

cm V, 駆動用モーター容量 11 kW の諸元をもつ中型装置である。この装置は、本来波浪を受ける海底地盤内の応力場を再現することを想定したものではないので、以下の工夫を行うことにより、波浪場を得た。それは、回転アーム中心部に設置されている傾斜用モーターを用いて 2 本の回転アームを平行にずらすことにより回転時に模型に対して遠心加速度に垂直方向に加速度を加えることができるので、この機能を用いて試料容器内の水位を変化させ、砂層内に過剰間隙水圧を発生させたことである。また、このような波浪による動的な間隙水圧応答を測定するためには、高い測定精度が要求される。従来の装置では回転アーム上にブリッジボックスを搭載し、スリッピングを通過した後に信号を増幅させていたが、これではスリッピング通過時の信号レベルとノイズレベルがほぼ同程度であるため、精度の良い電気測定が期待できない。そこで、本装置では回転アーム上に直接 24 ch 動歪増幅器を搭載しスリッピング通過前に信号を増幅して精度の良い電気測定を可能にした。

図-2 に示すように試料容器内に厚さ 10 cm の砂層を設け、その上に水深 5 cm の水をはり、100 G の加速度を与えながら水面変動を発生させる実験を行った。この実験条件は、砂層厚 10 m, 水深 5 m に相当するものである。この実験法の長所は、実海浜と同じ底質を用いて目的とする実験条件を小規模に造りながら実海浜の規模における現象を大型実験水路を用いることなく再現できることである。砂層模型には豊浦標準砂を用いた。表-1 に豊浦標準砂の物理特性を示す。試料容器内の砂層の密度は、使用した豊浦標準砂の乾燥重量と水置換により得られた厚さ 10 cm に対応する体積から乾燥試料密度 $\gamma_a=1.481 \text{ g/cm}^3$ と求めた。

波浪条件としては、まず造波水槽での実験が困難である長周期波浪を想定し、周期 20 秒・波高 2 m から 3 m の波を考えた。ここで、周期の値が大きいこれは遠心

表-1 豊浦標準砂の物理特性

比重, G_s	2.637
有効径, D_{10}	0.170 mm
中央粒径, D_{50}	0.208 mm
60%粒径, D_{60}	0.218 mm
均等係数, U_c	1.282
細粒分含有率, F. C.	0.0 %
最大間隙比, e_{max}	0.973
最小間隙比, e_{min}	0.609
最大乾燥密度, ρ_{max}	1.639 g/cm ³
最小乾燥密度, ρ_{min}	1.336 g/cm ³

载荷装置中で水面変動を発生されるときに制限によるものである。さらに、図-2 に示す試料容器内で波浪を発生させる装置を開発し、ガラス玉、鉛玉および比重の異なるピンポンボール大のモルタル球の沈下特性と砂層内間隙水圧変動との関係を検討した。

3. 実験結果と考察

(1) 長周期波浪の伝播特性

まず、実海浜の規模において波浪により引き起こされる間隙水圧変動がどの程度減衰するのかを確認するために、図-2 に示すように砂層内の各深度（6 点）において間隙水圧変動を測定した。また、砂層表面付近における液状化の確認のため砂層表面下 2 cm の間隙水圧変動に対応する土圧変動を同時に測定した。図-3 にそれらの間隙水圧変動と土圧変動の結果を示した。

それによれば、今回実験を行った周期 20 秒の水面変動に対しては、砂層内の間隙水圧は、ほとんど減衰することなく伝播し、砂層深度が深くなるに従ってわずかながら残留間隙水圧成分が発生している。そこで、図-4 に砂層内の間隙水圧変動の振幅の砂層深度による変化を示した。この図において砂層深度が増しても圧力の伝達率は 1.0 のままで、砂層内で間隙水圧が減衰しないことが確認できる。このことは従来から言われているとおり波の長周期成分の伝達率が大きいことを裏付けている。その消散が困難であれば、継続時間が増加するに従って残留間隙水圧成分が大きくなり地震時と同様のメカニズムによる液状化が発生する可能性がある。また、砂層表面付近における波圧と間隙水圧の圧力格差による液状化

