

平板載荷試験結果の評価における問題点と解析的検討

ANALYTICAL STUDY FOR SOME PROBLEMS ON THE EVALUATION OF PLATE LOADING TEST

赤木知之*・田野久貴**・森 孝之***・伊東 孝****

Tomoyuki AKAGI, Hisataka TANO, Takayuki MORI, Takashi ITO

On the plate loading test for rock mass, the test results are influenced by the size of loading plate, the state of restriction for surrounding rock mass and the state of loosening of rock mass under loading area. Therefore, it is very important to recognize the extent of influence of each factor.

In this paper, two case of numerical simulations for elastic models were performed for the purpose of examine the influence of loosening of rock mass and position of plate of loading. First model of rock mass is consisted of two layers that the upper layer is loosening rock and the under layer is intact rock. The results of numerical analysis for plate loading test were obtained for some kind of elastic properties and the thickness of loosening layer. On second model, the influence of the position of plate loading test in tunnel were examined.

1. まえがき

原位置岩盤を対象とする平板載荷試験において、得られる岩盤の弾性係数は、載荷面積、周辺岩盤の拘束の程度、試験箇所の岩盤のゆるみの状態、および、岩盤の割れ目や非弾性的性質の強さに影響を受けることが知られている。したがって、試験結果を評価する際には、これらの影響因子の状況を十分に把握し、それぞれの影響の程度を認識しておくことが重要である。

本論文では、岩盤を弾性体としたモデルに対していくつかの数値解析を実施し、これらの影響の程度を推察するための参考値を提供するものである。まず、平板載荷試験の対象岩盤をゆるみ域と健岩域からなる2層弾性体軸対称モデルとして数値解析し、ゆるみ層の厚さおよび弾性係数を種々変えた場合、得られる岩盤全体の弾性係数が如何に変わるかを図化して示している。

つぎに、平板載荷試験を横抗内で実施する際、目標とする対象岩盤に対する試験位置を必ずしも横抗の中央に取れず、側壁近くで試験を実施しなければならない場合が発生する。そこで、トンネル内での載荷位置を種々変えた場合の平板載荷試験の解析を、平面ひずみ問題に置き換えて実施し、結果を図化して参考値として提供している。最後に、載荷板の大きさが異なるいくつかの実際の試験例を調査し、寸法効果について議論するとともに岩盤の構造に対して載荷方向を変えた場合についての試験例も取り上げ、変形係数に対する異方性の影響についても考察を加えている。

*	正会員	工博	豊田高専	教授	環境都市工学科
**	正会員	工博	日本大学	教授	土木工学科
***	正会員		鹿島建設(株)		技術研究所
****	正会員	工博	豊田高専	助教授	環境都市工学科

2. 平板載荷試験における地表面沈下（解析）

平板載荷試験には、その載荷形式の違いによって2種類の方法がある。一つは、図-1に示す円形等分布載荷であり、もう一つは、図-2に示す円形等変位載荷である。半無限弾性体にこのような荷重が作用する場合の理論解は得られており、載荷中心の沈下量は次式で表される。

$$\cdot \text{等分布載荷の場合} \quad (u_z)_{r=0} = \frac{d(1-\nu^2)p}{E} \quad (1)$$

$$\cdot \text{等変位載荷の場合} \quad w = \frac{P(1-\nu^2)}{dE} \quad (2)$$

ここに、 d は円形載荷板の直径であり、 p は分布荷重圧、 P は載荷板への全荷重である。したがって、試験においてある荷重増分に対する沈下量が測定されると、上式によって岩盤の弾性係数が求められる。

ところで、式(1)と(2)による値を比較するために、全荷重を等しく P とすると、 $p=P/\pi(d^2/4)$ であるから、式(1)は次式となる。

$$(u_z) = \frac{4}{\pi} \frac{(1-\nu^2)P}{dE} \quad (3)$$

すなわち、 $(u_z)/w=4/\pi=1.273$ となる。

一方、載荷範囲外の地表面沈下の理論解も存在するが、式の展開が面倒であり、明快な式を検索することにも困難を伴うので、有限要素解析によって得られた沈下曲線を、等変位載荷による載荷板沈下 w に対する割合として整理した結果を図-3に示す。解析範囲は載荷板直径30cmに対して2.7m×2.7mである。図において、等分布載荷の全荷重は等変位載荷の場合と等しく P である。載荷面外の沈下量は等分布載荷より等変位載荷の場合の方が若干大きい。しかし、両者の沈下曲線の傾向はほぼ等しく、また、載荷板直径の6倍離れた位置でも影響が残っていることが分かる。しかし、実際の岩盤では、介在する不連続面によりそれほど応力は伝達されない。

