

互層堆積軟岩の変形・強度特性に及ぼす寸法効果に関する検討
STUDY OF SCALE EFFECTS CONCERNED WITH DEFORMATION AND STRENGTH
PROPERTIES ON LAYERED SEDIMENTARY SOFT ROCKS

仲村治朗*・河村精一**・村中 健二**

Jirou NAKAMURA, Seiiti KOUMURA and Kenji MURANAKA

Deformation and strength properties of foundation rocks were generally evaluated by means of in-situ rock tests. In this case it is necessary to confirm scale effects, that is, relations between loading plate size of in-situ rock test and real structure foundation size. Sedimentary soft rocks generally have less discontinuities and depend on the confined pressure. Therefore it is expected that characteristics of the confined pressure influence scale effects.

This paper discusses analyses of scale effects between loading plate size of in-situ rock test and real structure foundation size on layered sedimentary soft rocks based on numerical calculations.

Keywords : deformation and strength property, in-situ rock test, scale effect

1. まえがき

日本の海岸付近には新第三紀の堆積軟岩が分布しており、この堆積軟岩を基礎岩盤として、大型構造物が計画・建設されている。大型構造物基礎の設計を行う際には、支持力・沈下(変形)・すべりに関する検討が必要であり、このためには、基礎岩盤の特性を考慮して、適切な調査・試験を実施し、合理的で信頼性の高い変形・強度特性を把握することが重要である。基礎岩盤の変形・強度特性は一般に原位置岩盤試験により求められるが、この際に、原位置岩盤試験での試験体サイズと実構造物規模との関係を検討しておく必要がある。堆積軟岩は、一般に亀裂等不連続面が少なく均質であることから、亀裂等に起因する硬岩で観察されるような試験体サイズの寸法効果の影響は少ないと考えられるものの、拘束圧依存性等の特徴を持つ軟岩での寸法効果の影響が予想される。また、堆積岩は、互層構造を成す場合が多く、この影響で寸法効果が生じることが予想される。本検討では、泥岩・砂岩の互層からなる均質な堆積軟岩を対象として、原位置岩盤試験寸法と実構造物規模との寸法効果の影響を検討し、互層堆積軟岩における設計用の変形・強度特性を確認したものである。

2. 対象とした互層堆積軟岩の変形・強度特性

本検討で対象とした岩盤は、新第三紀の堆積軟岩¹⁾であり、泥岩と砂岩との互層を成す、亀裂などが少ない均質な岩盤である。試掘坑調査結果では、泥岩・砂岩の層厚は、それぞれ約8cm～30cmと約2cm～20cmであり、その平均層厚比は約4:1で泥岩優勢な互層である。

* 正会員 中部電力株式会社 土木建築部

** 正会員 中部電力株式会社 電力技術研究所

*** 正会員 日本原子力発電株式会社 開発計画本部土木建築部

基本的な物性として、拘束圧 0.0MPa の三軸圧縮強度（一軸圧縮強度相当）は、泥岩が 10.04MPa、砂岩が 3.20MPa である。泥岩・砂岩それぞれに対して圧密非排水条件の三軸圧縮試験を行った結果、変形特性については、有効拘束圧依存性が見られ、有効拘束圧とひずみの関数式として定式化できる²⁾。

互層岩盤の変形特性を把握するために、載荷板直径 30cm, 100cm, 160cm の 3 種類の岩盤変形試験（平板載荷試験）を実施した結果では、直径 30cm では割線弾性係数で 1300~1700MPa、直径 100cm では 1700MPa、直径 160cm では 1800MPa であり、載荷板径が大きくなるに従い、弾性係数がやや増加する傾向が見られた。また、節理、亀裂等の不連続面の少ない軟岩の場合、岩石の変形・強度特性を用いて、岩盤の変形・強度特性が模擬できるとされており³⁾、本対象地盤においても、岩盤試験を境界値問題として数値解析が行われ、良い整合が取れていることが確認されている^{2), 4)}。

3. 変形特性に関する寸法効果の検討

3.1 寸法効果の要因

直径 30cm, 100cm, 160cm の 3 種類の載荷板径による岩盤変形試験を実施した結果、径が大きい方が弾性係数も幾らか大きくなり、数値解析においても同様な傾向を模擬する結果となった。

