

細粒砂地盤の波による液状化に関する一実験

高橋 重雄*・鈴木高二朗**・姜 関 求***・常 数 浩 二****

1. ま え が き

近年、消波ブロックの沈下被災など、海岸構造物の被災の幾つかがいわゆる洗掘現象だけでなく、波による砂地盤の液状化によってもたらされると考えられるようになっており、計算によって液状化深度等を予測する試みもなされている（海岸工学委員会（1994））。しかし、現地で実際に液状化した地盤にブロックが沈下していく様子を直接見た例はなく、また、水路実験の例も意外に少なく、波による圧力と地盤変位、液状化の関係はあまり明確ではない。一方、細粒砂の地盤においては残留過剰間隙水圧を伴う地盤の液状化があることが指摘されている（前野ら、1990；Foda et al., 1991；Sekiguchi et al., 1995）が、著者らの予備的実験では波の繰り返し作用で地盤が締め固まり、その危険性は少ないことも考えられる。

本研究は構造物の沈下現象の解明という立場から細粒砂地盤の波による液状化に関する基礎的データを大型実験から得るものである。その際、波による液状化と地盤の強度の関係を詳細に調べるため、地盤下部から浸透流を作用させる実験も行っている。

2. 実験方法と実験条件

実験は、地盤層を設けた大型の造波水路で行っている。図-1は重複波を作用させた際の実験断面であり、進行波の場合はケーソンがない。地盤層は長さ6m、幅0.8m、深さ0.86m（一部の実験では深さ0.67m）で、層内には間隙水圧計を設置している。また、地盤表層から73cm下の位置に浸透流を発生させるパイプを設置している。パイプには水槽上部に設置したタンクから、タンクと水槽内の水位差による流れが供給されるようになっている。

砂地盤には比重2.64、中央粒径0.08mmで、細砂とシルトが混じりあった相馬8号珪砂を用いた。

実験は水深を0.344m、1.0mとし、周期を1.5s～3.5

s、波高を0.05m～0.5mまで変化させて行った。また、タンクと水槽内の水位差は0～200cmまで変化させ、地盤内に浸透流を作用させている。図-2は、締め固まった地盤に浸透流を作用させた時の砂層内浸透流速と動水勾配の関係である。水位差120cm（砂層内の動水勾配0.9）でボイリングが発生し、その後は流速が大きくなっている。

3. 緩い砂地盤の波による挙動

細粒砂の場合地盤が緩い状態と密な状態では波による挙動が大きく異なる。写真-1は地盤下部から浸透流を作用させて地盤を緩くし、水深 $h=34.4$ cmで周期 $T=2.36$ s、波高 $H=18$ cmの規則波を作用させた際の波と地盤の様子である。砂が重い流体のように大きく動き（全体的に液状化して）、全振幅約5cm程度で波打ち、上部の波より速い位相で岸向きに進行しているのが分かる。地盤の動きは上部の波にも影響し水路中央部では碎波も見られる。

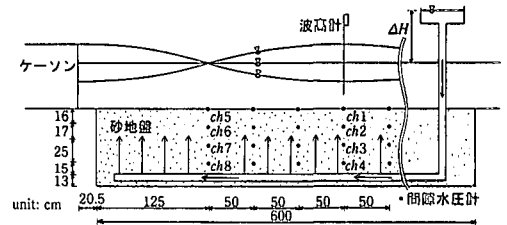


図-1 実験断面

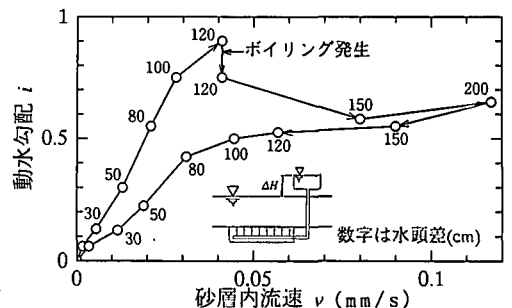


図-2 砂地盤内 流速-動水勾配

* 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所水工部耐波研究室長
 ** 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所水工部耐波研究室
 *** 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所特別研究員
 **** 正会員 運輸省港湾技術研究所水工部耐波研究室