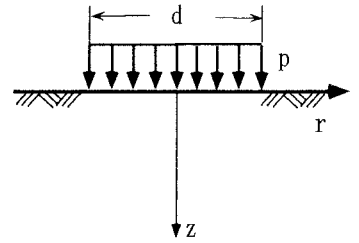


図-1 円形等分布載荷

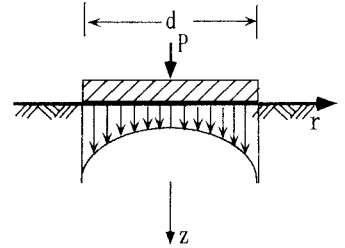


図-2 円形等変位載荷

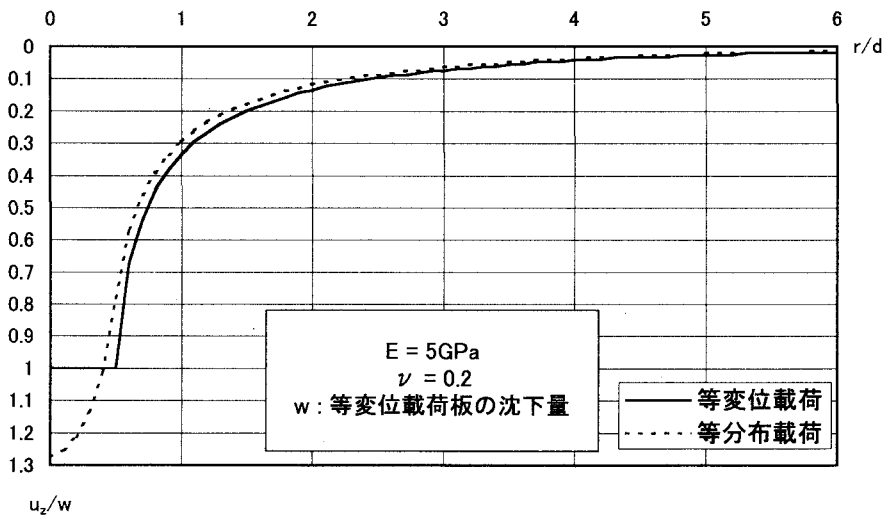


図-3 平板載荷試験における地表面沈下の有限要素弾性解析結果

3. 二層岩盤モデルに対して得られる見掛けの弾性係数（解析）

試験対象岩盤の表面に、ある厚さのゆるみ層が存在する場合を想定し、二層弾性体モデルに対して等変位

載荷条件で有限要素解析し、計算される沈下量から式(2)により岩盤全体の見掛けの弾性係数(E_t)を算定し、健岩層の弾性係数(E_R)に対する比(E_t/E_R)を弾性係数の低減率として纏めた結果を図-4(a)および(b)に示す。

図-4(a)は、ゆるみ層の弾性係数(E_r)を種々変えた場合の結果を、各種のゆるみ層厚別に示している。図によれば、ゆるみ層厚(h)が載荷板直径(d)の半分($h/d = 0.5$)で、ゆるみ層の弾性係数が健岩層の30%($E_r/E_R=0.3$)の場合、評価される見掛けの弾性係数(E_t)は、健岩層の50%を下まわるほどに低減している。また、ゆるみ層の厚さが載荷板の直径の1割程度としても、ゆるみ層の弾性係数が健岩層の5割であれば、岩盤の見掛けの弾性係数は健岩層の90%に低減している。

図-4(b)は、ゆるみ層厚(h)の変化を載荷板の直径(d)に対する比(h/d)で表し、その変化が見掛けの弾性係数の低減率(E_t/E_R)に如何に影響するかを、ゆるみ層の各種弾性係数(E_r)別に示している。図によれば、ゆるみ層厚が大きくなるに従い、岩盤の見掛けの弾性係数は、それぞれゆるみ層の与えた弾性係数に漸近していることが分かる。図では、 $h/d = 0.5$ までの結果を示しているが、理論的には $h/d = 2.5$ 程度でほぼ収斂する。

原位置岩盤での平板載荷試験が実施され、その結果を評価する際に、ゆるみ層の状態を推定できれば、これらの解析結果を参考にして、岩盤の弾性係数をより正確に評価できよう。

