

(117)簡易な原位置載荷試験による岩盤の変形測定に関する 実験的検討

建設省土木研究所 正会員 豊田光雄
同 中村 昭

Estimate of Deformation Modulus of Rock Foundation Using Simple In-situ Loading Test

Mituo TOYODA and Akira NAKAMURA

Public Works Research Institute, Ministry of Construction

Abstract

Plate loading test is widely used for determining the deformability of rock foundation. Considering the inherent heterogeneity or non-uniformity of the rock bed, many test data should be accumulated when estimating the global deformation characteristics for the design purpose. However limited number of data could be attained under ordinary loading methods. We have applied quite simple lateral loading test (SLLT) which had been developed in the soil and foundation engineering and investigated its availability for the rock bed. Because of its advantages in compact apparatus and easy performance, this simple type of deformation test was approved in our field investigation to be very effective for numerous data sampling. On the other hand, loading capacity and stressed area are quite limited, so that its application may be confined to the soft massive rock of deformation modulus lower than CM class. A good correlation was found between the deformation index of SLLT and the deformation modulus determined by plate loading test. Some improvements are also suggested for future development.

1. はじめに

岩盤の変形性を評価する目的で平板載荷試験が広く行われているが、ダムサイトの基礎岩盤は必ずしも一様でないため、設計に用いる変形係数の評価に当たっては、多点数の測定を行いそのばらつきを考慮する必要がある。しかしながら、一般に行われている平板載荷試験は、装置もやや大掛りとなるため、多点数の試験には必ずしも適しているとはいえない。そのため、これに代わる簡易な方法として土質地盤等で用いられている横方向ロッド載荷試験の応用¹⁾を試みた。

本報文は、ダムサイト岩盤で横方向ロッド載荷試験と平板載荷試験による変形係数の比較検討などを行い、岩盤における横方向ロッド載荷試験の適用性について考察したものである。

2. 横方向ロッド載荷試験法の概要

横方向ロッド載荷試験器は、特別な反力装置を必要とせず、簡単に地盤の変形特性を評価できるように考案されたものである。その特徴は次のとおりである。

- ① 装置がコンパクトで運搬が容易
- ② 試験場所を選ばない（狭い所や斜面でも可能）
- ③ 試験操作が簡単で試験時間が短い。

このために平板載荷試験に比べて多くの試験データが比較的容易に得られる点に最大の利点がある。簡便さを指向しているために、載荷重の容量を大きくしなければ低級岩盤を対象とした試験法として位置づけられる。

試験器の概要を図-1に示す。

本試験法は、反力ロッドと載荷ロッドを地盤面から所定の深さに挿入して、ロッド間に引張荷重を段階的に与えながら載荷ロッド頂部の水平変位を測り、得られた荷重-変位曲線から地盤の変形係数を求めるものである。載荷ロッドが地盤中で横方向に支持されているので、引張載荷に伴って地盤反力を受けることになり、地盤の剛性によってロッド頂部の変位が異なってくる。本試験法では載荷ロッドを1次元の弾性支承上の梁として解析して求めた校正図を用いて、荷重-変位曲線の勾配から地盤の変形係数を求める。地盤の挙動が完全な等方弾性体でないので、本試験法で得られる変形係数と平板載荷試験による変形係数とは、載荷形式が異なるために値は一致しない。

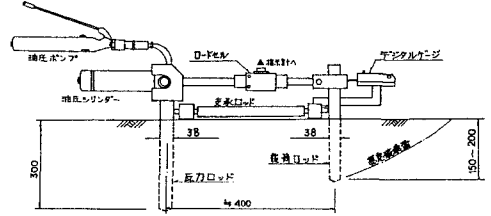


図-1 横方向ロッド載荷試験器

表-1 横方向ロッド載荷試験器の仕様

	φ38高強度地盤型
型 式	S R - 3 8 E
ロ ッ ド 径	直 径 3 8 mm
ロ ッ ド 間 隔	標 準 4 0 cm
載荷ロッド設置深さ	標 準 2 0 cm
載 荷 能 力	最大 5 tonf (引張り) 標準 4.5 tonf (引張り)
ロードセル容量	5 tonf (引張り側)
変 位 計 精 度	1/100 mm

