孔壁の状況がよい部分での記録しか得ることができなかった。

図-1~3は、それぞれ順に斜面部、河床の健岩部、破碎帯の近くで実施した試験孔の総合柱状図である。

これらの総合柱状図のうち、コーン貫入試験の貫入勾配量（以下 pr と記す）と音波検層のインテンシティ・ログ¹⁾を比較すると、ボーリングコアに対する両者の対応が良好であることがわかる。これを図-1を例に説明する。

ボーリングコアでは、7 m までが最下部に細砂を含む粘性土よりなる段丘堆積物で、7 m 以下が細粒砂岩ない

しシルト岩よりなる基盤である。7 m から 10.5 m までが風化ゆるみ層、10.5~11 m が緻密な石灰質岩であるが、きれつが発達した稜状ないし短柱状コアであり、11 m 以下がところどころに高角度のきれつが発達した帯緑暗灰色の新鮮岩である。これをインテンシティ・ログで見ると、10~11 m で速度は速いがきれつのある部分があり、これより上部では上方に向かって速度が減少し、下部では速度が徐々に減少し、14~15 m 付近からまた徐々に増加しており、明暗のしま模様の乱れがきれつの存在を示唆している。一方、pr についてみると、インテンシティ・ログのしま模様ときわめて類似した曲線となっている。すなわち、11 m 以深における pr は 14~16 m 間で 1 mm 以上に分布し、この上下に向かって徐々に小さくなっている。