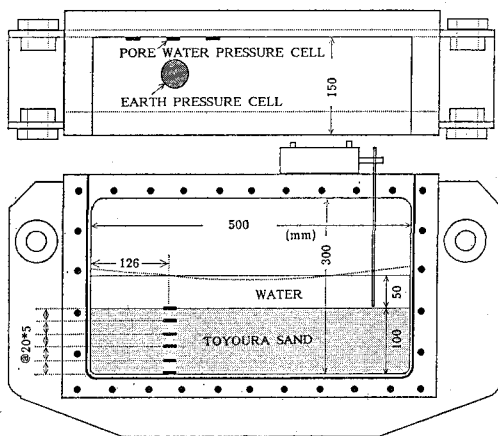


図-2 試料容器内の間隙水圧計と土圧計の設置状況

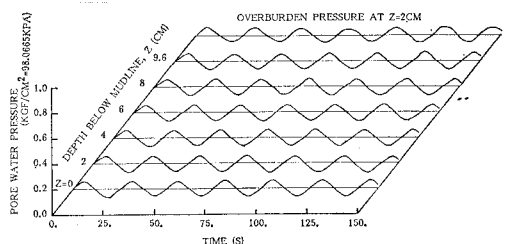


図-3 砂層内の間隙水圧変動

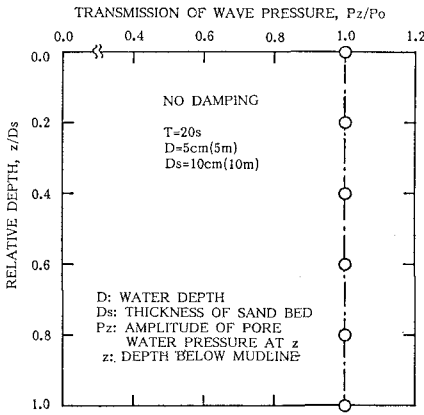


図-4 波圧変動の砂層中への伝達率

は、周期 20 秒では観測されなかった。この種の液状化は、著者が既に述べているとおり速い現象つまり短い周期で大きな波高の時に生ずることからすれば周期 20 秒は遅い現象であるので妥当な結果である。

さらに、比重 2.5 程度のガラス玉と比重 7.6 程度の金属玉を砂層表面に置き、その沈下特性を観察した。その結果によれば、両者とも顕著な沈下は認められなかった。このことも、砂層表面が長周期波で液状化しないことを裏付けるものである。

(2) 残留間隙水圧の発生

以上示したように長周期の波が作用した場合には、砂層表面の液状化が発生せず、構造物模型の沈下が認められないことから、より短い周期の波を作用させることができるように図-2に示すように試料容器の上に圧力変化によりストロークを発生させる装置を設置し、プレートを制御することにより周期 4 秒の波を発生させた。ただし、波を発生させる装置に大きな加速度が掛かると正常に作動しないことから、加速度は 50 G に制限したので実際には、水深 2.5 m 砂層厚 5 m に対応する模型となる。

この場合、作用させた波の数の効果を確認するために、50 回、100 回、200 回および 400 回の 4 ケースについて実験を行った。まず、波を 50 回作用させて測定した後に砂層表面を均し模型を設置し直し、次に波を 100 回作用させた。この作業を 200 回および 400 回についても繰り返した。これは、遠心载荷を中止すると残留間隙水圧が消散し元の状態に戻るため連続した測定ができないことによる。さらに、残留間隙水圧は造波時の間隙水圧 U_a と砂層表面設置の水圧計の 50 G 到達時の値 U_0 を用いて、次式で定義される累積値により整理した。

