

(53) 礫岩の不均質性に着目した平板載荷試験

PLATE LOADING TEST IN CONSIDERATION OF HETEROGENEITY OF CONGLOMERATE

川崎将生*・佐藤英隆**・山口嘉一***・中村 昭****

Masaki KAWASAKI, Hidetaka SATOH, Yoshikazu YAMAGUCHI and Akira NAKAMURA

When Large-scale structure are constructed on soft rock foundation, evaluation of its mechanical properties, particularly deformability, is one of the most important subject. However, in the case of test for conglomerate consisting of gravel as well as matrix, heterogeneity has to be taken into consideration. Plate loading tests with a 30cm and 60cm diameter plates have been performed to investigate the influence of heterogeneity of conglomerate on test results. This research reveals that deformation modulus obtained from the test with a 60cm diameter plate is larger than that from the test with a 30cm diameter plate. In addition, test results are found to be affected with grain size and distribution of gravels at the test site, and diameter of the plate.

1. まえがき

我が国の国土の3分の1は、軟岩と呼ばれる比較的軟質な岩盤からなり、近年はダム・橋梁・トンネルなど多くの土木構造物を、この岩盤上に安全かつ経済的に建設しなければならない状況になっている。このような基礎岩盤の力学特性を評価する方法として、室内試験より大規模な平板載荷試験、孔内載荷試験、岩盤せん断試験等の原位置試験が従来から実施されている。これらの試験は元来、岩質が堅硬な硬岩基礎に対して開発されたものであるが、軟岩基礎に対しても同様な方法で試験及び解釈が行われているのが現状である。しかし、軟岩は土質材料と岩質材料の中間的な性質を持ち、特有の力学挙動を示すため、硬岩基礎に対して提案された試験法をそのまま適用することで、軟岩基礎の力学特性を精度よく評価することは困難である。軟岩の力学特性を的確に把握するためには、対象とする軟岩の物性を十分調査し、その特性に応じた適切な試験方法で原位置試験を実施、解釈する必要がある。

軟岩基礎上に大型土木構造物を建設する場合、その力学特性のうち特に変形性が問題とされ、その評価及び設計値を決定するために、原位置において平板載荷試験が実施されている。この試験は、通常、岩盤上に設置した直径30cmの剛な円形平板に荷重を載荷して載荷重と平板の変位を計測し、その結果から岩盤の変形性を評価するものである。この平板の大きさは、載荷ジャッキの容量や横坑幅、試験の作業性等の制約から30cmとされている。しかし、対象とする岩盤が、火山砕屑岩類のように、礫と基質からなるため粒度範囲が比較的広く、しかも礫と基質の硬軟の差が比較的大きいものである場合は、岩盤の変形性を評価するための代表的な手法、いわゆる REV(Representative Elementary Volume)が粒径の小さい砂岩、泥岩のような堆積岩等と比較して大きい。したがって、従来用いている直径30cmの載荷板による試験のスケールが必ずしも岩盤の変形性を評価するために十分な大きさではない場合、つまり不均質性が問題となる場合も考えられる。

このような性状を有する岩盤の変形性を評価するためには、岩盤の REVに見合った試験スケールで試験を実施することが理想であろう。しかし、岩盤の不均質さの程度によっては、REVに従って決定された試験スケールがあまりにも大規模なものとなり、事実上、試験はそのスケール以下で実施せざるを得ない場合が多いと考えられる。したがって、現実的には、礫と基質からなる不均質な岩盤に対する平板載荷試験は、岩盤の不均質性もさることながら試験の作業性や経済性も考慮し、さらに地質学的判断にも基づいた上で実施可能な試験スケール、すなわち円形平板の直径を決定し、地質学的見知からある程度その岩盤を代表する性状を有するとして選定された試験箇所において実施されるべきである。

このようにして実施された平板載荷試験結果は、岩盤の不均質性を考慮して解釈される必要があると考えられるが、岩盤の不均質性が力学特性に及ぼす影響については未だ解明されていない。このような背景から、今回は岩盤の不均質性と平板載荷試験結果の関係を調査するために、通常の試験スケールと比較して強度的、粒度的に不均質と考えら