3. 現位置試験

対象とした岩盤は花崗岩が風化したCM級、D級岩盤である。CM級岩盤では亀裂が発達しており、D級岩盤では風化花崗岩CLが7割、マサが3割の比率で分布している。

試験は、1)横方向ロッド載荷試験、2)平板載荷試験を行った。以下、各試験法の仕様と手順を示す。

1) 横方向ロッド載荷試験

横方向ロッド載荷試験に用いた試験器の仕様を表-1に示す。試験器は、①岩盤中に挿入する反力および載荷ロッド、②ロッド間の相対変位を地表面で拘束する支点ロッド、③載荷重を発生させる油圧ポンプとシリンダー、④測定器（ロードセルと変位計）から構成される。載荷重と載荷ロッドの変位の出力は可搬型のパソコンにとりこまれ直ちに図化処理できるようになっている。試験手順は図-2のフローによった。試験は原則として多サイクル方式で行い、載荷重の増分は岩盤の硬軟により50kgfまたは100kgfのピッチで行った。各荷重段階で10秒間定荷重を保持し、この間の変位が1/100mmをこえるときには60秒間の保持を原則とした。

2) 平板載荷試験

平板載荷試験は、直径30cmの載荷板を用いて等分布荷重法によって予備荷重を与えた後に3ステップで段階的に荷重を増加させ、最大荷重を3回繰り返した。載荷・除荷スピードは1kgf/cm²/minとし最大荷重は6.36ton(9kgf/cm²)

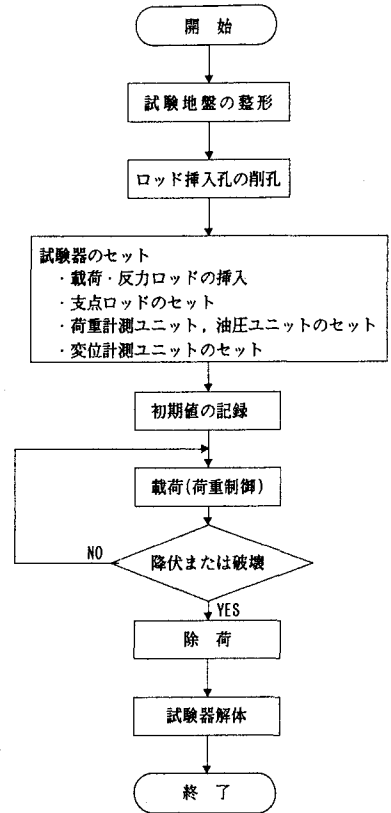


図-2 試験のフロー

とした。

3) 試験場所と試験数量

対象とした岩盤は、ギャラリー部の基礎である。平板載荷試験と横方向ロッド載荷試験は平坦部で地表部6ヶ所、地表から30cm掘り下げた地盤6ヶ所の計12ヶ所とした。また、横方向ロッド載荷試験は上記のヶ所以外にギャラリー部の傾斜部を含めた計39ヶ所で行った。図-3に横方向ロッド載荷試験と平板載荷試験場所を示す。

4. 試験結果および考察

4.1 横方向ロッド載荷試験と平板載荷試験による変形係数の比較

表-2に示すように横方向ロッド載荷試験は、平板載荷試験と試験形態がかなり異なっているにもかかわらず、荷重-変位 ($P-\Delta$) 曲線はよく似たパターンを示すことが確認された。図-4は、その一例でほぼ同一地点における両者の比較である。そこで横方向ロッド載荷試験の $P-\Delta$ 曲線の初期の包絡線上の接線勾配を目視による直線近似で求めた (P/Δ ; 図-5)。このようにして求めた P/Δ 値を横軸にとり、平板載荷試験による変形係数 E_0 を縦軸にとって両対数軸上で両者の関係をプロットすると図-6のようになった。 E_0 の値はおよそ400~6000 (kgf/cm^2) の範囲に分布しているが、両者の対応は少なくとも上記の範囲内では対数軸上で直線関係にあるとみなすことができる。