$$R = \frac{U_a - U_0}{U_0} \dots\dots\dots (1)$$

この累積値は、残留間隙水圧が上昇するに従って大きく

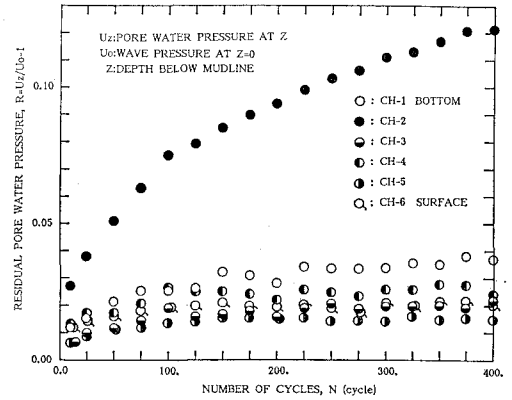


図-5 残留間隙水圧と波の数との関係

なるものである。

図-5 に累積値を用いて表される残留間隙水圧と波の数の関係を示した。それによれば、残留間隙水圧は波の数の増加に伴い増加しており、その傾向は波の数が大きくなると鈍くなっている。また、残留間隙水圧の上昇が最も多いのは砂層の底面から 2 cm のところである。全体的には、砂層表面付近では残留間隙水圧の増加はそれほど顕著ではなく、砂層深度が大きくなると残留間隙水圧の増加傾向が大きくなっている。それは、砂層表面付近では間隙水圧の消散が容易である一方砂層深度が深くなると過剰間隙水圧の消散は容易でないことによるものと考えられる。砂層底における残留間隙水圧がその 2 cm 上の値よりも小さい理由は、砂層底では金属面と砂の間に間隙が生じ易くその上の層に比べて比較的消散が容易であることによるものと考えられる。

さらに、図-6 から図-11 に砂層内の各深度における残留間隙水圧と波の数との関係を波の载荷回数の違いにより検討した。それによれば、全体的には波の载荷回数の増加に伴い残留間隙水圧は増加している。その傾向は、全载荷回数の少ない 50 回の場合に大きく全载荷回数的大きい 400 回の場合に小さくなっている。これは、50 回・100 回・200 回・400 回の順番で実験を行ったことから、砂層がそのたびに締め固まったことによるものと

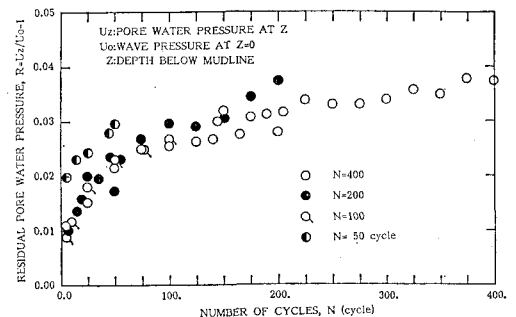
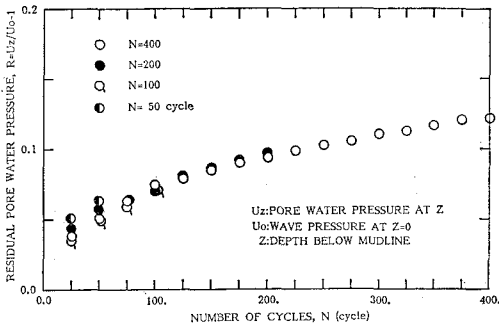
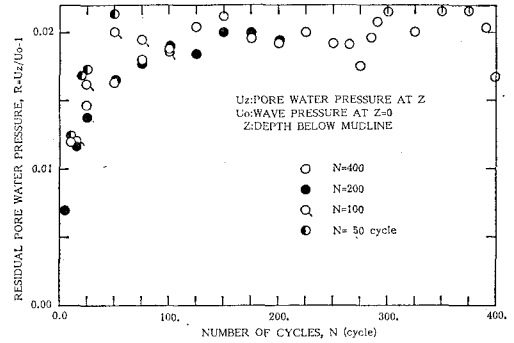
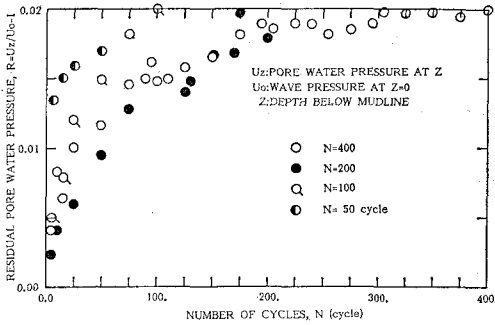
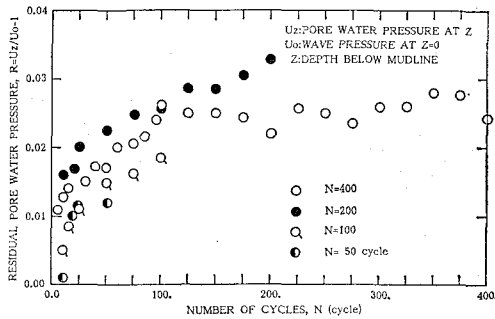
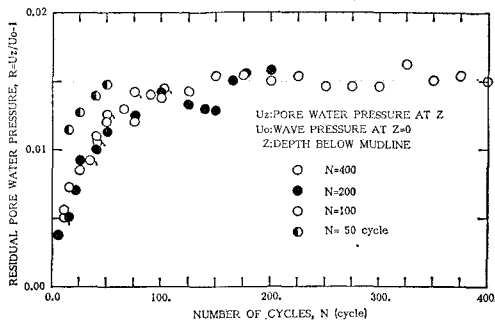