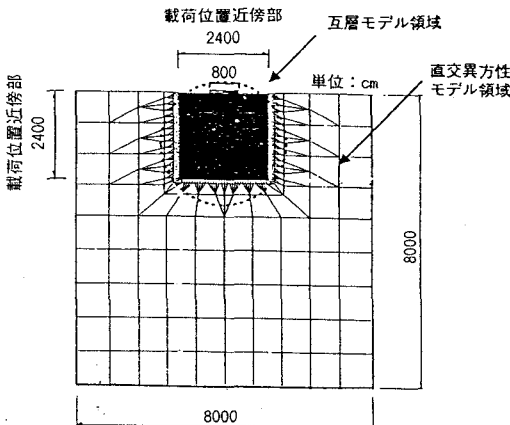
一般に、硬岩の場合には、岩盤としての特性は、節理・亀裂等の不連続面により規定される。載荷板に関する寸法効果という観点からは、載荷板寸法が大きくなる方が弾性係数・強度は小さくなる、あるいは結果のバラツキが小さくなると考えられる⁵⁾。これらは、載荷領域に含まれる不連続面の密度が一定とすると、載荷板が大きい方が載荷板に含む不連続面の個数が多くなることなどによると考えられる。一方、軟岩のように、工学的特性を把握する上では不連続面の影響は少ないが、有効拘束圧の影響を受けるような材料の場合、寸法効果の要因を別の観点から考察する必要がある。

ここでは、互層堆積軟岩における変形特性に関連があると考えられる寸法効果の要因として、(1) 載荷板近傍の互層構成の影響、(2) 深さ方向に弾性係数が増加する影響、(3) 掘削に伴う剛性低下領域の影響、の 3 項目を取り上げ、それぞれの影響度合いを数値解析により検討する。

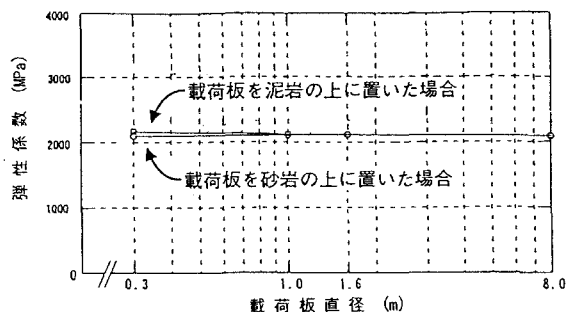
3.2 数値解析による寸法効果の検討

(1) 載荷板近傍の互層構成の影響

弾性係数の異なる泥岩層・砂岩層の 2 層から構成される互層岩盤においては、載荷板を泥岩層・砂岩層のどこに置くか、また、載荷板直下に含む砂岩層の数を変化させた場合にどの程度の影響があるのかを検討してみた。検討ケースとして、載荷板直径 30cm（泥岩層上に置いた場合、砂岩層上に置いた場合）、直径 100cm（直下に砂岩を 2 層含む）、直径 160cm（直下に砂岩を 3 層含む）、直径 8m（直下に砂岩を 16 層含む）の 5 ケースについて、線形有限要素法による岩盤変形試験の数値解析を行った。解析モデルとしては、図一に示すように、載荷板近傍部は泥岩・砂岩を忠実にモデル化し、その周辺の領域は直交異方性モデルとした。入力した泥岩層、砂岩層の弾性係数は、それぞれ約 3000MPa、約 400MPa とし、深度方向は一定とした。



図一 1 数値解析モデルの例（載荷板直径 8m）



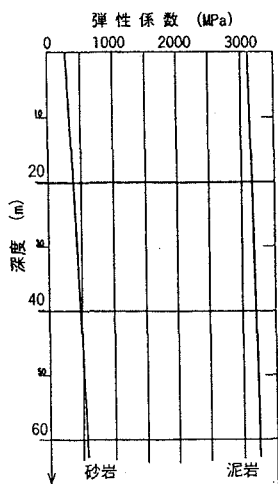
図一 2 互層構成の影響による載荷板径の寸法効果

解析結果を図一2に示す。解析上得られた弾性係数は概ね2100MPaであり、これは泥岩層と砂岩層との互層構成比(4:1)を反映した結果となっている。載荷板を泥岩層上に置いた場合と砂岩層上に置いた場合との弾性係数の差は小さく、また、載荷板径の違い(言い換えれば、直下に砂岩層を何層含むかの違い)による弾性係数の差はほとんど見られない。