* 正会員 建設省土木研究所ダム部フィルダム研究室研究員

** 正会員 建設省土木研究所ダム部フィルダム研究室部外研究員

*** 正会員 工博 建設省土木研究所ダム部フィルダム研究室主任研究員

**** 建設省土木研究所ダム部フィルダム研究室長

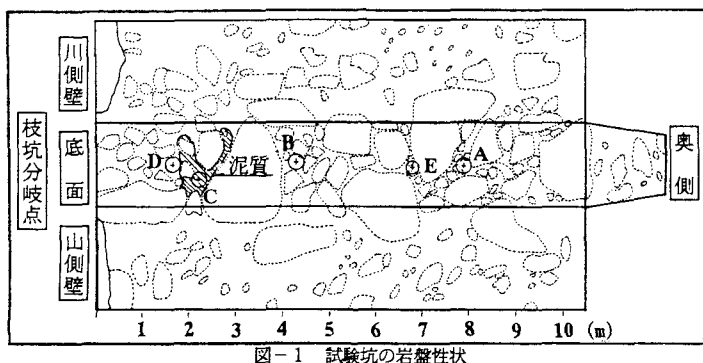


図-1 試験坑の岩盤性状

れる礫岩を対象として、原位置の同一箇所直径 30cm (従来型) 及び 60cm の円形平板を用いた平板載荷試験を実施したので報告する。

2. 試験サイトの地質

図-1 に試験を実施した横坑 (試験坑) で観察された岩盤のスケッチを示す。この試験坑は、河川の右岸側に掘削された本坑の坑口から 15m 地点より下流側に分岐した枝坑であり、試験対象とした新第三紀中新世中～後期の礫岩層中に今回の試験のために掘削されたものである。この礫岩は、淡灰褐色～帯緑灰褐色を呈しており、礫と基質からなる不均質な岩盤であり、岩級は全体に C_L 級にランクづけられる。試験坑底面は比較的乾燥しており、地下水位は底面下 40～80cm にある。

礫は火山礫凝灰岩、粗粒凝灰岩及び泥岩などから構成され、新鮮で堅固なものが多く、全体に亜円礫～亜角礫である。礫径は主に 5～50cm であり、所々 2m に及ぶ巨大礫を含む。各々の礫はかみ合うように密集して分布し、試験坑側壁では不明瞭な水平方向の礫の並びが見られるが、底面では規則性は見られない。

基質は砂～泥質凝灰岩よりなり、固結度が低く軟質である。全体には砂質凝灰岩質基質 (砂質基質) が多く、やや締まっている部分も見られるがハンマーで容易に崩せる程度である。この中に小規模レンズ状に含まれる泥質凝灰岩質基質 (泥質基質) は、指圧でへこみ、極めて軟質である。特に試験坑底面の 2.0～2.5m 付近に泥質基質がやや広く分布している。

3. 試験概要

試験地点は大小さまざまな礫とその間に小規模に存在する基質からなるが、基質の強度は礫に比べて相当低いため、岩盤全体の变形性は基質の性質及び分布状況左右されるとの考えから、試験箇所は礫の密集部を避け、基質と礫をある程度均等に含む箇所を試験箇所を選定することにした。

試験箇所を選定に際しては、まず最初に試験坑底面全体のずりを除去し、試験位置を概略選定し、次に底面のゆるんだ岩盤を除くために 30～50cm 掘り下げ、岩盤状況を再度観察して試験位置を調整し、最終的に図-1 に示す試験位置を確定した。

これらの試験箇所で礫岩の不均質性が試験結果に及ぼす影響を検討するために、同一箇所直径 30cm と 60cm の平板を用いた平板載荷試験を実施した。試験面の詳細な岩盤スケッチを図-2 に示す。試験は各箇所とも最初に直径 30cm 平板の試験を実施し、次に直径 60cm 平板の試験を実施する順序で行った。載荷パターンを図-3 に示す。載荷は、岩盤と平板のなじみを良くするために予備載荷を行い、次に段階載荷および最大荷重載荷を行う形式とした。また、その他の試験仕様は、土木学会「平板載荷による原位置岩盤の变形試