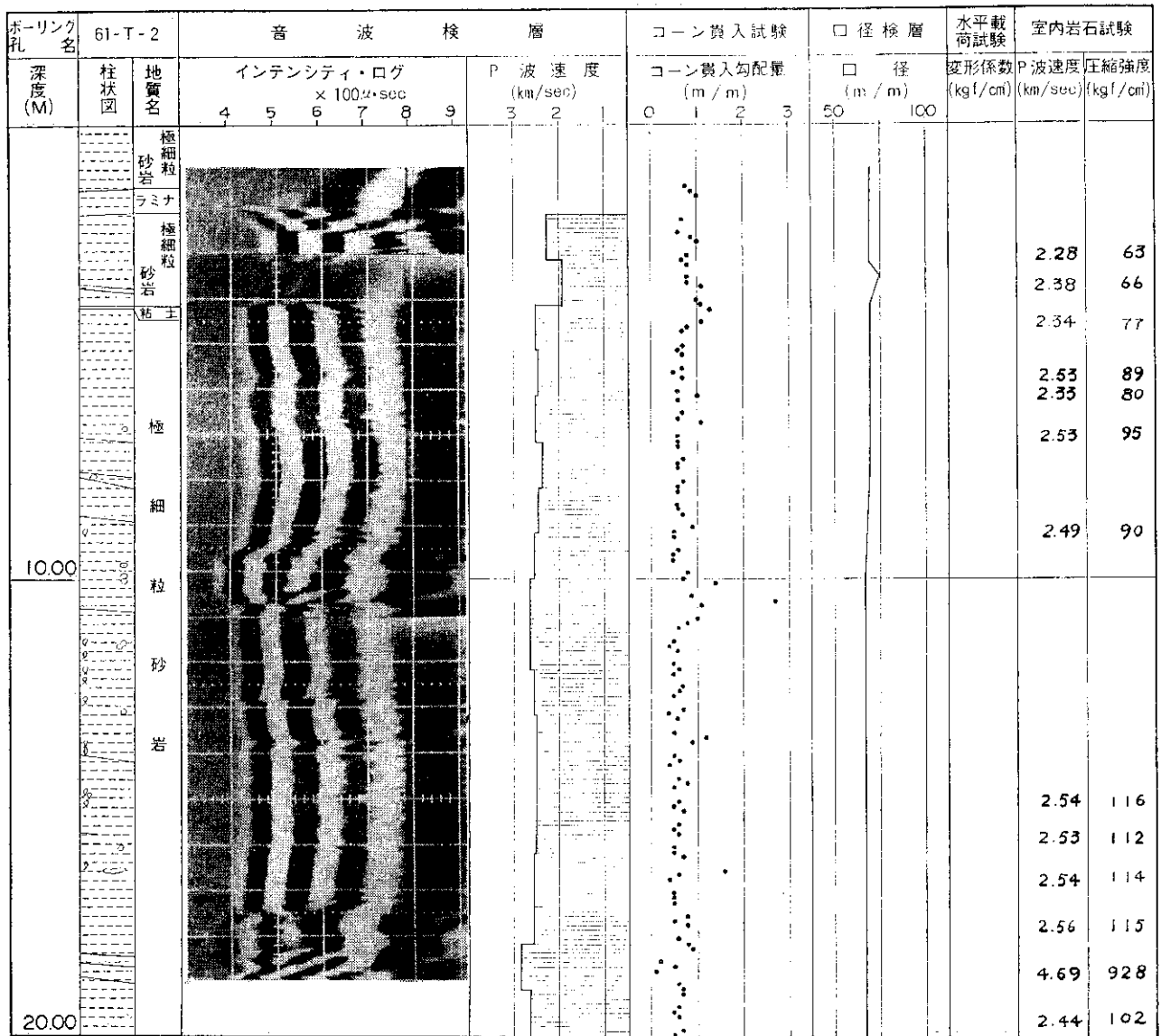


図-3 A 地点 61-T-2 孔総合柱状図 (破碎帯近傍)

以上、図-1に見てきたボーリングコアとインテンシ
ティ・ログ、prの対応の良好さは、図-2、3についても同様
である。図-3のボーリング孔では、20 cm 間隔でコーン
貫入試験を実施しているが、コアの安定した良好な状況
が貫入勾配量の安定した分布に反映しており、貫入勾配
量がとびはなれて大きい値を示す点は、コーンが岩盤の
きれつ部か、その影響範囲に入りこんだものと考えら
れる。

(3) 岩石試験値とコーン貫入試験値

ボーリングコアによる岩石試験値の一軸圧縮強度、P
波速度とコーン貫入試験値との関係を図-4~9に示す。
一般に岩石試験の試験値としては、数個のデータの平均
値が採用されるが、貫入試験値と岩石試験値を直接対応

させる必要があるので、コーン貫入位置に対応するボー
リングコア1個のデータをそのまま採用した。

図-4~6はそれぞれ一軸圧縮強度に対する貫入勾配
量^{*2}(pr)、prと貫入量の平均値(以下pmと記す)、貫入
量^{*3}(以下plと記す)の関係を示したものである。これ
らの図では、一軸圧縮強度に対するコーン貫入試験値の
各量 pr、pm、plの順に良好な関係にある。一般に一軸
圧縮強度や、P波速度に対する貫入試験値の関係は二次
曲線となるが、この試験で取扱った数値の範囲では直線
とみることができ、これらを直線で近似させた相関係数
は、いずれも0.9以上の値を示す。これらの中で一番相
関のよい貫入勾配量から、コアの一軸圧縮強度を10~
20 kgf/cm²程度の誤差の範囲で推定することが可能で

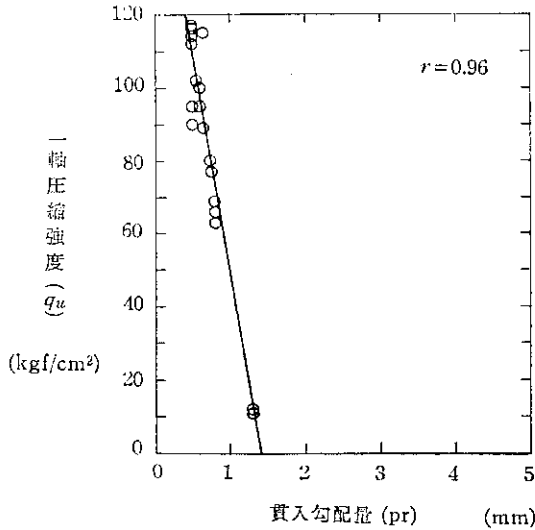


図-4 A地点における pr と q_u の関係

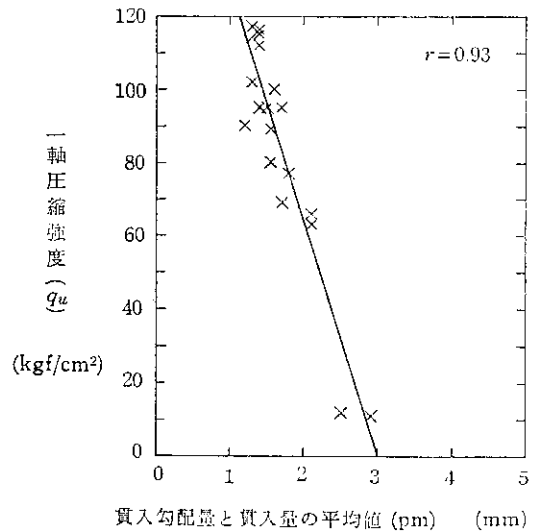


図-5 A地点における pm と q_u の関係

*1 インテンシティ・ログ (Intensity Log)