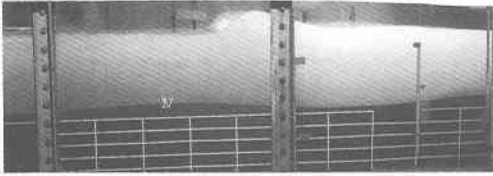


写真-1 進行波作用下での軟らかい地盤の動き

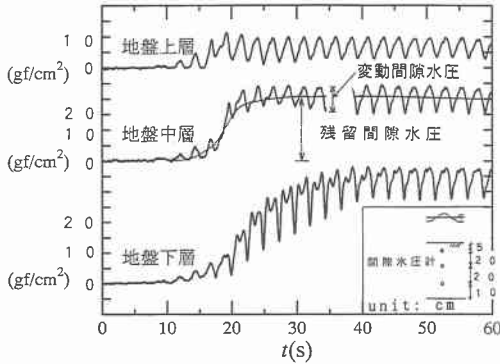


図-3 緩い地盤での間隙水圧時系波形

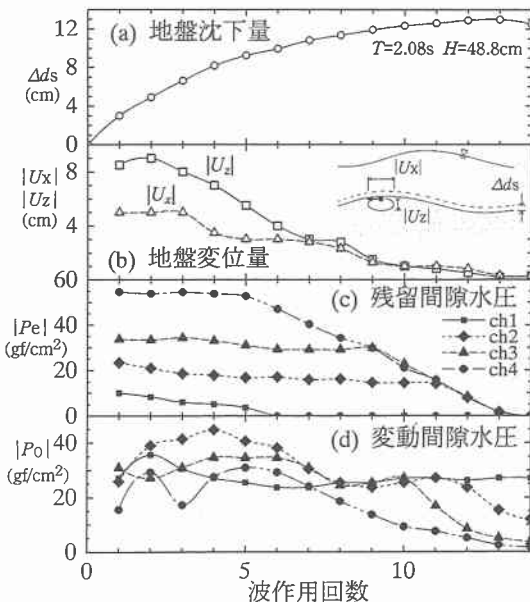


図-4 波の繰り返し作用による地盤の高密度化

一方、地盤内部では図-3 に示すように間隙水圧が上昇している。この圧力上昇分を残留間隙水圧、残留間隙水圧を差し引いた圧力変動分を変動間隙水圧と呼ぶ。地盤上層、中層、下層の残留間隙水圧はそれぞれ約 7, 25, 33 gf/cm^2 (1 $\text{gf}/\text{cm}^2 = 98 \text{ Pa}$) で、各間隙水圧計の上にある砂地盤の水中重量に相当している。

波作用直後にはこのような地盤下部に発生した残留間

隙水圧により上向きの強い流れが発生し、地盤表層に吹き上げる様子 (ボイリング) が見られる。残留間隙水圧はこのような上向き浸透流の発生で消散し、間隙水圧は波作用後 10 分程して波をかける前の静水状態になっている。

4. 波の繰り返し作用による地盤の高密度化

4.1 波の繰り返し作用による地盤の変化

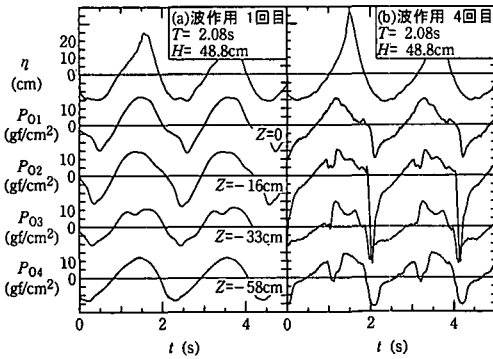
a) 地盤の沈下と変位

図-4(a)~(d) は、水深 $h=100 \text{ cm}$ 、周期 $T=2.08 \text{ s}$ 、波高 $H=48.8 \text{ cm}$ で造波時間 78 s の規則波を 10 分間隔で 14 回作用させた時の地盤沈下量 Δds 、地盤変位量 U_x , U_z 、残留間隙水圧 P_e 、変動間隙水圧 P_o の様子を示している。波の作用によって砂粒子間の間隙水が排水されて高密度化し (締め固まり)、地盤が 13 cm も沈下している。図-4(b) は地盤表面下部約 2 cm の位置での地盤の動きである。ここで、地盤の動きとは地盤表層の波の流れによる漂砂現象ではないことに注意を要する。地盤が緩い状態では地盤が波と共に波打ち、砂粒子は楕円運動をしているが、地盤が締め固まるにつれて砂の動きは小さくなる。しかし、完全に動きが止まるわけではなく、ある平衡状態に達して全振幅約 0.3 mm 程度で動いているようである。なお、波作用 14 回目になり、それまで地盤が軟らかくてできていなかった砂澁がようやくでき始めている。

