

前田建設工業株式会社技術研究所

正員

河原井 敏男

1. まえがき

ビオは3次元圧密の近似理論を構築するに際し、①土を弾性体とみなす、②間隙水の圧縮量を無視する、③ダルシーの法則が成立するなどの条件を前提としている¹⁾。

圧密が破壊的に進行し水みちが発生するなど①の条件と相違する状態の発生も想定されるが²⁾、ここでは弾性体の場合について②③の条件の適合性を検討する。

間隙水の圧縮量を無視しても初期状態の算定に関しては、体積ひずみ=0という初期条件を採用することにより大きな誤差は生じないが³⁾、排水の進行とともに体積ひずみが増大したり水圧分布に差が生じるにつれて、近似的規定条件を採用することによる誤差は顕著に現われるはずである。

一方間隙水圧は単なる外力と異なり圧力の発生に物体のひずみという内的条件が関係し、いずれの位置の水圧が確定するにも領域内全位置の状態量が関係する。

しかるにダルシーの法則の成立を仮定することは部分的に独立に体積ひずみが生じることを仮定することになるから、1次元圧密の場合を除いてはひずみの適合条件と抵触する。

ビオ理論では間隙水の圧縮を無視し、排水過程にある間隙水圧の規定条件として、代わりにダルシーの法則が成立するという条件を採用していることになる。

2. 多次元圧密における排水計算法

球形の弾性体内にある間隙水圧分布が存在しているとき、体積ひずみと間隙水圧の間には次式に示す関係が成立している⁴⁾。

$$e = \frac{p}{K_s} - \frac{1}{\lambda + 2G} \left[\sigma + \frac{2(1-2\nu)}{1+\nu} \bar{\sigma} \right], \quad \bar{\sigma} = \frac{3}{R^3} \int_0^R \sigma r^2 dr \quad (1)$$

ただし、 $K_s = \frac{E}{3(1-2\nu)}$, $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$, $\lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)}$

R: 球の半径 e: 体積ひずみ p: 荷重強度 σ : 間隙水圧 $\bar{\sigma}$: 平均間隙水圧

E: ヤング率 ν : ボアソン比 G: 剛性率 λ : ラメの定数 K_s : 体積弾性率

(1)式によれば隣接する2地点間の水圧差(動水勾配)に比例するものは、両地点間の体積ひずみの差のみであって、中心から当該地点までの体積収縮量の和すなわち流量(したがって流速)などとは直接関係しないのみならず、両者間に関係を規定すれば不都合が生ずる場合もあると予想される。

事実間隙水の圧縮を考慮した釣合計算³⁾を行なってみると、圧密の進行にともない各時点段階で、動水勾配と流速の間に比例関係が成立するような状態はつくり出すことが困難である。

普通は動水勾配に比し、中心部では相対的に大きく表殻部では相対的に小さなひずみ(流量)が出現する。

このことは(1)式からも看取されるところであり、(1)式によれば任意位置の体積ひずみには当該時点の平均水圧が関係しているから、表殻部の水圧低下によっても中心部の体積ひずみは増加しようとする結果、中心部では見かけの値以上に大きな動水勾配が存在することに相当し、表殻部ではその逆の傾向を示す。

クライヤーは球の圧密において初期に中心部の水圧が一旦上昇するという結果を得たが⁵⁾、それは(1)式において、平均水圧 $\bar{\sigma}$ の低下分に見合って中心部の体積ひずみを0に保持するような値である。

これは見かけの動水勾配を採用する結果、中心部では流量が生ぜざるべきことを規定されるがために生じたものと思われる。

クライヤーの計算によればボアソン比0.3(同論文では $\mu = 0.5$)のとき、圧密度が40%の時点までこ

の傾向が継続する。

しかし初期に表殻部に大きな動水勾配を仮定し、かつ動水勾配に比例した排水（現実には正しい比例状態はつくり出せないが）が持続するものとして間隙水の圧縮を考慮した排水計算を試みると、表殻部の水圧低下が急激すぎてやがて排水出口が閉塞されるかたちとなってしまう。