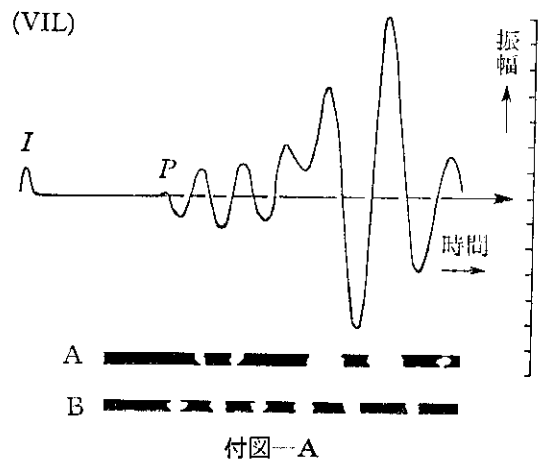
音波検層は弾性波速度検層の一種で、超音波振動子を利用し、孔中
発信、孔中受信の形式により孔壁の伝播時間を測定する検層方法であ
る。プローブ中の発信子と受信子は、1 mの間隔において孔軸上に配
置され、1 mの間隔の孔壁を伝わる超音波をとらえる。付図 Aは、
代表的な受信信号波形で、図中 I は発信時を示す同期パルスで伝播時
間を計測する基準になる。横軸は時間の経過を示し、縦軸は信号の振
幅を表わす。信号波形には、P波、S波、L波などが含まれるが、一般
に音波検層ではP波の初動PとIの時間差を計測する。インテンシ
ティ・ログはこの波を振幅に応じた濃淡で表示し、プローブを孔中で
連続的に移動させ、深度に対し連続的に表示したものである。これに
よって、孔内の岩盤の状態：岩盤の傾軟、クラック、断層破砕帯など
を判断することができる。

*2 貫入勾配量

ある定められた2つの貫入圧力において、コーンが岩盤へ貫入した長さの差を貫入勾配量とする。この報告では、2つの貫入圧力、
50 kg/cm²、30 kg/cm²におけるコーンの貫入長さの差を mm 単位で表わしている。