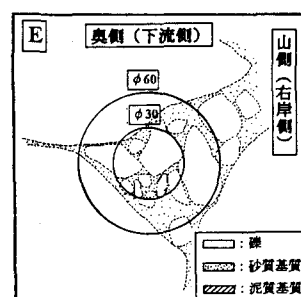
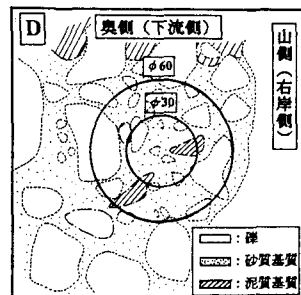
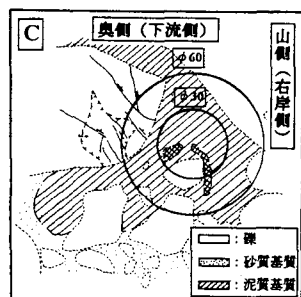
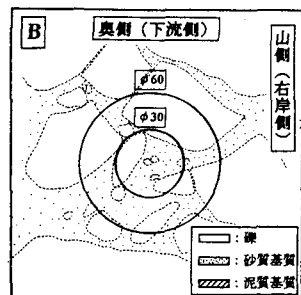
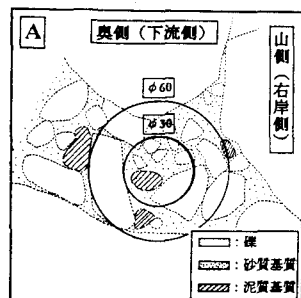


図-2 試験面の岩盤スケッチ

験方法の基準（1976）¹⁾」等に準拠した。

試験終了後、試験箇所直下の岩盤状況を観察するために開削調査を実施し、数深度で岩盤のスケッチをとった。各試験箇所における試験面の基質と礫の面積比を表-1に示す。

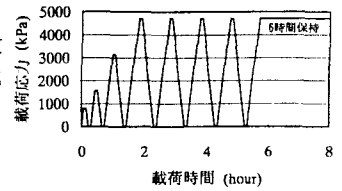


図-3 載荷パターン

4. 試験結果及び考察

4.1 載荷応力と変位の関係

図-4に各試験箇所計測された載荷応力と平板の変位の関係を示す。平板の変位は平板上の4点で計測した変位データの平均値をとった。横軸は平板直径で無次元化した変位をパーセント表示している。なお、試験では図に示した載荷以降に最大応力までの載荷と除荷を数回繰り返し、さらに最大応力の状態で数時間保持することにより岩盤のクリープ特性を調査したが、今回はこれにはふれず、別の機会に報告したい。

まず全体的に見ると、各ケースで多少の程度の差が見られるものの、処女応力部分を包絡した曲線は下に凸、すなわち載荷応力の増加とともに岩盤が硬化していく挙動を示している。平板載荷試験におけるこのような現象は割れ目を多く含む岩盤でよく観察されるものであり、載荷応力の増加とともに岩盤内の割れ目が徐々に閉塞していき、岩盤全体としてマッシュになっていくためであると考えられている²⁾。今回試験対象とした礫岩には岩盤観察では割れ目が認められていないが、試験坑掘削における応力開放や試験面整形時の衝撃等の乱れによって、主に礫と基質の境界に分離面が形成され、これが閉塞していくことにより生じた現象であると考えられる。

試験箇所Cにおける直径30cmの試験では、その他の試験と比較して極端に大きな平板の変位が観察されたが、同じ箇所の直径60cmの試験では他の試験箇所の結果とそれほど異なった挙動を示していない。試験箇所Cの試験面のスケッチ（図-2）を見ると、直径30cmの平板は一部礫にかかっているものの大部分が軟質な泥質基質上にある。一方、直径60cmの平板も同様に泥質基質上に位置しているが、直径30cmの試験と比較して礫部の面積比が大きい（表-1）。従って、試験面の観察からのみ考えれば、両試験結果の違いは試験面に含まれる礫の面積比と分布形態の違いによるものであると推察されよう。しかし、この試験箇所での開削調査結果から、泥質基質は試験面下30cm程度までしか分布しておらず、しかも直径60cmの平板にかかっていた巨礫は泥質基質の下に分布する砂質基質に支持されたものであることがわかった。このことは、直径30cmの試験では上部の泥質基質に載荷応力が作用し、泥質基質の変形量が卓越して生じたが、直径60cmの試験では載荷応力が礫を介して下部の砂質基質に作用したことを意味しており、結果的に試験箇所Cでの両試験結果の大きな差異は、試験面に含まれる礫の面積比や分布形態だけでなく、載荷応力が作用した基質の違いによるものであると考えるべきである。このように、試験面に礫が存在する場合は、その礫がどのような性状の基質に支持されているかを考慮して試験結果の解釈を行わなければならない。