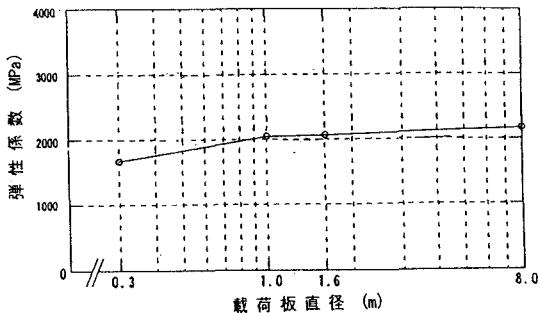
(2) 深さ方向に弾性係数が増加する影響

岩盤変形試験においては、載荷板径が大きくなると載荷荷重の影響範囲が深部に及ぶことになり、岩石の変形特性に有効拘束圧による依存性がある、深部ほど弾性係数が増加する場合には、試験結果に影響が予想される。この影響を検討するため、岩石試験から得られた有効拘束圧による依存性を表す変形特性を用いて、載荷板直径30cm,100cm,160cm,8mの4ケースについて、岩盤変形試験の数値解析を行った。解析モデルは、互層の構成比率を一定とした直交異方性体モデルにより全領域をモデル化した。入力した深度方向の泥岩、砂岩の弾性係数の分布を図一3に示すように、砂岩の弾性係数の増加割合が大きい。

解析結果を図一4に示す。解析結果では、載荷板径が大きくなるほど得られた弾性係数が幾らか増加する傾向にあり、また、径が大きくなるほど、弾性係数の増加割合は小さくなっており、影響度合いが小さくなっていることが確認できる。これは、載荷板径が大きい方が載荷荷重の影響範囲が深部に及ぶことにより、平均的に弾性係数の大きな地盤に載荷していることを示している。



解析結果では、載荷板径が大きくなるほど得られた弾性係数が幾らか増加する傾向にあり、また、径が大きくなるほど、弾性係数の増加割合は小さくなっており、影響度合いが小さくなっていることが確認できる。これは、載荷板径が大きい方が載荷荷重の影響範囲が深部に及ぶことにより、平均的に弾性係数の大きな地盤に載荷していることを示している。



図一4 深さ方向への弾性係数の増加による載荷板径の寸法効果

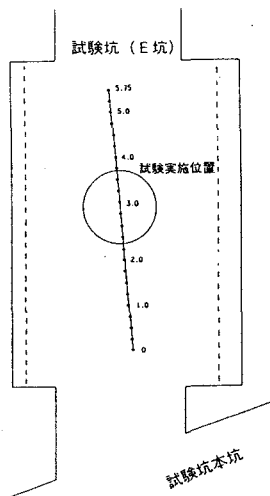
図一3 泥岩・砂岩の深度方向の弾性係数

(3) 掘削に伴う剛性低下領域の影響

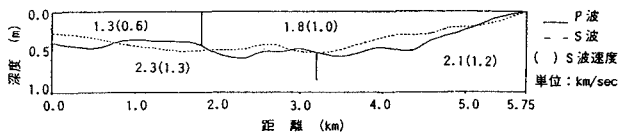
岩盤試験坑や実構造物基礎地盤の掘削を念頭に入れた場合、掘削による表層付近応力開放の影響及び不可逆的な塑性変形によるゆるみの影響により、試験載荷面からある深さまでは地盤の弾性係数が低下することが予想される。これは、掘削に伴い、地盤の剛性が低下している領域と地山の剛性と変わらない領域との2層構造が生じ、この剛性低下した層厚と載荷板径との寸法効果が考えられる。

そこで、地盤の剛性低下する層厚とその低下割合を、原位置弾性波試験により推定を行った。岩盤試験坑で実施した原位置弾性波試験の側線位置を図一5に、また、その結果を図一6に示す。この結果では、掘削面の表面近傍のS波速度は、概ね15%低下しており、剛性は速度の二乗に比例するため、25%低下していることになり、また、低下する層厚は概ね50cmである。このことから、剛性低下領域の弾性係数を健岩部の75%とし、その層厚を50cmと設定して、図一7に示すような深度方向の泥岩・砂岩の弾性係数を入力値として、同様に載荷板直径4ケースについて、数値解析を行った。