*3 貫入量

貫入勾配量を定める2つの貫入圧力の間接点において、コーンが岩盤へ貫入した長さを mm 単位で表わしたものである。



付図-A

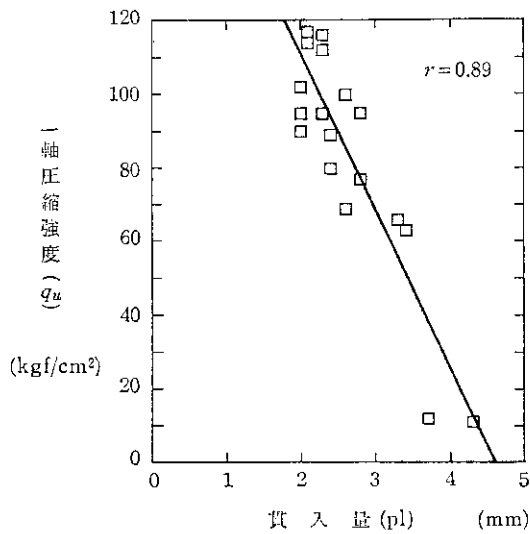


図-6 A地点における pl と q_u の関係

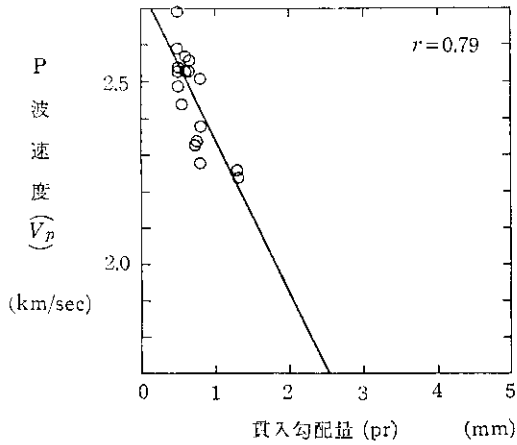


図-7 A地点における pr と V_p の関係

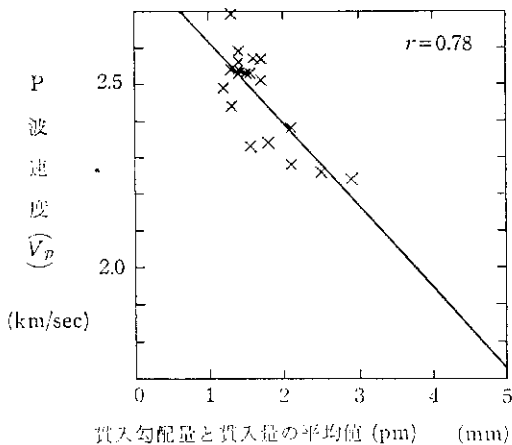


図-8 A地点における pm と V_p との関係

ある。

図-7~9は、一軸圧縮試験と同じ試料についてのP波速度と pr 、 pm 、 pl との関係を示したものである。これ

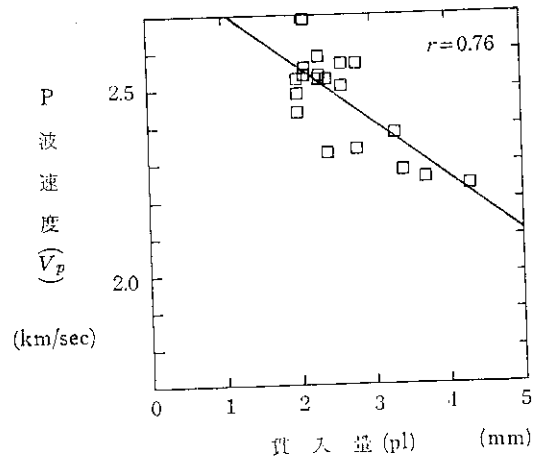


図-9 A地点における pl と V_p の関係

らの図からも一軸圧縮強度の場合と同様に、P波速度に対するコーン貫入試験値は、直線関係で近似できる。ここでも相関は pr がよく、 pm 、 pl の順となり、相関係数は0.8~0.7程度となっている。

4. B地点における試験

(1) 地質概要

Bダムサイトの基盤は、鮮新世前期深川層群の幌加尾白利加層の下部層からなる。本層は細粒砂岩を主体とし、粗粒砂岩、中粒砂岩、海緑石砂岩、凝灰岩よりなる塊状、層理面の不明瞭な地層である。各岩石の一軸圧縮強度は、数 kgf/cm^2 から 80 kgf/cm^2 の範囲に分布し、大部分は $20 \sim 60 \text{ kgf/cm}^2$ 程度で、P波速度は $1.8 \sim 2.2 \text{ km/sec}$ の範囲に分布する。

地質構造は、凝灰岩層、海緑石砂岩層および細粒砂岩中の葉理構造から判断すると、左岸から右岸にかけて単斜構造を示し、左岸から河床中央付近までは地層が直立し、河床中央付近より右岸にかけて漸移的に傾斜が緩くなる。大きな断層、砕破帯は見られない。

(2) 音波検層結果と貫入試験値

B地点では、数本のボーリング孔で孔内コーン貫入試験を実施した。しかし、ここでは岩石が軟弱なため削孔しつつ測定したものについては連続した良好なデータが得られたが、ボーリング掘削完了後に測定したものについては、孔径が 80 mm 以下に拡大した部分が多く、とびとびのデータしか得られなかった。

図-10, 11は、B地点で実施したボーリングの総合柱状図である。ここでもA地点のように、コアの状況とインテンシティ・ログおよびコーン貫入試験の pr に良好な対応関係がみられる。ここでは、図-10の6I-B-9孔について、インテンシティ・ログと pr の対応に注目して、その関係をみてみる。