各載荷サイクルの応力最大時に計測された平板の変位量（全変位量）に対して、その直後の応力0時に計測された平板の変位量（永久変位量）の比をとり、平板の変位に対するこの比の推移を示したものが図-5である。直径30cmの結果はいずれも同一箇所の直径60cmの結果より大きな値を示している。これは、直径30cmの試験の方が、非可逆的な変位要素の影響が強いことを意味している。非可逆的な変位要素とは、今回対象とした岩盤においては、岩盤の塑性化によるものより、むしろ礫と基質の分離面が閉塞することや応力開放によってゆるんだ試験面付近の岩盤が締まることなどが主たるものであると考えられる。平板直径が大きなものほど上記のようなゆるみの少ない部分に比較的大きな載荷応力が作用したことも、このような傾向を助長する原因の一つであろう。これは、今回対象とした礫岩のような不均質な岩盤における平板載荷試験で見られる一つの特徴であると考ええる。

表-1 基質と礫の面積比

試験箇所	枝杭分岐地点からの距離(m)	平板直径(cm)	基質と礫の面積比	
			基質	礫
A	7.9	30	58	42
		60	38	62
B	4.3	30	55	45
		60	43	57
C	2.45	30	87	13
		60	58	42
D	1.7	30	82	18
		60	64	36
E	6.8	30	28	72
		60	28	72

