

# 非ダルシー流れを考慮した地盤の動的解析法の研究

岡 二三生\*

## 1. 研究の目的

礫など高透水性部を含む地盤の水の固相に対する相対加速度を無視した **u-p** (変位—水圧) 形式の動的解析では透水係数は大きくなると発散する例がみられる。本研究では、相対加速度を考慮した **u-w-p** (変位—相対変位—水圧) 定式化による 2 相系動的解析を、非ダルシー流れを考慮した方法で解析を行った。実験によればこの Darcy 流れの限界はレイノルズ数が 1-10 位である。準静的な浸透解析では、非ダルシー流れを考慮した解析が行われてきているが<sup>1),2</sup> 相系の動的解析での効果の研究は少ない。結論として、20 秒くらいの地震動継続中での効果は小さいが、液状化後の水圧消散過程ではより大きな影響が予測される。

## 2. 研究の方法

本報告では、本研究では、相対加速度を考慮した **u-w-p** (変位—相対変位—水圧) 定式化による 2 相系動的解析を、非ダルシー流れを考慮した方法で解析を行った。

## 3. 得られた成果

2 相系の動的解析では、相対加速度を無視した、固相加速度と間隙水圧を変数とする **u-p** 定式化が用いられることが多いが、解析計算には、固相の加速度、相対加速度、間隙水圧を独立変数とした **u-w-p** 定式化を用いた<sup>1),2),3)</sup>。現在配置を基準配置にとる updated Lagrangian 法による定式化を行っている。液相の運動方程式は以下のように記述できる。

$$n\rho^F(a_i^S + \frac{1}{n}a_i^R) = \Pi_{\mu,j}^F - R_i + n\rho^F b_i \quad (1)$$

ここで、 $n$  は間隙率、 $\gamma_w$  は水の単位体積重量、 $\rho^F$  は水の質量、 $a_i^S$  は固相の加速度、 $a_i^R$  は流体相との相対加速度項、 $v_i^S, v_i^F$  は固相、流体相の速度ベクトル、 $k$  は透水係数、 $b_i$  は物体力ベクトルである。さらに、 $a_i^R = n(a_i^F - a_i^S)$ 、 $v_i^R = n(v_i^F - v_i^S)$  は相対加速度、相対速度ベクトルである。 $R_i$  は液相と固相の相互作用項である。以下では、Forchheimer 則による非 Darcy 流れを考え、流れの方向を考慮し、この相互作用項を 2 次の項まで展開すると、

$$R_i = \frac{n^2 \gamma_w}{k} \left( (v_i^F - v_i^S) + h |v_i^F - v_i^S| (v_i^F - v_i^S) \right) = \frac{n^2 \gamma_w}{k} (v_i^F - v_i^S) \left( 1 + h |v_i^F - v_i^S| \right) = \frac{n^2 \gamma_w}{k} (v_i^F - v_i^S) h_{d(i)} \quad (2)$$

と一般化できる。ここで、 $h_{d(i)} = \left( 1 + h_p |v_i^F - v_i^S| \right)$  であり、(i) について総和規約は用いない。 $h_{d(i)}$  の計算では、相対速度は 1step まえの 8 節点の平方和の平均値を用いた。 $h_p$  は材料パラメータである。

---

\*京都大学・名誉教授

## 高透水部を含む地盤の解析<sup>6)</sup>

解析に用いた地盤モデルは参考文献 2) で用いたものである。構成式は、文献 4) の弾塑性モデルである。非ダルシー流れのパラメータ  $hp$  は吉岡ら<sup>5)</sup>による低レイノルズ域でのパラメータを参考に  $hp=100$  と決定した。入力地震動としては、1995 年ポートアイランド-32m での EW 成分（最大加速度:435.89gal）を用いた。計算での発散を回避するため、時間積分での Newmark の  $\beta$  法のパラメータは  $\beta=0.36$ 、 $\gamma=0.7$ 、計算時間は 0.02sec とした。高透水係数解析は 10cm/sec の高透水係数部を含む地盤は u-p 定式化の結果が u-w-p での結果と一致しないケースである。高透水係数部の透水係数を 10cm/sec とし、その他は 10-4cm/sec としている。高透水係数要素付近で間隙水圧が小さくなっている。すべての地盤で透水係数が 10-4cm/sec とした場合も解析を行った。 $hp=0$  の場合の計算は、 $hp=100$  としたケースと比べ水圧は数 kPa 小さかった。解析結果より、非ダルシー則の効果は、高レイノルズに対応する  $hp$  を使用した場合や液状化後の水圧消散過程でのより大きくなると推測される。

謝辞：議論いただいた（一社）LIQCA 液状化地盤研究所の開発グループに謝意を表します。

## 発表論文及び参考文献

- 1) 岡太郎、Forchheimer 則を適用した Confined Seepage (2) —河川構造物の浸透問題(2)—防災研究所年報, 133(B), pp. 147-159、1970.
- 2) 岡 他、相対加速度を考慮した有限変形液状化解析法。第 57 回土木学会年次学術講演会発表講演集、III-539, 2002.
- 3) Oka, F. et al., A liquefaction analysis method based on finite deformation theory using a cyclic elasto-plastic model for sand, Proc. WCCM V, Vienna, Australia, 2002,
- 4) Oka et al., Geotechnique, Vol. 49(5), pp. 661-680, 1999.
- 5) 吉岡& 登坂：高透水性多孔質体中の非ダルシー流れに関する考察，地下水学会誌, Vol. 52, No. 3, pp. 275-284, 2010.
- 6) 岡二三生、高透水性部を含む液状化性地盤の動的解析の計算について、第 80 回土木学会年次学術講演会発表講演集、III-355, 2025（発表予定）。