図-6 砂層底における残留間隙水圧と波の数との関係

図-7 残留間隙水圧と波の数との関係 ($z=8$ cm)図-11 残留間隙水圧と波の数との関係 ($z=0$ cm)図-8 残留間隙水圧と波の数との関係 ($z=6$ cm)図-9 残留間隙水圧と波の数との関係 ($z=4$ cm)図-10 残留間隙水圧と波の数との関係 ($z=2$ cm)

考えられる。ここで、砂層表面で測定した場合についても波圧ではなく間隙水圧として残留間隙水圧が波の数の増加に伴って観測されているのは、間隙水圧計を水平に設置し約半分が砂層中に埋もれていることと砂が舞い上がり一部埋もれることによる。

このように波浪の繰り返しによっても砂層地盤内に過剰間隙水圧が発生することが遠心荷装置模型試験により確認された。また、過剰間隙水圧は、波の载荷回数つまり波の数と密接な関係があり、波の数が増加するに従って過剰間隙水圧は増加する傾向にある。従って、暴風波浪が長時間に渡って継続する海岸では地震と同様の液状化が地盤内で起こることが充分予想される。

今回波を起こすために用いた装置は充分な波高を得ることが困難でどちらかと言うと水粒子の水平往復運動を発生させるものである。その結果、砂層表面には鉛直方向の圧力変動に加えて水平方向の圧力変動を及ぼしたと考えられる。その意味ではせん断の効果によって砂層内に過剰間隙水圧が発生したことになる。一方、大きな鉛直方向の圧力変動を作用させることができなかったため、善ら(1987)が報告している波圧変動と間隙水圧変動との圧力格差による液状化の再現には問題があり今後改善する必要がある。酒井ら(1989)は、無次元パラメータを用いて砕波帯内の有効応力ゼロ領域の推定を試み、通常の造波水槽における模型実験では波浪による砂層表層の液状化を再現することは困難であるとしているので、遠心荷装置模型試験によりそれを再現できるとすれば意義のあることである。

(3) 構造物模型の沈下特性

周期 20 秒の長周期波を作用させた実験においては有義な構造物模型の沈下が認められなかったが、周期 4 秒の波を作用させた実験においては構造物模型の沈下が認められたので以下に述べる。この実験では比重 2.5 前後のガラス玉 4 種と比重の異なるピンポン玉大のモルタル球 3 種の計 7 種の模型を用いて沈下特性を観察した。図-12、図-13 にガラス玉とモルタル球の沈下量と波の

