

京都大学大学院 学生会員 ○伊藤 悟郎
 京都大学工学部 正会員 吉田 信之
 京都大学工学部 正会員 柴田 徹

1. はじめに

本報では、偶応力を考慮できるコセラ連続体理論に基づく弾性有限要素法を用いて、堆積軟岩を想定した一層系および二層系モデル層状地盤の変形解析を行い、古典弾性理論との比較検討により偶応力が地盤の変形挙動に及ぼす影響について考察した。

2. コセラ弾性有限要素解析

コセラ連続体理論では、材料の変形は材料の微視構成要素の変形と回転により記述され、古典弾性体理論の応力に加えて偶応力も考慮される。ここで、材料の微視構成要素とは、多結晶構造材では結晶格子間隔、ブロック材ではブロック寸法、層状構造材では層厚であり、その大きさは対象材料の寸法に依存した相対的なものと考えられる。2次元等方弾性コセラ体の平面ひずみ条件における応力ひずみ関係は次式のように表される。

$$\begin{aligned}\sigma_{xx} &= (K + 4G/3)\gamma_{xx} + (K - 2G/3)\gamma_{yy}, & \sigma_{yy} &= (K - 2G/3)\gamma_{xx} + (K + 4G/3)\gamma_{yy} \\ \sigma_{xy} &= (G + Gc)\gamma_{xy} + (G - Gc)\gamma_{yx}, & \sigma_{yx} &= (G - Gc)\gamma_{xy} + (G + Gc)\gamma_{yx} \\ \mu_{xx} &= 4Glc^2\kappa_{xx}, & \mu_{yy} &= 4Glc^2\kappa_{yy}\end{aligned}$$

ここで、 K 、 G はそれぞれ体積弾性係数、せん断弾性係数である。また、 Gc 、 lc はコセラ弾性体特有のパラメータであり、 Gc は微視構成要素の回転の影響を含むせん断弾性係数（コセラせん断弾性係数）、 lc は特性長と呼ばれる長さの次元を有する材料定数である。両パラメータをゼロとすると、古典弾性体理論になる。コセラ弾性有限要素法の定式化は通常定式化手法に従い、仮想仕事の原理に基づいて容易にその剛性方程式が導かれる。

さて、ここでは半無限弾性地盤に 1MN/m^2 の等分布荷重 (P_0) が幅 ($2R$) 80m で帯状に作用する平面ひずみ問題を考える。地盤は、図1に示すように载荷中心軸を対称軸として深さ (H) 300m 、幅 (L) 400m でモデル化した。ガウス積分は 2×2 である。境界条件は、変位に関しては両側面を鉛直ローラー支持、底面を固定支持とし、また、回転に関しては左側面と底面で完全拘束とした。モデル地盤の体積弾性係数 K 、およびせん断弾性係数 G は堆積軟岩に相当する値としてそれぞれ 451MPa 、 173MPa と仮定した。また、二層系地盤の場合は、モデル地盤の地表面下 74m ($Z/R=1.85$) に層境界を仮定し、上半層の K 、 G は一層系の場合と同じ値を、下半層の K 、 G はそれぞれ上半層の2倍の値を用いて解析を行った。パラメータ Gc 、 lc については、それらの影響範囲を把握するために一層系地盤の場合表-1に示す1~4の4ケースを設定した。また、二層系の場合には表-2に示す4ケースについて解析を行った。

3. 解析結果と考察

ここでは紙数の都合上、得られた結果の一部のみを示す。まず、一層系地盤の場合であるが、図2に载荷幅中心線に沿った深さ方向の鉛直変位分布を示す。なお、縦軸は地表面からの深さ Z を R で無次元化し、横軸は鉛直変位量 V を地表面での鉛直変位量 $V_{\max}$ で無次元化している。また、図中には参考として半無限弾性体に関する理論解も示してある。まず、古典弾性体論に相当する $Gc=lc=0$ の結果と理論解とで、 Z/R が大きいところで差異が認められるが、これはモデル地盤の深さ方向の境界の影響によるものである。 Gc 、 lc のいずれかがゼロの場合 (○×□)、解析結果は一致している。他方、 Gc が無限大、 lc が層厚に等しい場合 (■) は、地盤浅部において変位量の著しい減少が認められる。また、地表面での鉛直変位量もかなり小さくなっている。図3は、载荷幅中心線近傍 ($X/R=0.106$) に位置する積分点での鉛直応力分布である。○×□の場合と比較して、■では鉛直応力が地盤浅部で著しく減少している。ここでは示していないが、■ではかなり大きな偶応力が生じており、また Gc 、 lc がそれぞれ増加するに従って、偶応力は増大し鉛直変位

