

清水建設	大崎研究室	正員	○ 近藤 司
同		正員	楠本 太
同		正員	渡辺浩平

1. はじめに

本報告は、地盤を土粒子骨格部分と間隙水部分の二相系でモデル化した時の相互作用(カップリング)について検討を行ったものである。地盤を二相系モデルで解析する場合、土粒子骨格と間隙水は透水係数、間隙率および体積変化などの地盤定数を介し相互に影響を及ぼす。よって、二相系地盤モデルの応答性状の把握のためには、土粒子骨格の応答と同時に間隙水の応答にも着目し、地盤定数がそれらの応答に及ぼす影響について検討しておく必要があると考えられる。

2. 支配方程式

二相系地盤モデルの支配方程式^{(1),(2)}は、下記のものとした。式-(1)、(2)の左辺第二項および式-(4)が、土粒子骨格部分と間隙水部分の相互作用の項である。なお、過剰間隙水圧は、土粒子骨格および間隙水部分の体積ひずみを用いて式-(4)により算定する。

$$(1-n)\rho_s u_{i,tt}^s + b(u_{i,t}^s - u_{i,t}^f) = \sigma_{ij,j} \quad (1)$$

$$n\rho_f u_{i,tt}^f - b(u_{i,t}^s - u_{i,t}^f) = -nP_{,i} \quad (2)$$

$$\sigma_{ij} = D_{ijkl} (u_{k,l}^s + u_{l,k}^s)/2 - \alpha \delta_{ij} P \quad (3)$$

$$-n\dot{u}_{i,i}^f = (\alpha - n)\dot{u}_{i,i}^s + \frac{1}{K_v} \dot{P} \quad (4)$$

ここで、添字 s は土粒子骨格部分、 f は間隙水部分を示す。 ρ は質量、 σ_{ij} 、 P は地盤応力、過剰間隙水圧、 b は Darcy' law より $b=n^2/k$ であり、 n は間隙率、 k は透水係数である。また、 K_v は体積圧縮係数である。 α は、土粒子骨格、間隙水などの体積圧縮に関わる定数である。

解析は式-(1)~(4)をガラキン法を用いて離散化し有限要素法により行った。なお、時間軸方向の数値解析はNewmarkの β 法を用いた。

3. 解析モデルおよび解析ケース

解析モデルは、図-1に示す飽和土柱地盤とする。地盤物性値は、土粒子骨格および間隙水の単位体積重量 γ は2.0, 1.0t/m³、ポアソン比 ν は0.4、間隙率 n は0.41、せん断波速度 V_s は150.0m/sとした。解析は透水係数をパラメーターとして地盤を排水状態($k=1.0^2$ cm/s)より、非排水状態($k=1.0^5$ cm/sec)までの3ケースとした。地盤は非圧縮性とし $K_v=1.0 \times 10^{10}$ 1/m²とした。また、入力地震波はEL-CENTRON-S成分、入力最大加速度は150galとした。

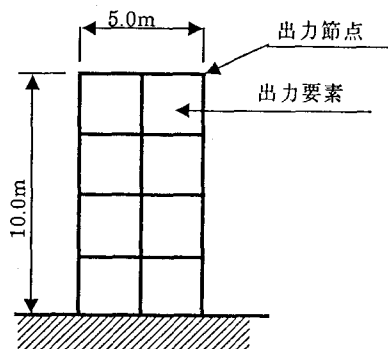


図-1 解析モデル

4. 解析結果

図-2に透水係数 $k=1.0^2, 1.0^{-1}, 1.0^{-5}(\text{cm/s})$ の土粒子骨格と間隙水部分の加速度波形を示し、表-2に最大値を示す。地盤が排水状態に近い透水係数 $k=1.0^2(\text{cm/s})$ の場合、骨格と間隙水に位相差が認められ、振幅についても、両者にかなりのの差異が認められる。しかし、透水係数 $k=1.0^{-1}, 1.0^{-5}(\text{cm/s})$ と地盤が非排水状態に近づくに従って、両相の周期、振幅とも一致する傾向を示し、透水係数 $k=1.0^{-5}(\text{cm/s})$ では骨格と間隙水は同位相、同振幅で振動している。また、この時、最大加速度は非排水状態に近づくに従って大きくなっている。これは、式-(1)、(2)の相互作用項から判断すればつぎのように考えられる。地盤が排水状態に近い場合、間隙水は比較的自由に動き、その結果骨格と間隙水に速度差が生じ相互作用項が減衰力として作用する。それに対し地盤が非排水に近い状態では、両相は同じ動きをすることにより相互作用項は無視できる値となる。よって、非排水状態の応答が排水状態の応答より大きくなる傾向を示したものと考えられる。また、透水係数 $k=1.0^{-5}(\text{cm/s})$ の応答波形は、ほぼ無減衰の振動性状を示している。