4. 横坑内の試験位置が及ぼす影響

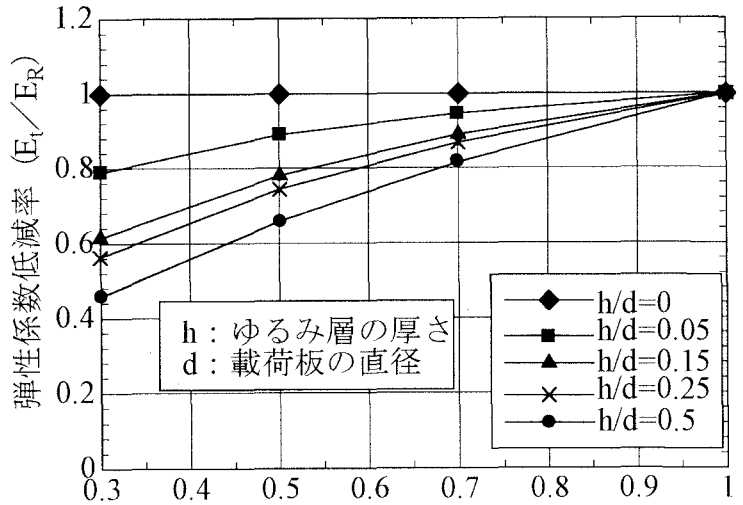
横坑内で平板載荷試験を実施する際目標とする岩盤の分布状態により、試験位置を必ずしも横坑内の中央に取れず、側壁近くで試験しなければならない場合がある。

そこで、図-5に示すように横坑内での試験位置を変えた場合に、評価される岩盤の弾性係数が如何に変わるかを、解析的に確認してみた。

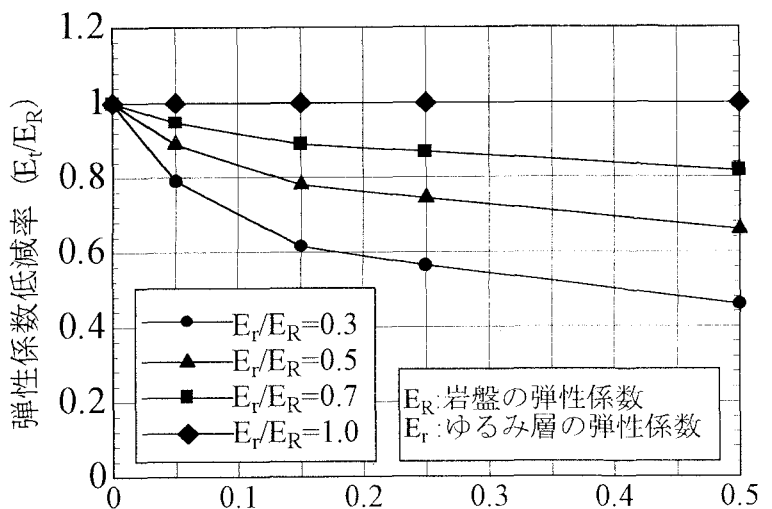
ただし、平板載荷試験は軸対象問題であり、トンネル断面は平面ひずみ問題となるので、現実的な解析は困難である。そこで、円形載荷を帯状荷重の載荷に置き換え、平面ひずみ問題として解析した。

解析結果は、弾性係数に変換せず各位置での沈下量が、トンネル中央での載荷に対する沈下量の何%になるかで側壁の影響を評価した。

解析範囲は、トンネル直径3.6mに対して24m×18mである。図-5にトンネル断面と載荷位置およびその他の諸



(a) ゆるみ層の弾性係数/岩盤の弾性係数 (E_t/E_R)



(b) ゆるみ層厚/載荷板直径 (h/d)

図-4 岩盤の弾性係数に対するゆるみ層の影響

データを示す。載荷位置は、載荷板直径に対する側壁までの距離の比 (l/d) で表し、トンネル中央で $l/d = 6.0$ である。もっとも側壁に近い所で $l/d = 0.5$ とした。

解析結果を図-6に示す。図の縦軸は中央での載荷に対する沈下量の割合である。沈下量の減少率がそのまま評価される弾性係数の増加率と見て良いであろう。結果によれば側壁までの距離が $l/d = 1.5$ で、約6%の影響値ということになる。因みに、解析断面の上部を除去し明かりでの載荷を想定した解析では、沈下量は5%増加した。

5. 載荷板の寸法の影響 (事例調査)

室内の強度試験等では、試験片の細長比を一定に保つても体積の増加につれて強度が減少することがしばしば観察されるが、これを一般に”寸法効果”と呼んでいる。この現象は強度特性のみならず、変形特性にも認められる。この現象の説明の一つとして、室内試験における強度などでは、試験片体積が増加すると内部の微視的クラックが増加することによる強度低下が挙げられている。現場においても載荷板の面積が大きくなると、圧力の及ぶ範囲が大きくなり、この範囲に含まれる割れ目数は増加する。