ボーリング 孔名	61-B-9		音 波 検 層							コーン貫入試験			口 径 検 層		水平載 荷試験		室内岩石試験			
	深度 (M)	柱状 図	インテンシティ・ログ × 100 μ sec 1 2 3 4 5 6 7 8 9							P 波 速 度 (km/sec) 3 2 1 0				コーン貫入勾配量 (m/m) 0 2 3			口 径 (m/m) 50 100		変形係数 (kgf/cm ²)	P波速度 (km/sec)
1000	砂質シルト																			
2000	細粒砂 中粒砂 粗粒砂 微細砂																4031	1.86 1.91		
3000	微細粒砂																5918	2.14 1.92 1.89	80 52 50	
4000	砂岩																1116	2.11	71	
5000	細粒砂岩																	2.16 2.09	86 63	
																	5965	1.98 2.09 2.11	60 63	

図-10 B地点 61-B-9 孔総合柱状図

この孔のインテンシティ・ログは、明暗のしま模様が平行しており、この孔におけるP波速度は安定しており、深度によるP波速度に大きな差がないことを示している。

しかし、これを詳細にみると、深度15m付近、19~23m、45m付近に明暗のしま模様の右方へのずれ、すなわち、相対的にP波速度の遅い部分がある。一方、prをみると全般的にはprが0.7~1mmに分布しているの

に、インテンシティ・ログにみられる前記の低速部では、prが1mm以上となっている。

また、インテンシティ・ログのしま模様の左方への突出部、相対的なP波速度の早い部分である深度25m、31m付近についてprをみると、いずれも他より小さい値となっている。深度26m付近にある貫入勾配量の極端に小さい点は、ボーリング、コアの石灰質団球に一致している。