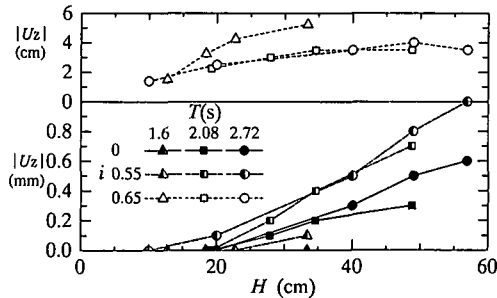
b) 間隙水圧の変化

図-4(c) は残留間隙水圧 P_e が波の作用回数が増えることと発生しなくなっていることを示している。すなわち、ch 4 では 5 回目、ch 3 では 9 回目、ch 2 では 11 回目から残留間隙水圧の発生が小さくなり始め、地盤下部から表層まで徐々に残留間隙水圧が発生しなくなり、締め固まりが進んでいる。なお、波作用 6 回目からは地盤上部に設置した ch 4 の値が 0 になっているが、これは地盤が沈下し、センサーが地盤表層から出たためである。

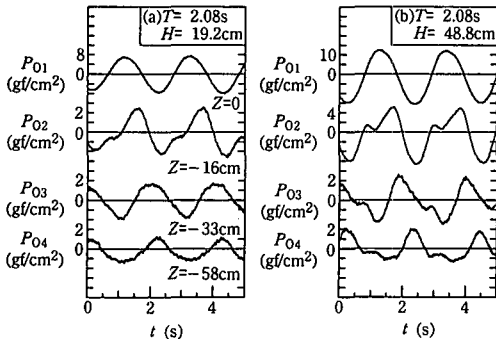
図-5(a), (b) は、波の変位と変動間隙水圧 P_o (間隙水圧 - 残留間隙水圧 P_e) の波形で、波作用 1 回目、4 回目の場合である。1 回目の波作用時には地盤上部から下部までほぼ同位相、同程度の大きさの圧力が発生している。3 回目の波作用時には波の谷の位相で大きな負圧 (ch 2 では約 $0.9 \mu\text{gH}$) が発生している。これはある程度締め固まった地盤に繰り返しせん断力が作用し、瞬間的に体積が膨張して負圧が発生したものと考えられる。図-4(d) に変動間隙水圧 (全振幅) の締め固まりに伴う変化を示すが、波作用 7 回目程度まで地盤内部の ch 2, 3, 4 の変動間隙水圧の方が地盤上部 ch 1 の変動間隙水圧より大きくなっているのはこのような負圧の発生によるものである。



図—5 高密度化に伴う変動間隙水圧時系列波形



図—6 締め固まった地盤での波による地盤変位



図—7 締まった地盤での間隙水圧時系列波形

こうした残留間隙水圧の発生はもちろん、砂の締め固まりや大きな負圧の発生もいわゆる「ダイレランシー」によって説明できる(石原(1976))。

4.2 締め固まった地盤の液状化

a) 地盤の変位

図—6 は、地盤表面下部 2 cm の位置での地盤の鉛直方向変位全振幅 $|U_z|$ と波高 H の関係であり、周期 $T=2.08$ s、波高 $H=48.8$ cm の波を繰り返し作用させ、地盤を十分締め固めた地盤条件で行った実験の様子である。図に示されるように波高、周期が大きいくほど地盤の動きは大きくなる傾向にある。さらに地盤下部から浸透流を作用