原位置の調査横坑では、さらに掘削によるゆるみ域が存在し原位置での寸法効果は室内試験より複雑なものとなる。載荷板の直径がゆるみ厚に比して小さい場合は、載荷板の変位はこの

ゆるみ域に吸収されて、反力としての荷重はその分増大しないため、変形係数は小さく評価される。したがって、載荷板の寸法が相対的に十分大きい場合は、変形特性は大きく観察されるから、強度などの寸法効果とは逆に、載荷板寸法の増加にともなって、変形特性は増加することとなる。例えば、図-4の数値実験の結果でこの評価を試みると、図-4(b)において、ゆるみ厚(h)が一定下で載荷板直径(d)を増加させることは、 h/d を小さくすることに対応するから、同図より岩盤の見掛けの弾性係数は載荷板寸法の増大とも増加することが分かる。例えば $E_r/E_R = 0.3$ の場合、 $h/d = 0.5$ から 0.1 と変化させる (載荷板直径を5倍とする) と、弾性係数は約35%程度増加することを示している。

また、寸法効果にはこれとは逆の解釈もある。すなわち、ゆるみ域が3次元的にばらついて分布しておれば、載荷板を大きくすることにより、圧力球根内にゆるんだ部分を含む確率が増加すると解釈され、弾性係数は減少することになる。以上は極めて限定した条件のもとでの解釈であるから、原位置の状態を考慮すると種々の寸法依存性が認められても不思議ではない。

図-7は二三の報告^{1)~3)}における変形特性をまとめたものである。変形係数の値は載荷板直径 $\phi = 30\text{cm}$ の結果に対する比で示した。記号の違いは試験箇所の違いを意味する。載荷板の直径の増大に対して、変形係

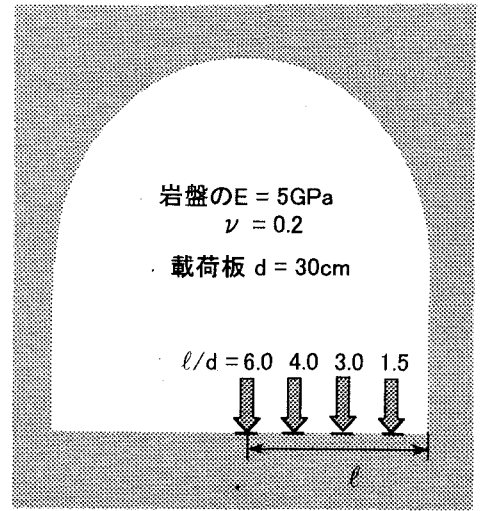


図-5 解析断面と載荷位置

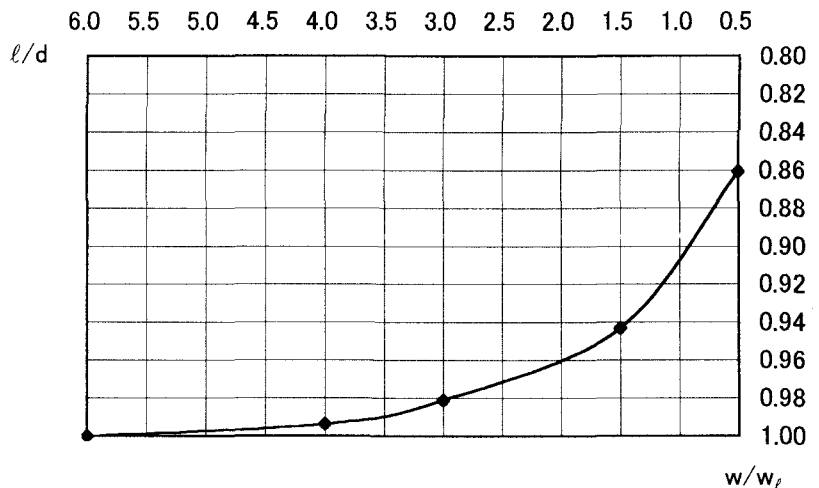


図-6 坑内における試験位置が結果に及ぼす影響

数が増加する例と減少する例が見られる。しかし、どちらかという増加する場合の方が多いうであり、 $\phi=80\text{cm}$ を越えるといずれも減少する傾向にあるようである