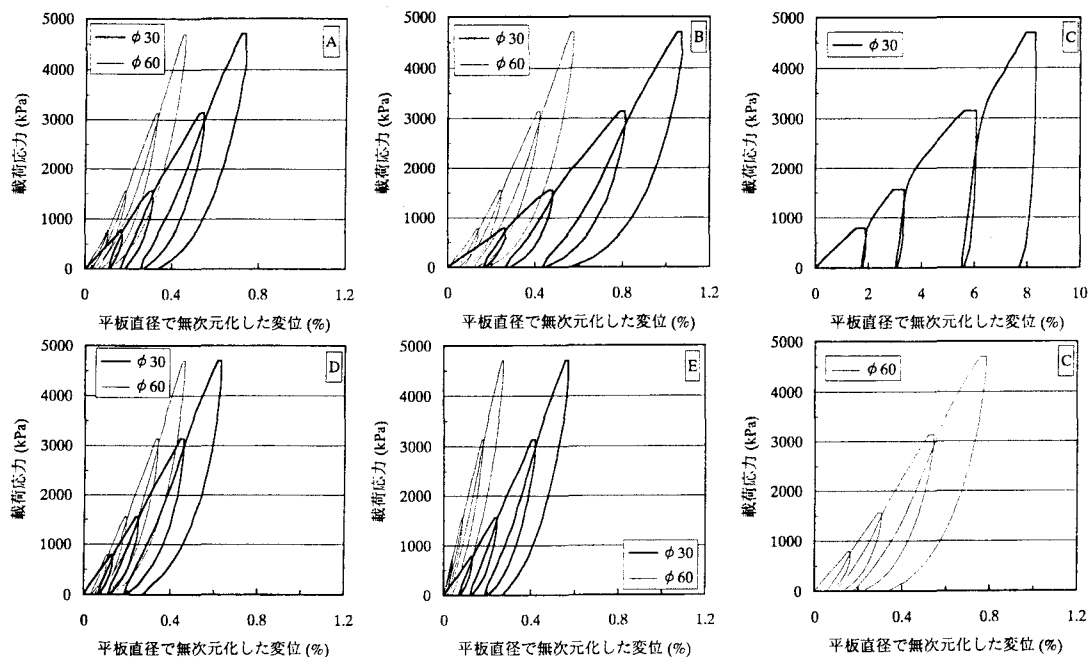


図-4 載荷応力と平板変位の関係

4.2 変形係数における礫の影響

各試験箇所において、平板直径 30cm の試験結果と 60cm の試験結果を比較すると、明らかに前者の試験結果の方が、岩盤の変形性を大きく評価している。表-2 に各試験ケースにおける岩盤の変形係数を示す。変形係数の計算には、従来の設計値決定に使われている方法、すなわち載荷応力と変位の関係がある程度線形と見なせる範囲において、弾性論に基づく次式を適用した。

$$D = \frac{a\pi(1-\nu^2)}{2} \cdot \frac{\Delta p}{\Delta \delta} \quad (1)$$

D : 変形係数 a : 平板半径 ν : ポアソン比 (=0.3 とした)
 Δp : 計算に用いた載荷応力増分 $\Delta \delta$: 計算に用いた変位増分

図-6 に、変形係数と試験面の礫面積比の関係を示す。ただし、基質が泥質で、大きな変形を生じた試験箇所 C の直径 30cm の試験結果はここでは除外した。直線回帰すると直径 30cm、60cm の両試験でそれぞれ礫面積比が大きなものほど変形係数が高い傾向を示しているが、データのバラツキが大きく、相関があるかどうかを判断することは困難である。また、岩盤内の礫の体積比が変形係数に及ぼす影響について考えるために、試験面直下の礫の体積比を開削調査の岩盤スケッチから概算した。礫の体積は試験面直下で観察

された礫の面積を深さ方向に平板直径の深さまで積分して算出し、試験面直下で平板直径と等しい深さの円柱の体積に対する比を各実験ケースにおける岩盤の礫体積比とした。図-7 はこのようにして求めた礫体積比と変形係数の関係であるが、図-6 と同様に、データのバラツキがかなり大きく、よい相関は得られなかった。

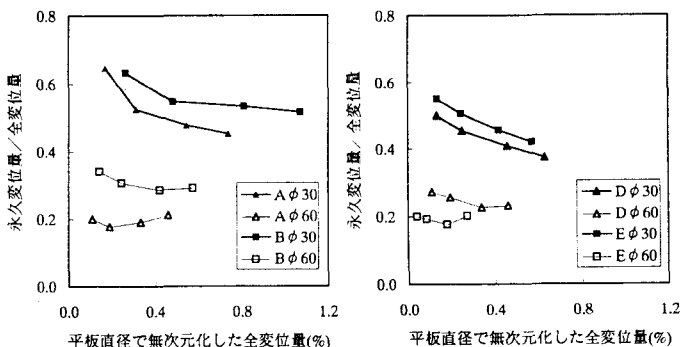


図-5 永久変位量/全変位量の推移

表-2 変形係数

試験箇所	平板直径	変形係数		計算に用いた 応力範囲 (kPa)	D_{60}/D_{30}
	(cm)	D_{30}	D_{60} (MPa)		
A	30	566		2352~4704	1.53
	60	868			
B	30	405		1960~4704	1.78
	60	721			
C	30	46		2156~4704	10.4
	60	477		1176~4704	
D	30	621		2156~4704	1.44
	60	896			
E	30	721		2156~4704	1.69
	60	1218		1372~4704	