E_0 と P/Δ の対数線形回帰式を求めて次の較正式を決定した。

$$\log E_0 = -2.2240 + 1.2670 \cdot \log (P/\Delta)$$

相関係数: $r = 0.9678$

標本数: $n = 12$

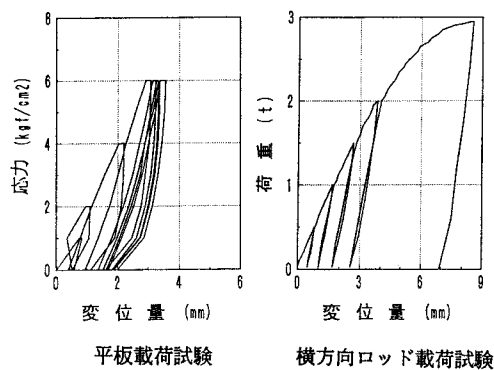


図-4 平板載荷試験と横方向ロッド載荷試験の荷重-変位パターンの比較の一例

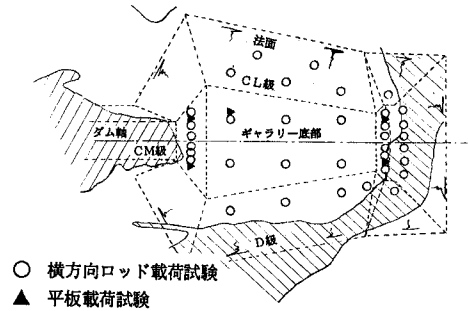


図-3 試験場所

表-2 試験形態の比較

項 目	平板載荷試験	横方向ロッド載荷試験
荷重負荷体	平 板	ロッド
荷重方向	地盤面に垂直	地盤面に平行
載荷面積	比較的大きい	小さい
負荷面の形状	円 形	細長方形
載荷面の応力分布	一様分布	一様でない
載荷面の変位分布	一様分布	一様でない

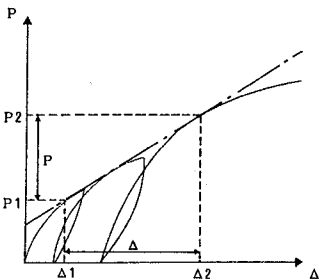


図-5 P/Δ の求め方

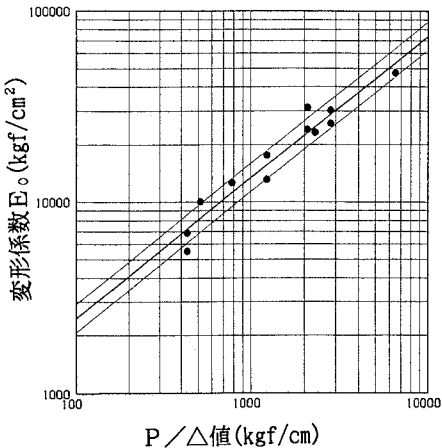


図-6 変形係数 E_0 と P/Δ 関係

図-6には上記の校正曲線（対数軸上では直線とデータのばらつきの大きさを示す標準偏差（回帰残差変動を表す不偏分散の平方根）の巾を示しているが、図より明らかなように、ばらつきは比較的小さく相関性は非常に良好である。

4.2 各地点で得られる変形係数

さきほども述べたが、35地点で得られた横方向ロード載荷試験の荷重－変位曲線をみると、おおむね平板載荷試験をはじめとする従来の各種の現位置変形試験の場合とよく似た曲線形状を示すことが確認された。