Heuze⁴⁾は、単なる載荷板の大きさではなくて、載荷応力の2%まで及ぶ応力範囲の岩盤の体積を試験体積と定義して、多くの現場の種々の変形特性や強度を整理し、載荷板直径が増加すると弾性係数は減少する傾向を示すとしている。

試験体積が増加すると一般に割れ目は増加するのでこれらの物性値はいくらでも低下することになるが、巨大な試験片による強度などでは、一定値に漸近するいわゆる寸法効果の飽和現象が観察される。変形特性においてもこのような現象が予想され、この値が岩盤の巨視的変形特性と考えられるものであろう。

6. 異方性の影響 (事例調査)

岩盤の示す異方性には堆積岩の層理や変成岩の片理と、割れ目の方向性の二つが挙げられる。これらの他に異方性の現れ方の程度は、構成岩石の硬軟によっても異なってくる。割れ目そのものも、方向性や密度の他に、表面の粗度の状態に起因する垂直剛性とせん断剛性の程度によっても異方性は変化する。これは類似の方向性を示す試験箇所で行っているにもかかわらず得られる変形特性がばらつくことの要因の一つとなろう。図-8は変形係数Dについて、割れ目や層理などの地質構造に直角な方向 (D_N) とこれらに平行な方向 (D_P)

に載荷した場合の変形係数の比 (D_P/D_N) を、 $\phi 30\text{cm}$ を基準として示している。割れ目あるいは層理の方向性に対する横坑の関係は図中に示してある。

謝辞：本報告における有限要素解析は、豊田高専環境都市工学科5年の江口 周君 (来年度から名古屋大学工学部社会環境工学科 社会資本工学コース3年編入予定) が行ったものである。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) 中部電力株式会社：浜岡原子力発電所原子炉設置変更許可申請書，1986。
- 2) 関西電力株式会社：大飯発電所原子炉設置変更許可申請書 (3,4号炉増設)，1985。
- 3) 北陸電力株式会社：志賀原子力発電所原子炉設置変更許可申請書 (2号原子炉の増設)，1997。
- 4) Francois, E. Heuze : Scale Effects in the Determination of Rock Mass Strength and Deformability , Rock Mechanics, Vol.12, 167-192, 1980.

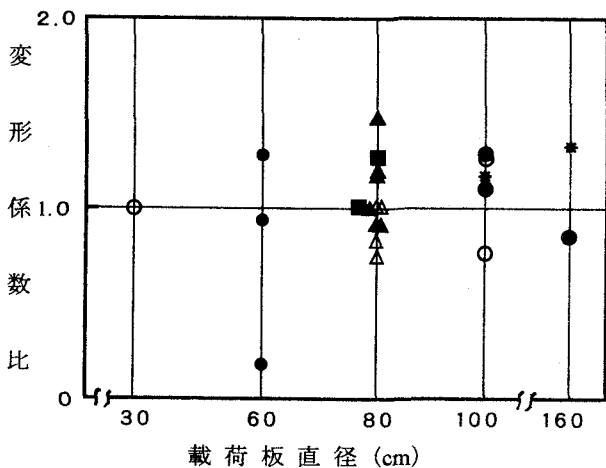


図-7 載荷板寸法と変形係数

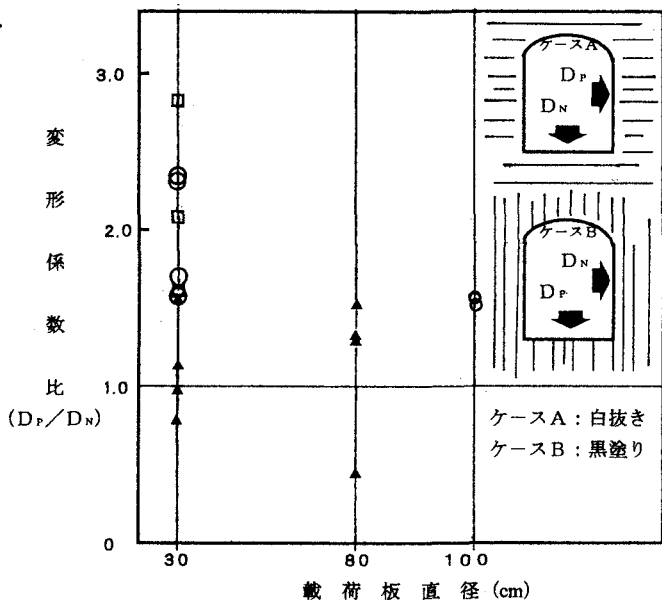


図-8 変形係数の異方性の影響