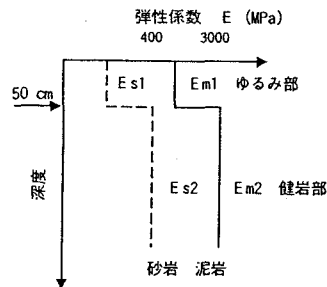
解析結果を図一8に示す。解析結果では、載荷板径が大きくなるほど得られる弾性係数が増加する傾向にあり、また、径が大きくなるにつれて増加割合は小さくなっていることがわかる。これは、径が大きい方が相対的に剛性低下領域を含む割合は小さく、影響度合いが少なくなるためと考えられる。



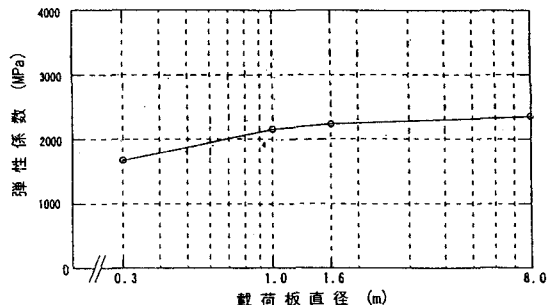
図一五 試験坑内での弾性波試験の測線位置図



図一六 深度方向の弾性波速度の分布



図一七 泥岩・砂岩の深度方向の弾性係数

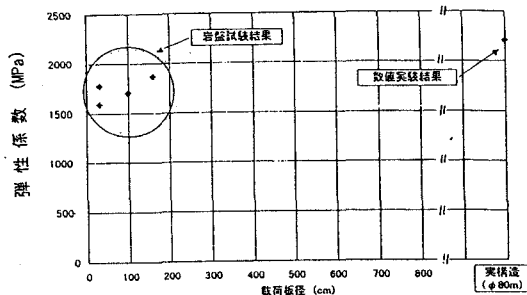


図一八 掘削に伴う剛性低下の影響による
載荷板径の寸法効果

(4) 大型構造物基礎地盤としての変形特性

以上から、互層堆積軟岩の変形特性に影響する寸法効果の要因として、深さ方向に弾性係数が増加する影響と掘削に伴う剛性低下領域の影響の2項目が提案できると考えられる。この2項目は、共に構成する岩石の拘束圧依存性に起因して生じる載荷板径の寸法効果と言える。今回対象とした互層堆積軟岩上の大型構造物基礎地盤の合理的な変形特性を設定するには、これらの寸法効果の影響を考慮する必要がある。

そこで、実際に、大型構造物として80mの大きさを想定し、上記の影響を含めて同様な数値解析を実施した。その解析結果を図一9に示す。載荷板直径30cm, 100cm, 160cmである岩盤変形試験結果は、1600~1900MPa程度であるのに対して、80mの実構造物レベルでは得られた弾性係数は2200MPaとなり、載荷板径に対して幾分右肩上がりの傾向が推定される。このことは、載荷板直径30cmでの標準的な岩盤変形試験結果が安全側の設計値であることを示している。