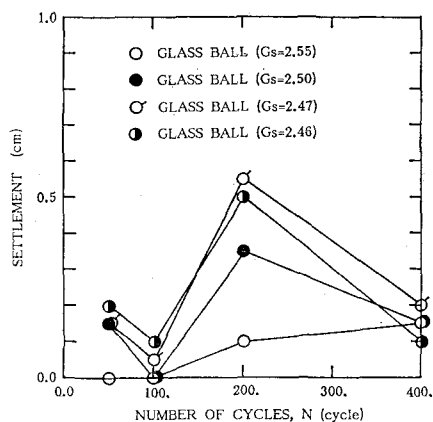


図-12 ガラス玉の沈下量と波の数との関係

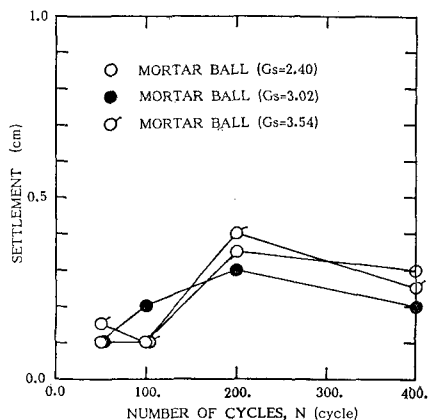


図-13 モルタル球の沈下量と波の数との関係

数との関係をそれぞれ示した。それによれば、波の載荷回数 200 回の場合に最も沈下量が大きくなっており、全体的に波の数の増加により沈下量が増加する傾向にある。波の載荷回数 400 回で沈下量が減少しているのは波の繰り返しのにより砂層が締め固まり沈下量が減少したものと考えられる。本来沈下量を連続的に測定すべきであるが、一度遠心載荷を中止して砂層を整え再度載荷をやり直したために同一条件での実験が行えていない。今回の結果からは、即断できないものの部分的には比重の重い模型の沈下量が大きくなっている。砂層の応力状態と密接に関係する沈下であるので、今後広範囲な比重の模

型を用いて沈下と砂層内の間隙水圧との関係を検討する予定である。

4. 結 論

以上の検討の結果、以下の結論が得られた。

- ①遠心載荷模型装置を用いることにより実際の海底地盤を想定した波浪による間隙水圧の発達特性を検討することが可能である。
- ②長周期波浪は砂層中で減衰することなく砂層中を伝播し、継続時間が長い場合には間隙水圧の残留成分が発達し液状化が発生する可能性がある。
- ③砂層表面付近での波圧と間隙水圧の圧力格差による液状化は長周期波浪では発生しないことが確認された。
- ④周期が比較的短い場合にも、砂層内に残留間隙水圧が発生し、それは波の数の増加に伴って増加する傾向がある。
- ⑤海岸構造物模型は波の載荷による過剰間隙水圧の増加に伴い沈下することが確認された。

謝 辞： 本研究は、文部省科学研究費国際学術研究（共同研究）No. 02044149（代表者：前野賀彦）の一環として行なわれたものであることを付記し、深謝の意を表する。

参 考 文 献

- 酒井哲郎・服部明彦・間瀬 肇 (1989)：波浪による碎波帯海底地盤の有効応力ゼロ領域の発生，海洋開発論文集，Vol. 5, pp. 79~84.
- 善 功企・山崎浩之・渡辺 篤 (1987)：海底地盤の波浪による液状化および高密度化，港湾技術研究所研究報告，第26巻，第4号，pp. 125~180.
- 前野賀彦・長谷川高士 (1984)：波浪による砂層内の間隙水圧の特性，第31回海岸工学講演会論文集，pp. 596~600.
- 前野賀彦・長谷川高士 (1985)：波浪作用下の海底砂層内に発生する間隙水圧の伝播特性，第32回海岸工学講演会論文集，pp. 75~79.
- Madsen, O. S. (1978)：Wave-induced pressures and effective stresses in a porous bed, *Geotechnique*, Vol. 28, pp. 377~393.
- Tsui, Y. and S. C. Helfrich (1983)：Wave-induced pore pressures in submerged sand layer, *Journal of GT Div., ASCE*, Vol. 109, No. GT4, pp. 603~618.
- Yamamoto, T., Koning, H. L. and E. Van Hijum (1978)：On the response of a poro-elastic bed to water waves, *J. Fluid Mech.*, Vol. 87, pp. 193~206.