これを避けるためには、圧密度の進行（時間の経過）にともなう排水端の動水勾配のてい減度合を規制する必要があるが、その法則性は実験的に明らかにされるべき性質のもので、現在明らかにされていない³⁾。

そこで、間隙水圧と物体のひずみとの相関を無視すると水圧消散は熱伝導型の方程式にしたがうが、そのときの平均圧密度－時間関係が上記の場合にも成立すると仮定すると、排水端の動水勾配は各圧密度到達時間に逆比例することになり、上記意図にそう規定条件が得られる。

ただしこれだけでは第1段階の動水勾配が定まらないが、たとえばこれは、この値をあまり大きく仮定すると次の時点段階で表殻部の水圧が前時点段階の値よりも大きくなったりするから、それほど大きな範囲の値をとることはできない。

動水勾配－流速関係が各圧密度段階でほぼ同じようになるとすると、第1段階の水圧分布は比較的狭い範囲に限定されてくる。

各半径位置で動水勾配－流速関係がなるべく比例関係に近くなり、またその関係が各圧密度段階でなるべく変化が小さくかつ排水端の動水勾配が上記熱伝導型の圧密の所要時間に逆比例するように、状態変化を試行錯誤的に定めると、各時点段階で水圧分布は当該時点の平均圧密度に相当する平均水圧を中心に空間的にはほとんど変化しないことになり、球中心の水圧も単調に減少する結果となる。

一方平均水圧は蓄積されたエネルギーの指標でありその大小が状態変化の速度に影響するとみられるので、排水端の動水勾配が平均水圧の平方根に逆比例するとする計算も試みたが、ほとんど差のない結果を得た。

排水端の動水勾配が時間経過につれて減少し、かつ各半径位置での動水勾配－流速関係が各時点で変化しないことを仮定する限り、以上の結果に大きな差は生じないようである。

もし上記の推定が当を得たものであるとすると球形の弾性体においては、平均水圧に等しいほぼ一様な水圧を保ちながら圧密が進行する。

そのときは、ポアソン比0.3のときクライヤーの計算によれば中心部の水圧は1.2と平均水圧0.6の2倍になるから、ビオ理論は最大100%もの誤差を含むことになる。

またクライヤーの計算を支持するかたちとなったギブソンの検証実験⁶⁾は、再検討の必要がある。

球形の弾性体の内部に水圧が存在し表面では0であるようなときには、表部の物体に生じている半径方向圧縮応力と円周方向圧縮応力との間には、表殻部による中心部の締め付け作用の結果大きな差が生じるが、土がそのように大きな軸差応力のもとで弾性的に挙動するとは考えられない。

水圧分布の形状によっては表部の半径方向圧縮応力が既に荷重値に達しているとき、円周方向のそれはその $\frac{1}{2}$ 程度にとどまることがあることが、間隙水の圧縮を考慮した釣合計算³⁾を試みれば見出される。

参考文献

- 1) Biot : General theory of three-dimensional consolidation, J. Appl. Phys., Vol. 12, 1941
- 2) 河原井 : 圧密における水平方向排水の影響の程度, 第14回土質工学研究発表会, 64, 1979
- 3) 河原井 : 多次元圧密の初期水圧分布とその消散の算定法の一提案, 第17回土質工学研究発表会, 1982
- 4) 河原井 : 弾性体の3次元の圧密について(3), 第16回土質工学研究発表会, 55, 1981
- 5) Cryer : A comparison of the three-dimensional consolidation theories of Biot and Terzaghi, Quart. J. Mech. Appl. Math., Vol. 16, 1963
- 6) Gibson et al. : A critical experiment to examine theories of three-dimensional consolidation, Proc. Europ. Conf. Soil Mech., 1963