さらに、周期特性について検討するため、図-3に $k=1.0^2, 1.0^{-1}, 1.0^{-5}(\text{cm/s})$ の土粒子骨格の加速度波形のパワースペクトルを示す。なお、図中の太い実線は通常の運動方程式 $M\ddot{u}+c\dot{u}+ku=F$ により求めたものであり、 C はRayleigh減衰($\eta=5\%$)であり、数値解析は、同様にNewmarkの β 法を用いた。この図より、透水係数が小さくなる程、つまり非排水状態に近づくに従って地盤の振動周期が短周期側に移行していることがわかる。この原因として、ひとつには土粒子骨格と間隙水部分の相互作用により「見掛けの付加質量」の効果⁽¹⁾が考えられるが、この影響は小さいと推定されることより、振動周期が短周期側に移行する主な原因は透水係数による間隙水の拘束にあると考えられる。つまり、地盤が非排水状態に近づくに従って骨格は間隙水の動きを拘束することになり、その拘束効果が地盤の剛性を見掛け上高く評価していると考えられる。

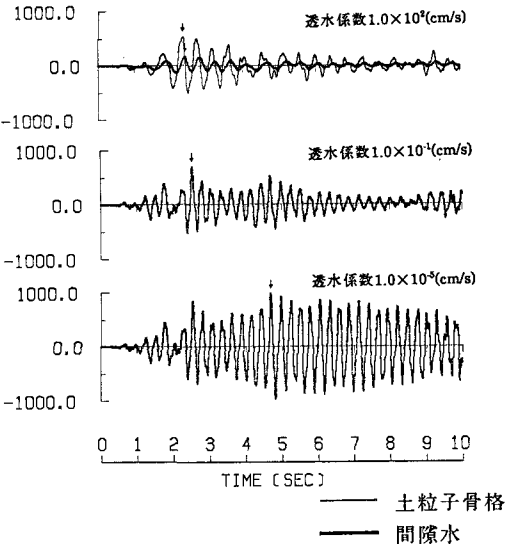


図-2 加速度波形(gal)

表-1 最大加速度(gal)

透水係数	1.0×10^2 (cm/s)	1.0×10^{-1} (cm/s)	1.0×10^{-5} (cm/s)
地盤モデル			
土粒子骨格	530.3	698.4	980.7
間隙水	160.6	697.6	980.7

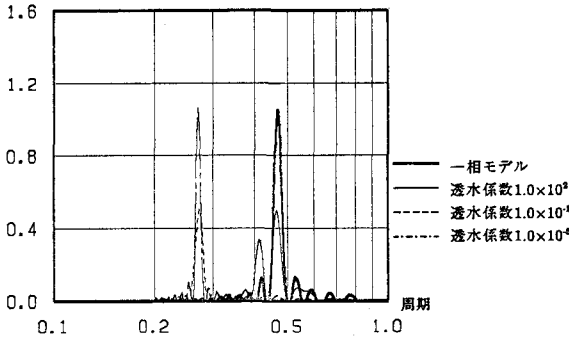


図-3 パワースペクトル

5. おわりに

二相系地盤モデルの相互作用について検討を行い、基本的特性を明らかにした。今後はそれらについて定量的な検討を加える予定である。

参考文献 (1)Biot,M,A,“Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid” J. Acoustic Soc.Am 28(2),pp168-170,1956. (2)Zienkiewicz,O,C et al,“Dynamic Behaviour of Saturated Porous Media” Int.J.for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics Vol.8,pp71-96,1984.