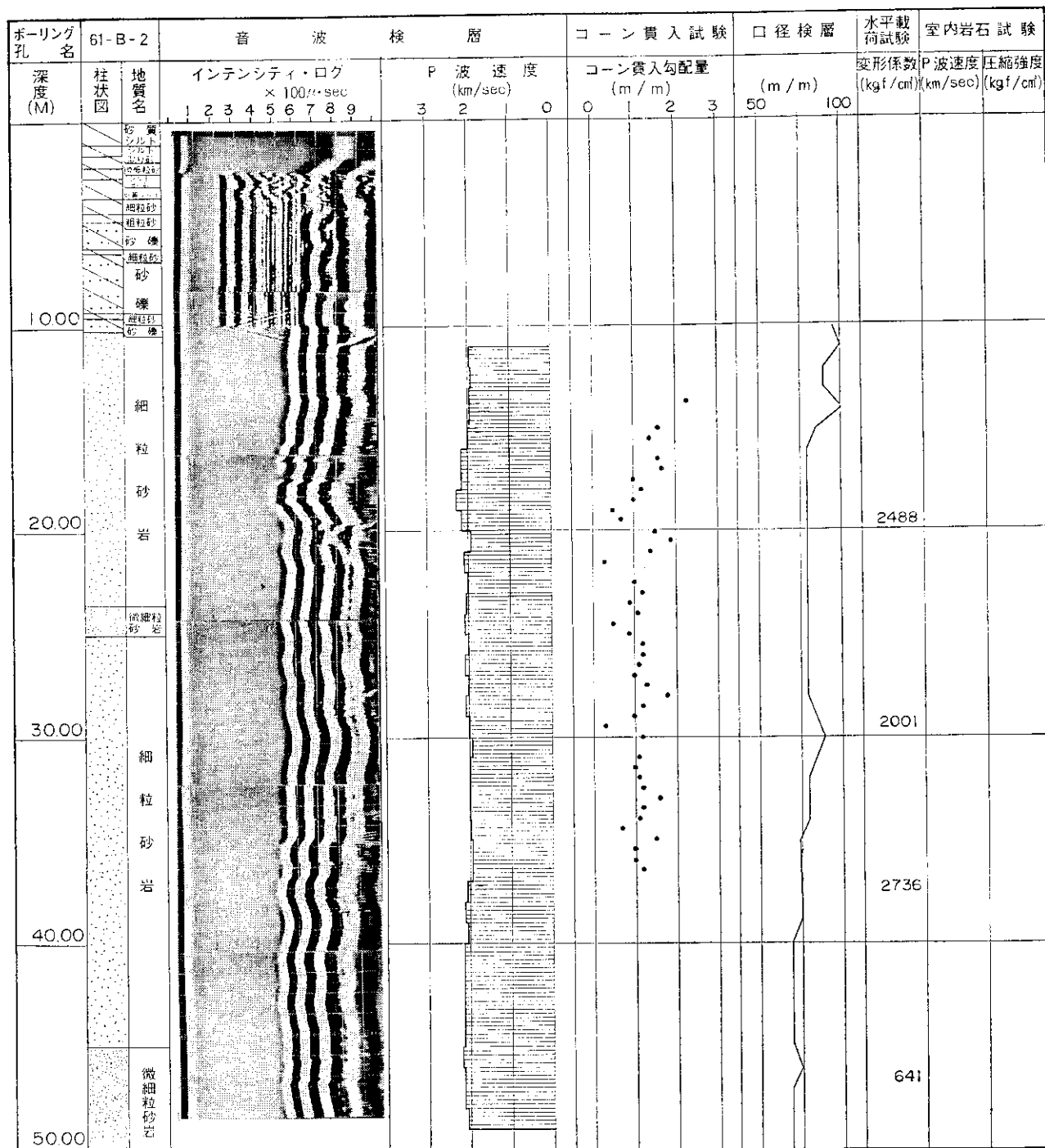


図-11 B地点 61-B-2 孔総合柱状図

なお、深度 13 m 以浅でインテンシティ・ログのしま模様が細かく極端に左方にずれているのは、この深度までケーシングが入り、ケーシングの鉄の速度値を示しているためである。

(3) 岩石試験結果と貫入試験値

A 地点と同様な方法で、ボーリングコアによる岩石試験値の一軸圧縮強度、P 波速度とコーン貫入試験値との関係を求めた。

図-12~14 は、一軸圧縮強度に対する pr 、 pm 、 pl の関係を示したものである。これらの間には、いずれも直線で近似できる相関がみられ、相関係数はそれぞれ 0.64、0.75、0.87 となり、A 地点の場合と对象的に、 pr 、 pm よりも pl に対する一軸圧縮強度がよい相関を示している。しかし、コーン貫入試験値のみで一軸圧縮強度を推定するにはなお問題を残している。なお、この地点の岩石は、岩石試験にあたって細心の注意をはらっているが、