させて砂粒子の動きを計測しているが、やはり浸透流を作用させた場合には地盤の動きが大きくなっている。水頭差 ΔH が 200 cm の状態では波を作用させない状態から砂地盤はボイリングしている。この際には周期 $T=2.08$ s、波高 $H=48.8$ cm で直径 6 cm もの大きさで円運動をしている。

b) 間隙水圧

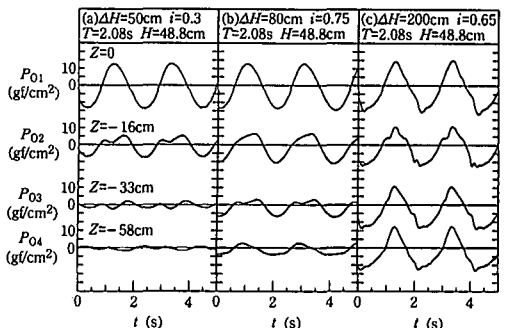
図—7(a), (b) は締め固まった地盤に波を作用させた場合の変動間隙水圧の時系列波形で、周期 $T=2.08$ s、波高 $H=19.2$ cm と 48.8 cm の場合である。なお、締め固まった状態では残留間隙水圧は発生しない。波高が小さい場合 ($H=19.2$ cm) には地盤表面 ch 1 の波形に比べ、地盤内の ch 2, 3, 4 の波形は位相が遅れて発生している。波高が大きくなると ($H=48.8$ cm) 地盤上層 ch 1 と ch 2 で負圧のピークが発生する位相が同じになる傾向がある。これは波高が大きく、発生するひずみが大ききときにはせん断弾性係数が小さくなり、液状化状態に近づくためだと思われる。

図—8(a), (b), (c) は地盤下部から浸透流を作用させた場合の間隙水圧波形で、水頭差 ΔH が 50, 80, 200 cm の条件である。なお、水頭差が 200 cm では地盤下部からの浸透流でボイリングが見られる。浸透流の圧力が大きくなるにつれ、変動間隙水圧の位相差が無くなるとともに、地盤下部まで変動間隙水圧が大きくなっていることが分かる。7. で後述するが、これは地盤が浸透流の圧力でさらに軟らかくなって全体に液状化していることを示している。

4.3 波の大きさと地盤の締め固まりの程度

以上のような波による締め固まりは、その程度と範囲が波の大きさで異なる。図—9 は地盤を緩い状態にして、波高、周期の小さな波を作用させて締め固めた後、さらに大きな波を作用させた際の残留間隙水圧の様子である。

周期 $T=1.6$ s、波高 $H=12.7$ cm の波(造波時間 90 s)では波作用 6 回目程度で安定な状態に達する。この時の



図—8 間隙水圧時系列波形(浸透流がある場合)

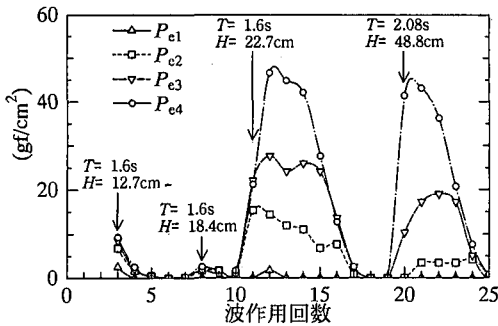


図-9 波の大きさと地盤の締め固まりの程度

波では地盤表層のみが動いて一旦締め固まった状態になる。その後、波高 $H=18.4$ cm の波を作用させると残留間隙水圧が若干上がるものの、地盤には大きな動きが見られなかった。さらに、波高 $H=22.7$ cm の波を作用させると、一回目の波を作用させ終わった直後、急に残留間隙水圧が上昇するとともに、地盤が全体に大きく動きだし、一旦締め固まった地盤表層部も破壊されて動くようになった。この波を更に作用させ締め固めた後、周期 $T=2.08$ s, 波高 $H=48.8$ cm の波を作用させると、また、地盤が大きく動き出し残留間隙水圧をともなって破壊した。これは小さな波で締め固まっていたのがある程度ひずみの発生していた地盤表層だけであり、それ以外は締め固まっておらず、さらに大きな波が作用すると締め固まっていないところでのひずみが大きくなって液状化するためと考えられる。