荷重－変位図のパターンを分類すると、図-7に示すようにおおそ次の三種類に分けられた。

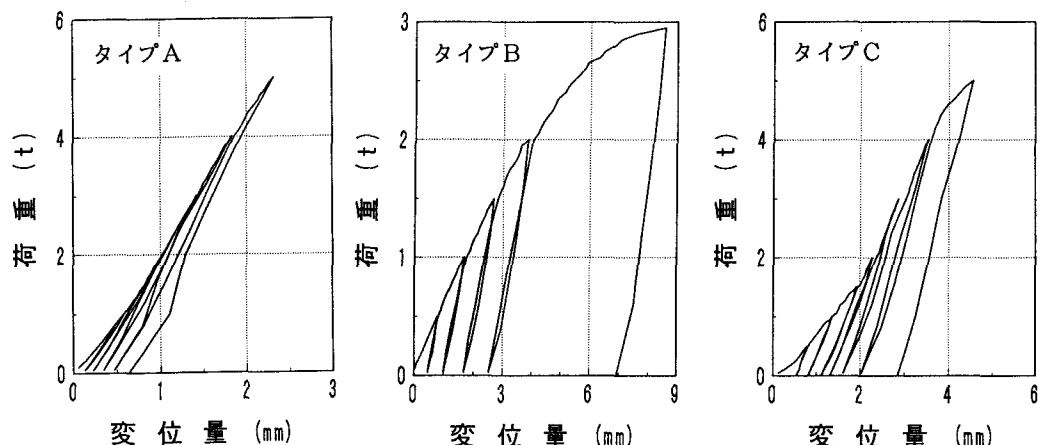


図-7 荷重－変位パターン分類

タイプA：疑似弾性挙動（5ケース）

タイプB：弾塑性挙動（25ケース）

タイプC：変位挙動が不自然（5ケース）

最も多いパターンはタイプBで全体の約70%を占めている。疑似弾性挙動を示すタイプAは剛性が高く、DH級の一例を除く他の4例はいずれもCL級に属している。

タイプCにみられるような荷重－変位曲線が下に凸の傾向は反力ロード側がかなり動いたことに主な原因があると思われる。反力ロードは載荷ロードよりも当然埋込み深度は大きくとっているが、試験地盤が一様でないので、反力側が載荷例に比べてかなり弱いときにはこのようなことが起り得ることが分かった。

載荷直後に下に凸の荷重－変位挙動を示すケースがいくつかあるが、これはセッティング後に残っている載荷系の「遊び」によるものであると考えられる。

今回は、変形係数を求めるための P/Δ を処女載荷過程の初期の直線部に着目してその勾配から求めているが、初期の段階から荷重－変位曲線の曲がり方が大きい場合（一般に剛性が低いときに多い）には P/Δ の決定に任意性が残る。この問題は横方向ロード載荷試験固有のものではなく、岩盤が強い非線形性を示すところでは通常の変形試験においてもみられることはよく知られている。

4.3 岩級と変形係数との関係

図-8に横方向ロード載荷試験による変形係数 $E\pi$ の分布範囲を岩級ごとに示した。 $E\pi$ の値は先の実験式を用いて平板載荷の値に換算したものである。表-3に各岩級毎に最大、最小および平均値を示す。DL～DH級では最大値と最小値の差が大きくおよそ10倍くらいの開きがある。変形係数は全体的にかなりばらついて分布しているが、CL級では比較的安定した変形係数が得られている。

各岩級の平均値を見るとDL級で500、DH級で1800、CL級で2900kgf/cm²程度の値を示しており、変形性の面からみても軟岩～強風化岩とみなされるようである。

4.4 変形係数と乾燥密度との相関

変形係数 $E\pi$ と地盤の乾燥密度 ρd との関係をプロットすると図-9のようになった。ここで求めた密度は横方向ロッド載荷試験の近傍でR I法によって求めたものである。 ρd は $E\pi$ にかなり影響することがあきらかに読みとれるが、ばらつきも大きく定性的な相関性を示すにとどまっている。これは変形係数にかなり影響するとみられる地盤の異方性や分離面の走向などの構造的な要因が反映されていないからであるとみるのが妥当のようである。