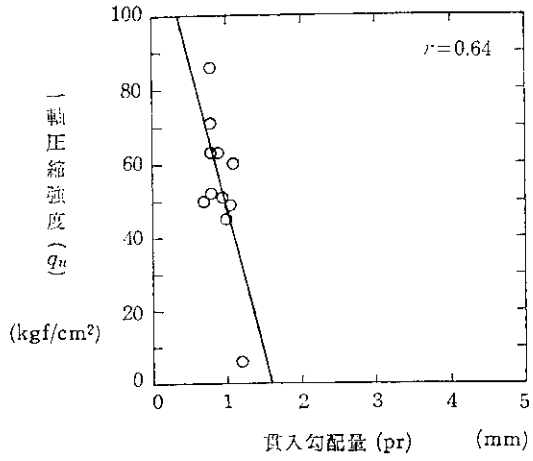


図-12 B地点における pr と q_u の関係

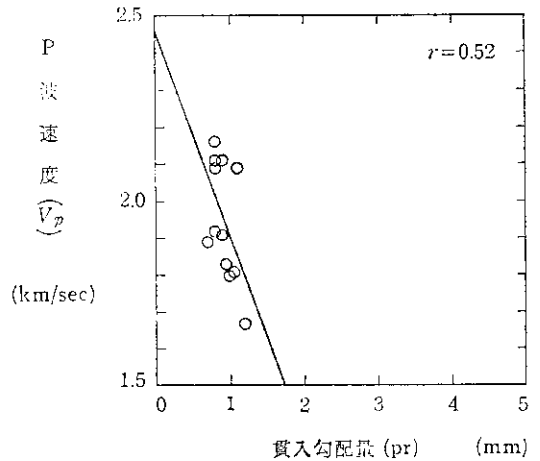


図-15 B地点における pr と V_p の関係

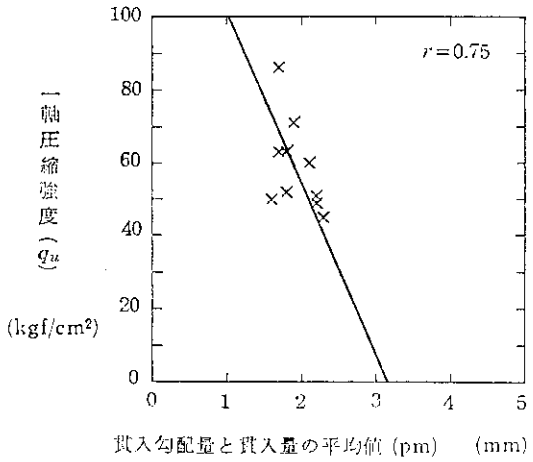


図-13 B地点における pm と q_u の関係

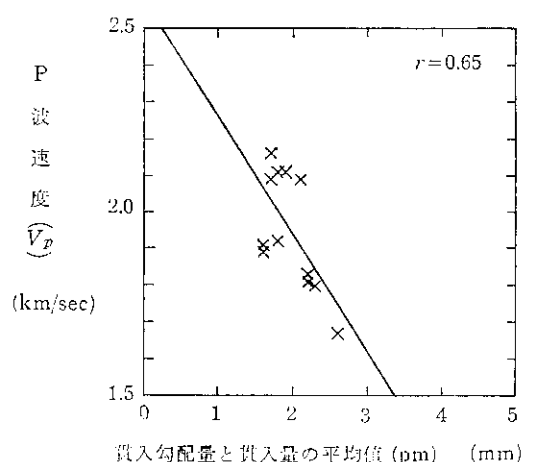


図-16 B地点における pm と V_p の関係

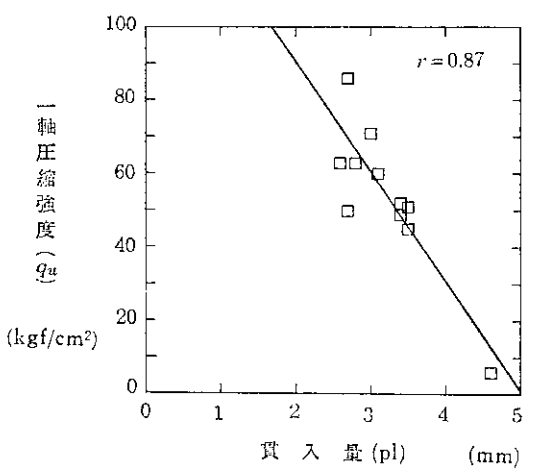


図-14 B地点における pl と q_u の関係

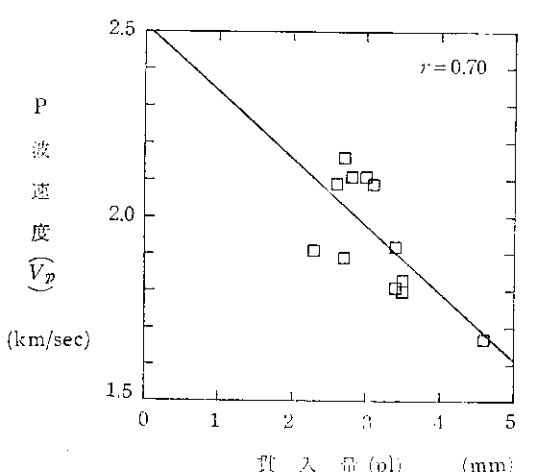


図-17 B地点における pl と V_p の関係

の関
直線
64,
nよ
る。
定す
岩石
が、

強度が低く、ボーリング時のコアの劣化、コア採取時から試験実施時までの試料の劣化が、これらの相関を悪くする原因になり得ることを考慮に入れておく必要がある。

図-15~17は、P波速度に対する pr, pm, pl の関係を示したものである。ここでも、P波速度に対するコーン貫入試験値には相関がみられ、直線で近似させた pr, pm, pl に対する相関係数は、0.52, 0.65, 0.76 である。

5. 試験結果の検討

これまで、A、B両地点について、孔内コーン貫入試験値と一軸圧縮強度、P波速度（インテンシティ・ログ）の関係について注目してきた。両地点の試験結果からは、一軸圧縮強度で100数10 kgf/cm²以下程度の軟岩ではコーン貫入試験が音波検層など、他の手段との併用によって岩盤の強度や性質の推定に有用であることが明らかになった。そこで、コーン貫入試験値が絶対値として岩盤の評価に使えるかどうかを検討するために、A、B両地点のデータをまとめてみた。図-18は、両地区の岩石の一軸圧縮強度に対するprの関係を示したものである。これらによると、両地点の試験値は直線上に調和的にのり、直線で近似させた相関係数は0.9程度となりよい相関を示す。これからのみ判断すると、貫入試験値が堆積岩の岩種によらず、一軸圧縮強度の推定に適用で