Goro ITOH, Nobuyuki YOSHIDA and Toru SHIBATA

や鉛直応力は減少する。

次に、二層系地盤の場合の解析結果であるが、図4に載荷幅中心線に沿った鉛直変位分布を示す。上下層ともにコセラ弾性体とした場合(▼+)、どの深度でも変位量は古典弾性論に相当する解(●)よりも小さくなっており、▼の方が減少割合は大きい。□は上半層のみコセラ弾性体とした場合の結果であるが、上半層内では●よりも小さな変位量を示しているが下半層内では大きくなっている。なお、二層系地盤の場合については、変形挙動が各層の変形係数の相対的な大きさに著しく左右されるため、さらに解析を行い検討していく必要があると思われる。

4. おわりに

コセラ弾性有限要素法では、材料パラメータ G_c 、 l_c によって地盤材料の微視構成要素の影響、すなわち曲げ剛性を考慮することができる。本解析結果から、これらのパラメータ値が大きくなる程、偶応力の影響は大きくなり鉛直変位や鉛直応力は古典弾性体論から得られる値よりも著しく小さくなることがわかった。また、多層系地盤の場合には、各層の変形係数の相対的な大きさも含めたさらなる解析検討が必要であると考えられる。

表-1 1層系地盤の変形解析に用いた G_c 、 l_c

	1 (○)	2 (×)	3 (□)	4 (■)
G_c (MPa)	0	0	10^7	10^7
l_c (m)	10^{-5}	H	10^{-5}	H

H : 層厚(300m)

表-2 2層系地盤の変形解析に用いた G_c 、 l_c

		1 (●)	2 (▼)	3 (+)	4 (□)
上半層	G_c (MPa)	0	10^7	G1	G1
	l_c (m)	10^{-5}	H1	H1	H1
下半層	G_c (MPa)	0	10^7	G2	0
	l_c (m)	10^{-5}	H2	H2	10^{-5}

G1: 上半層せん断弾性係数(173MPa), G2: 下半層せん断弾性係数(346MPa)

H1: 上半層層厚(74m),

H2: 下半層層厚(226m)

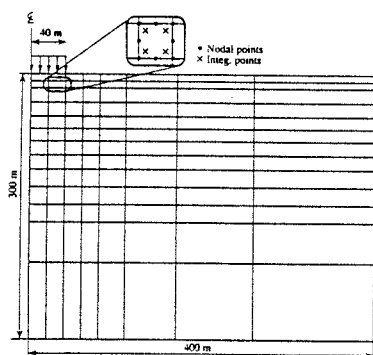


図1 モデル地盤の有限要素メッシュ

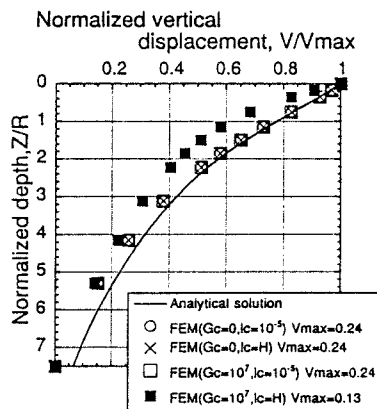


図2 載荷幅中心線に沿った鉛直変位分布

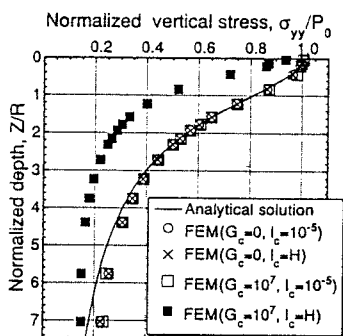


図3 載荷幅中心線近傍に沿った鉛直応力分布

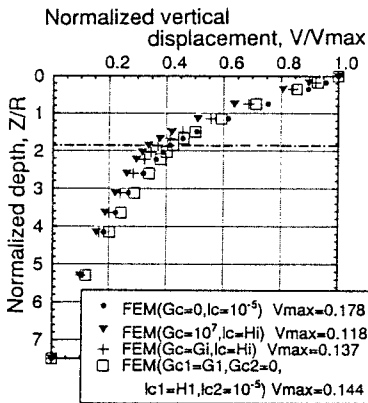


図4 載荷幅中心線に沿った鉛直変位分布