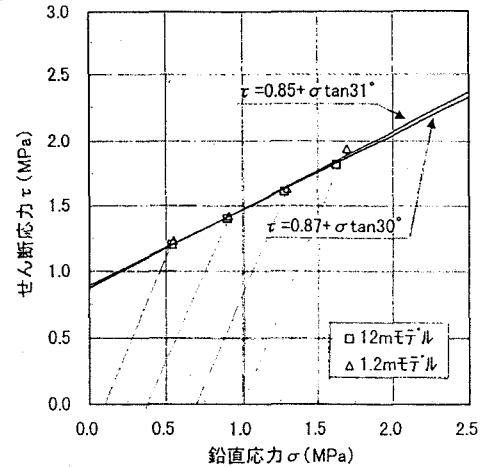


図一九 実構造物基礎(数値解析)での
基礎地盤の弾性係数

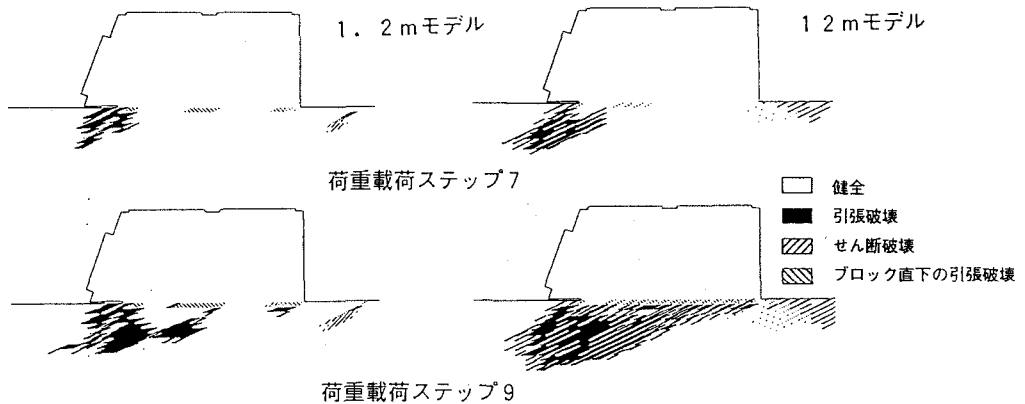
4. 強度特性に関する寸法効果の検討

岩盤せん断試験においても、標準的なコンクリートブロック寸法は60cmであるが、岩盤変形試験と同様な寸法効果が生じるのかどうかを、深さ方向に弾性係数・強度が増加する影響と掘削に伴う剛性低下の影響とを考慮に入れて、荷重増分法による非線形有限要素法の数値解析を実施し、検討を行った。検討ケースとしては、ブロック寸法1.2m(直下に砂岩層を2層含む)とその10倍のブロック寸法12m(直下に砂岩層を20層含む)との2ケースについて解析を行い、得られた強度・破壊モードについて比較した。

解析により得られた破壊進展図を図一10に、また、鉛直応力とせん断応力との関係を図一11に示す。破壊進展状況はほぼ相似形であり、ブロック前方では引張破壊が見られ、ブロック後方ではせん断破壊がみられる。また、せん断強度についてもほとんど差は無く、ブロック寸法による寸法効果は認められない。これは、今回の岩盤せん断試験が常時接地圧(0.49MPa)を事前に载荷したCUU条件に近い状態でせん断試験を行ったことから、前述の岩盤変形試験で見られた有効拘束圧の依存性による寸法効果の要因がないためと考えられる。また、破壊モードが岩盤表面付近の引張破壊・せん断破壊であることも関連していると思われる。これらのことから、標準的なブロックを用いた岩盤せん断試験より得られた岩盤せん断強度は、大型構造物基礎の底面すべりの検討において、適切な強度の設定であると考えられる。



図一11 鉛直応力とせん断応力との関係



図一10 岩盤せん断試験の数値解析による破壊進展図(鉛直応力0.39MPa)

5. 結論

互層堆積軟岩上に大型構造物基礎を設計することを念頭において、互層堆積軟岩の変形・強度特性に及ぼす寸法効果の影響(原位置岩盤試験寸法と実構造物規模との相違)を解析的に検討した。この結果、岩石の持つ有効拘束圧による依存性の特性から、変形特性においては、载荷板径(基礎幅)が大きくなると弾性係数が幾分大きくなる「右肩上がり」の傾向が認められた。この傾向は、一般的に亀裂性岩盤で認められる「右肩下がり」とは反対の傾向である。また、強度特性においては、ブロック寸法(基礎寸法)が大きくなっても有意なせん断強度の違いが認められず、寸法効果の影響が見られなかった。

6. 参考文献

- 1) 杉山雄一他: 御前崎地方の地質、地域地質研究報告、地質調査所、1988。
- 2) 河村精一、村中健二: 互層堆積軟岩を構成する岩石の変形特性のモデル化と岩盤変形試験のシミュレーション、地盤工学会、岩の一軸及び三軸圧縮試験の方法と結果の適用に関するシンポジウム、1998
- 3) 土木学会: 原子力発電所の立地多様化技術(追補版) 2.2.2 海底地盤調査技術の高度化、1999
- 4) 山本晴二、仲村治朗、宮池克人、水野直也: 互層堆積軟岩を対象としたブロックせん断試験などに関する2, 3の考察、電力土木、No.214、pp.75-85
- 5) Cunha.A.P.: Scale Effects in Rock Mechanics.proceeding of Scale Effects in Rock Masses.pp.3-27.1990