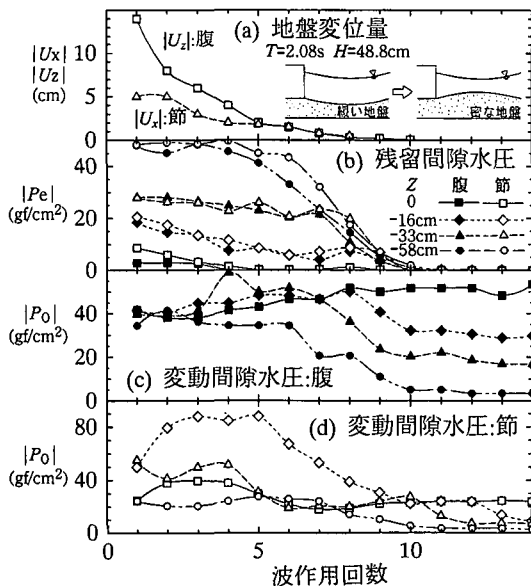


図-10 重複波浪場での地盤の高密度化

以前まで大きな波を受けていなかった地盤に大きな波浪が作用したり、防波堤を設置したために重複波となって波が大きくなるとこのような地盤の破壊が発生する危険性がある。

6. 重複波浪場での地盤の挙動

6.2 波の繰り返し作用による地盤の変化

図-10(a)~(d)は、ケーソンを設置した場合で緩い砂地盤に重複波を繰り返し作用させたときの地盤の変位、残留間隙水圧、変動間隙水圧である。進行波では砂粒子は楕円運動をしているのに対し、重複波では腹の部分で上下運動、節の部分で水平な動きをしている。また、図-10(a)に示すように地盤が軟らかい場合には全体的に液状化しており、重い液体のように波とほぼ同位相で動くのに対し、地盤が締め固まるにつれて位相が逆転するようになる。

また、節と腹では残留間隙水圧 P_e の発生に違いが見られないが、変動間隙水圧 P_0 は節と腹で異なり、特に節では全振幅で約 $1.7\rho gH$ もの圧力が発生している。

これは図-5(b)で既に示したようなダイレタンシーによる負の圧力のためであり、地盤の膨張、収縮だけが起きている腹ではこのような大きな負圧が発生していない。

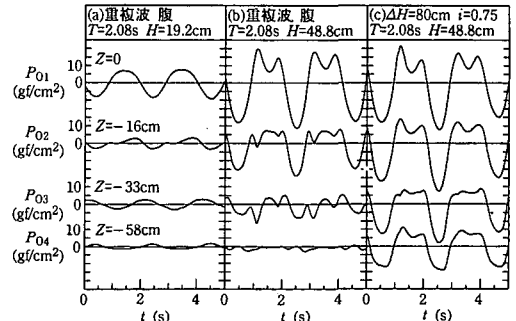


図-11 変動間隙水圧波形 (締まった地盤: 腹)

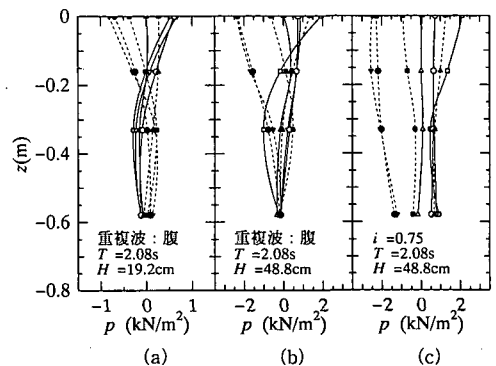


図-12 深さ方向圧力分布 (締まった地盤: 腹)

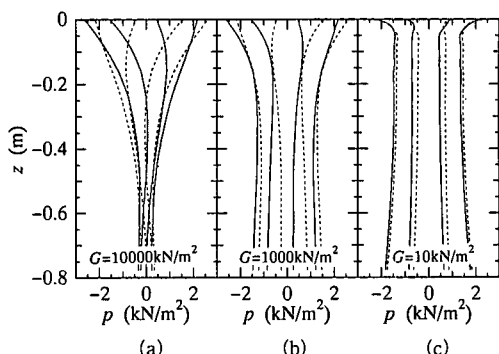


図-13 数値計算結果

6.2 締め固まった地盤での挙動

図-11は重複波の腹での間隙水圧波形で、周期2.08 s、波高19.2 cm、48.8 cmの場合である。波高が小さいときには圧力が深さ方向に位相差を持って伝達している。一方、波高が大きい場合は地盤表面に重複波特有の双峰型波形が見られ、また、地盤内部ではさらに非線形な波形が見られ複雑であるが、地盤表面(ch1)と地盤内(ch2,3)での間隙水圧が同位相で発生する傾向にあることが分かる。図-11(c)は地盤下部から水頭差 ΔH が80 cmの浸透流を作用させた場合で、地盤全体にほぼ同じ位相、大きさをもった間隙水圧が発生している。