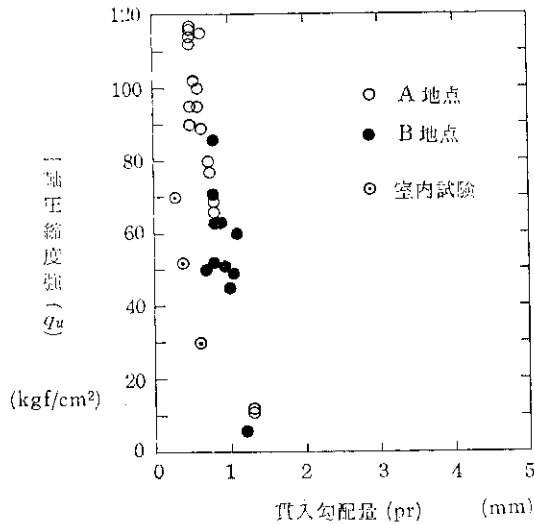


図-18 A、B地点および室内試験のprと q_u の関係

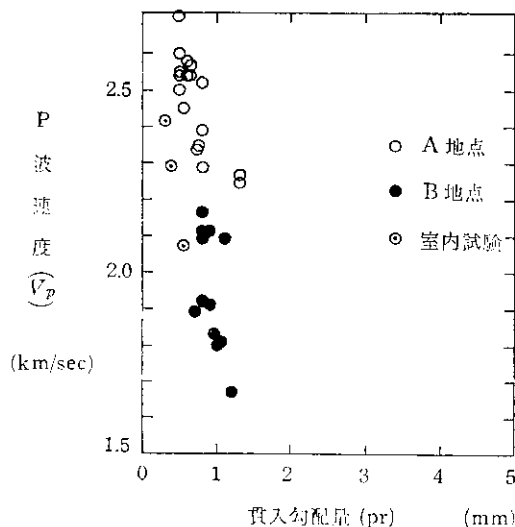


図-19 A、B地点および室内試験のprと V_p の関係

きるようにみえるが、これに室内試験で実施したベントナイトセメントの試験値を入れると異なった位置にプロットされる。同じように、A、B両地点の岩石のP波速度に対するprの関係を示したのが図-19である。この図でもP波速度に対する貫入試験値は1つの直線で近似させてもよいようにみえるが、両地点の岩石のP波速度は、2.2 km/secより高いものと低いものに分けられており、それぞれ異なった近似線を持っており、これを1つの直線で関係づけるのは無理である。

また、ベントナイトセメントによる室内試験値は、これらの点から離れている。

以上のことを総合的に判断すると、コーン貫入試験値と一軸圧縮強度やP波速度との相関については、岩種ごと、試験地点ごとに求めるのが妥当である。

6. あとがき

ボーリング孔を利用して、岩盤の性状を連続して把握するための手段としては、ボアホールテレビ、各種検層などがある。しかし、これらの手段では、一般に構造物の基礎の設計に必要な強度や変形を直接知ることはできない。そこで、ボーリングコアの強度試験や各種孔内載荷試験が実施されるが、これらは調査費用、調査時間の問題から、ボーリング孔全体の連続的なデータを得ることができないのが実情である。このように、岩盤の性状の連続的、かつ力学的な定量的把握が可能であれば有用であるが、現在使用されている機器にはこのような性能を備えたものはない。コーン貫入試験は、弱い軟岩という限られた岩盤のみに適用されるとはいえ、その測定法の簡便さ、測定時間の短かさ、結果の連続的表記の可能性など、一応満足すべき結果の得られる試験法といえよう。今後さらに現位置試験を積み重ね、各種の試験結果との対応、岩盤分類への適用などについて検討していく予定である。

本報告については、実験およびデータ整理で、当研究室の内山進実験主任に御協力をいただいた。記して謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 野池正保・本館静吾・足田貞良・滝ヶ平正美：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一，土木試験所月報，No. 403，1986年12月。
- 2) 対馬邦六・垣見俊弘・楠村 武：5万分の1地質図幅説明書「厚田」，1956年。
- 3) 小林 勇・秦 光男・山口昇一・垣見俊弘：5万分の1地質図幅説明書「妹背牛」，1969年。