5. まとめ

今回、比較的岩級の低いところで横方向ロッド載荷試験を用いて次のような結論を得た。

① 横方向ロッド載荷試験の利点の一つは簡易性と機動性にある。今回の調査でも示されたように、横方向ロッド載荷試験を用いると多くのデータを得ることが現実的に可能になり、また、壁面や斜面においても実施できるため、ばらつきの大きい低級岩盤などにおいては有効な変形試験法といえる。しかし、剛性の高い硬質岩では載荷系の容量が不足しており、硬質岩まで適用するときには、簡易性を多少犠牲にしても装置を少し大きくする必要がある。現状の装置では平板載荷相当の変形係数で $E_0=10,000\sim15,000$ (kgf/cm^2) ぐらいが限度と思われる。

② 今回実施した12点の平板載荷試験との対照の結果にも示されているように、両者の相関性は非常に高いことが確認された。今後、更に多くの岩種や岩級を対象に較正データを積上げ、両者の関係が岩盤の諸条件に依存しないかどうかを確認しておく必要がある。

③ この試験法は載荷面積が小さいので、局所的な地盤条件に左右され易い可能性が考えられる。したがって、クラックや節理が発達する亀裂性岩盤においても平板載荷試験との比較を行い、岩盤の構造的要因が両者の相関に与える影響についても調べるのが重要である。これらの結果を踏まえて、岩盤における横方向ロッド載荷試験の適用範囲と限界を明らかにすることが望まれる。

④ 今回の調査で、岩盤を対象とする試験器として今後改良した方がよいと思われる点がいくつかある。例えば、変位計の分解能を向上させること、支点フレームユニットを強化して支点のふらつきを防ぐこと等の改善が考えられる。これらについては①に述べた硬質岩への適用などとあわせて検討する必要がある。

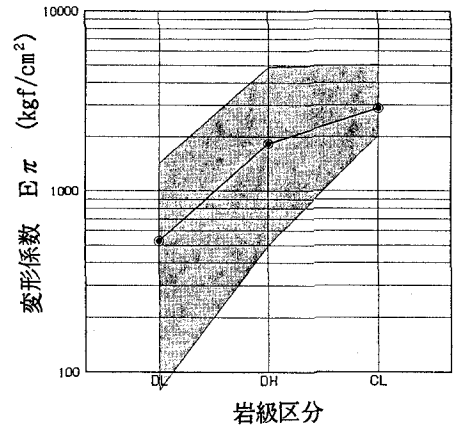
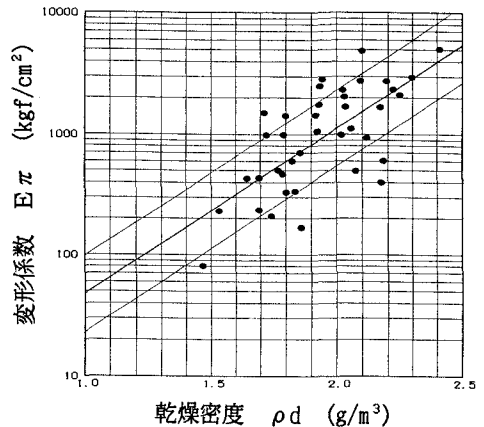


図-8 岩級と変形係数 $E\pi$ の関係

表-3 変形係数 $E\pi$ の最大、最小、平均値

岩級区分	$E\pi$ (kgf/cm^2)		
	平均値	最小値	最大値
DL	525	80	1423
DH	1834	495	4895
CL	2887	2034	5043



$$\log E\pi = 0.3020 + 1.3748 \cdot \rho d$$

$$\text{相関関数 } 0.6927$$

図-9 乾燥密度と変形係数 $E\pi$ の関係

参考文献

- 1) 太田秀樹他：原位置試験により求めた締固め地盤の強度と変形係数の関係、第24回土質工学研究発表会、1989.6