図-12はこのときの深さ方向圧力分布である。波高が小さい場合と比較すると、波高が大きい場合(図-12(b))とさらに下から浸透流をさせた場合(図-12(c))で、負圧が働く際(波の谷時)の間隙水圧の位相、大きさが深さ方向で変化しなくなっている様子が分かる。

7. 数値計算による考察

数値計算は地盤部にBiotの式を用い、地盤部と波部で圧力と流速を接続させたFEM計算で行った(朴ら(1996))。図-13は、重複波の場合で周期2.08 s、波高48.8 cmでの腹の位置での数値計算結果であり、代表的な剪断弾性係数に対する間隙水圧の深さ方向分布を示している。計算では透水係数 $k=0.0001$ m/s、空気を含む水の体積弾性係数 $K_f=5000$ kN/m²としている。(a)は締め固まった状態で、ひずみが小さいため、 G が大きい場合(10000 kN/m²)に相当する。間隙水圧は地盤の深さ方向に位相差をもち、かつ減衰も大きい。一方、(b)はやや緩んだ状態($G=1000$ kN/m²)で、波高が大きく、ひずみが大きいために G が小さくなった場合である。さらに(c)は液状化した地盤($G=10$ kN/m²)に相当し、①もともと緩んだ地盤であったり、②浸透流によって緩んだ地盤となる場合である。このように剪断弾性係数 G を仮

定することで実験を再現できる。

8. まとめ

本実験で得られた主要な結論は以下の通りである。

① 緩い状態では、残留過剰間隙水圧を伴う液状化が発生する。

② ある波高の波を繰り返すと、地盤は次第に締め固まり、残留過剰間隙水圧による液状化は発生しなくなる。ただし、その波高以上の波を作用させると再び液状化して、また締め固まるというプロセスをとる。

③ ある波高の波で締め固まった地盤であっても、その波高が大きいと大きなひずみが発生し、そのひずみに対応してせん断弾性係数が小さくなり、見かけ上柔らかくなっている(液状化に近づく)。

④ いわゆる変動間隙水圧の圧力勾配による瞬時の液状化は、目視では観察されず、また間隙水圧の記録からも認められなかった。これは、大きな間隙水圧が発生するときには、ひずみが大きくなり、せん断弾性係数が小さくなって(見かけ上軟らかくなり)、地盤内の圧力の大きさや位相の差が小さくなるためである。

⑤ 注水して大きな浸透流の圧力があると、地盤が緩み液状化の状態となる。

謝辞：実験結果の解釈にあたっては普部長をはじめとする運輸省港湾技術研究所土質部、構造部の方々、京都大学防災研究所関口教授からご助言をいただいている。また、数値計算は韓国海洋研究所朴主任研究員(前港湾技術研究所客員研究員)が作成したものを使用している。

参考文献

- 石原研而(1976): 土質力学の基礎, 鹿島出版会, 303 p.
- 普 功企(1993): 海底地盤の波浪による液状化に関する研究, 港研資料, No. 755, 112 p.
- 高橋重雄・下迫健一郎・山本悟・三浦裕信(1994): 液状化した砂地盤の特性とそれによる消波に関する基礎実験, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 611-615.
- 土木学会海岸工学委員会(1994): 海岸波動, 第V編 波浪と海底地盤の相互干渉, 土木学会, pp. 430-510.
- 朴 佑善・高橋重雄・鈴木高二朗・姜 閔求: 波-地盤-構造物の相互作用に関する有限要素法解析(1996): 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 1036-1040.
- 前野賀彦(1990): 円心載荷装置による波浪を受ける海底地盤内応力場の再現, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 754-758.
- Foda, M. A., S. Y. Tzang, Y. Maeno (1991): Resonant Soil Liquefaction by Water Waves, GEO-COAST'91, Vol. 1, pp. 549-554.
- Sekiguchi, H., K. Kita and O. Okamoto (1995): Response of poro-elastoplastic beds to standing waves, Soils and Foundations, Vol. 35, 3, pp. 31-42.