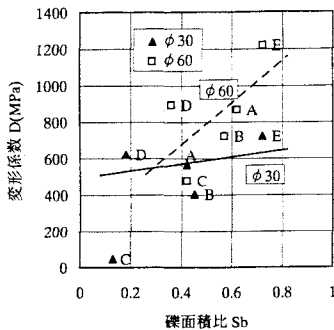


図-6 変形係数と礫面積比の関係

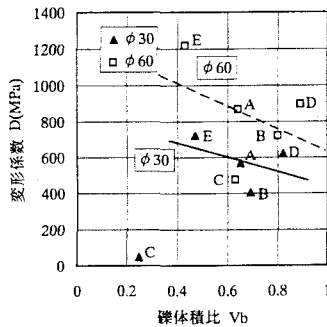


図-7 変形係数と礫体積比の関係

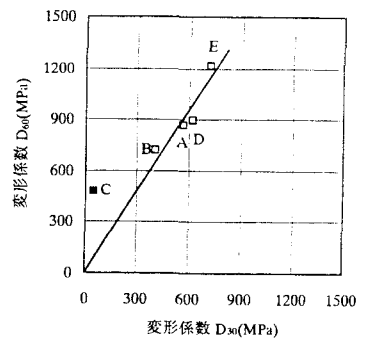


図-8 D_{30} と D_{60} の関係

このように、今回の試験では、試験面の礫の面積比や試験面直下の礫の体積比と変形係数にそれほど明確な関係が見られなかった。今回対象とした礫岩のように、礫径が2mにも及ぶ巨礫を含む岩盤に対する平板載荷試験の場合、礫の存在が試験に及ぼす影響の一つとして、平板が巨礫にかかっていることによって、載荷応力がより広範囲に伝播することが考えられる。今回の場合、直径60cmの平板はこのような巨礫にかかっているケースがほとんどであったため、載荷応力が広範囲に伝播し、結果的に平板の変位量が小さくなるため、変形係数が直径30cmの試験と比較して大きなものとなったことが推察される。従って、今回の試験では、礫の面積や体積より、むしろ礫径や試験面における礫の配置の方が試験結果に及ぼす影響が大きかったものと考えられる。特に、横坑壁より奥の地山にまで及ぶような巨礫に平板がかかっている場合には、その礫自体は載荷によってほとんど変位を示さないことが予想される。

4.3 平板直径及び試験箇所の違いによる変形係数の大小関係

同一箇所における直径30cmの平板載荷試験から求めた変形係数 D_{30} と直径60cmの平板載荷試験から求めた変形係数 D_{60} の関係を示したものが図-8である。これを見ると、試験箇所Cの結果を除けば、 D_{60} は D_{30} の1.4~1.8倍程度となっている。今回の試験では同一箇所でも平板直径を変化させているため、平板直径の異なる両試験結果に見られたこの関係は、基質の硬軟による影響によるものとは考えられず、上述のように試験面付近の礫径や礫の配置、及び平板直径の変化によって相対的にその影響の度合いが変化する試験面付近のゆるみの影響等によるものであろう。また、原点を通る直線で回帰すると、 D_{30} と D_{60} には比較的良好な相関が見られた。

直径30cmの試験シリーズでの変形係数の大小関係は60cmの試験シリーズでの変形係数の大小関係と同様な傾向を示した。すなわち、場所の違いによる岩盤の変形性の大小評価は平板直径に依存しないことを示しており、これは実務的に見ると意味のあることである。また、各試験ケースで試験面付近の礫径や礫の配置が全く異なったものであるにもかかわらずこのような傾向を示したことから、試験箇所の違いによる変形係数の大小関係は、礫径や礫の配置にはそれほど依存せず、基質の硬軟を反映している可能性がある。これについては、今回の試験では各試験箇所における基質の硬さを調査してないため断定できない。今後、各試験箇所の基質部で針貫入試験等の簡易試験を実施し、また、試料をサンプリングして室内試験等を実施して基質の力学的性状を把握し、今回の試験結果の解釈にフィードバックしていきたいと考えている。

5. 今後の課題

今回実施した平板載荷試験結果の解析では、礫岩の不均質性が試験に及ぼす影響を、ごく一部ではあるが定性的に評価することができた。しかし、この試験結果に対しては、今回解釈を加えたもの以外にも礫岩の不均質性に起因する様々な影響因子が存在すると考えられ、これらに関しては未だ推論の域を脱していない。今後もさらに多量かつ詳細にデータを収集し、岩盤の不均質性と平板載荷試験結果の関係を解明していく必要がある。

参考文献

- 1) 原位置岩盤の変形およびせん断試験の指針 - 解説と設計への適用 -, 土木学会, 1983.12.
- 2) 例えば、工藤慎一・岸本貞男・安江朝光：岩盤の変形性についての二、三の考察，第2回岩盤力学に関するシンポジウム講演概要，pp.1~5，1963.11.