

の遊水室長は、5cm～12cmの範囲で8段階に調節可能となっている。本装置を有効回転半径2.5mのビーム型遠心力载荷装置に搭載し、所定の遠心加速度を負荷した状態で造波実験を行った。その際、波圧変動と模型地盤の波浪応答を間隙圧計で測定するとともに、アーム下部に設置したビデオカメラを用いて液面変動を観測した。ビデオ画像は実験終了後、ビデオデジタイズボードを介してパーソナルコンピュータに取り込み、液面変動波形の特定に用いた。

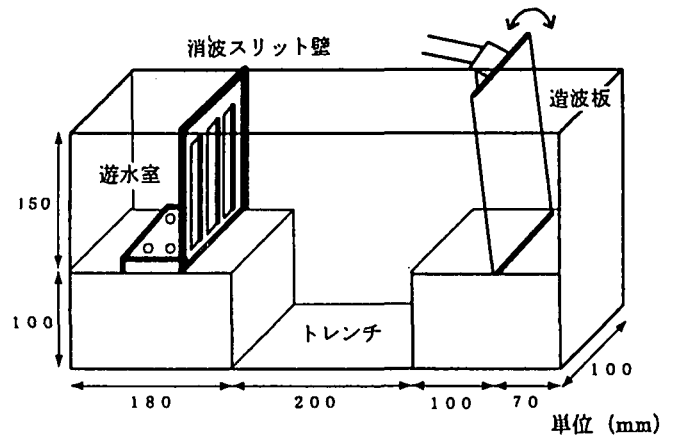


図-2 消波機構の概要図

3. 遠心力場消波実験

3.1 実験概要

流体として水、および水の50倍の粘性係数をもつシリコンオイルを用い、30gおよび50gの遠心力場において一連の造波実験を行った。波の反射率 K_R （入射波の圧力振幅 a_I に対する反射波の圧力振幅 a_R の比）に及ぼす液深や波浪周波数などの波浪条件、スリット開度や遊水室長などの消波機構の構造条件の影響を調べた。なお本実験においては、トレンチ部に密な砂を入れ、その上を水平なアルミ板で覆っている。スリット開度としては0.3と0.5、液深を6, 9, 11cm、波浪周波数を9, 10, 11Hz、また遊水室長を、6, 8, 10cmにそれぞれ変化させて消波実験を行った。間隙圧計を造波板から12cmの地点と28cmの地点（いずれも水路底面上）に設置し、計測液圧波形から消波スリット壁における反射率 K_R の値を算定した。

3.2 液圧波形を用いた反射率の評価

本装置により生成された波浪が規則的な正弦波であると仮定すると、進行波（すなわち造波板から消波壁の方向に伝播する波）の振幅 η_I と後退波（すなわち反射波）の振幅 η_R をそれぞれ、次のように表すことができる。

$$\eta_I = a_I \cos(kx - \omega t + \varepsilon_I) \quad (1)$$

$$\eta_R = a_R \cos(kx + \omega t + \varepsilon_R) \quad (2)$$

ここに k は波数、 ω は円振動数、 a_I は進行波の圧力振幅、 a_R は反射波の圧力振幅、 ε_I は進行波の位相、 ε_R は後退波の位相である。

流体圧の計測2地点の造波板からの距離をそれぞれ、 X_1 （センサNo.1）および $X_2 = X_1 + \Delta \ell$ （センサNo.2）とおく。ここに、 $\Delta \ell$ は2計測点間の距離である。これら2点における液圧変動は、進行波による圧力変動と後退波による圧力変動の和で与えられるので、次式が成立する。

$$\eta_1 = (\eta_I + \eta_R)_{x=X_1} = A_1 \cos \omega t + B_1 \sin \omega t \quad (3)$$

$$\eta_2 = (\eta_I + \eta_R)_{x=X_2} = A_2 \cos \omega t + B_2 \sin \omega t \quad (4)$$

ここに、 η_1 は $X=X_1$ における液圧変動、 η_2 は $X=X_2$ における液圧変動である。式(1)～(4)を a_I および a_R について解くと、次のようになる³⁾。

$$a_I = \frac{1}{2|\sin k\Delta \ell|} \{ (A_2 - A_1 \cos k\Delta \ell - B_1 \sin k\Delta \ell)^2 + (B_2 + A_1 \sin k\Delta \ell - B_1 \cos k\Delta \ell)^2 \}^{1/2} \quad (5)$$

$$a_R = \frac{1}{2|\sin k\Delta \ell|} \{ (A_2 - A_1 \cos k\Delta \ell + B_1 \sin k\Delta \ell)^2 + (B_2 - A_1 \sin k\Delta \ell - B_1 \cos k\Delta \ell)^2 \}^{1/2} \quad (6)$$

その結果、反射率 K_R は直ちに次式によって算定することができる。

$$K_R = a_R / a_I \quad (7)$$

さて、式(5)及び式(6)において $\Delta \ell$ は流体圧の計測2点間の距離であり、既知量である。振幅パラメータ A_1 、 A_2 、 B_1 、 B_2 についてはこれら2点における計測流体圧変動より決定することができる。具体的には、本研究ではこれら4パラメータの決定に際し、2地点における実測波形をカットオフ周波数50Hzのローパスフィルターに通した後の波形を用いている。また波数 k については微小振幅波理論の分散関係に基づいて、各波浪実験における液深、波浪周波数および重力加速度の値を代入することにより、その値を求めている。

3.3 実験結果

流体として水を用いた場合の結果をまず紹介する。遠心加速度50g、水深11cm、波浪周波数9Hz、スリット開度0.3、遊水室長6cmの場合における、センサNo.1及びセンサNo.2で計測された流体圧の時刻歴を図-3に示す。図中の実線は実測圧力変動を、また点線はフィルタリング後の圧力変動波形を示している。同図中のフィルタリング後の波形より、2計測点における液圧波形の位相ずれは小さいのに対し、振幅は大きく異なっていることがわかる。この場合、式(7)により算定反射率は、 $K_R = 0.8$ であった。

ビデオ画像より読み取った、互いに異なる3位相での液面形を図-4に示す。同図よりセンサNo.1とNo.2のほぼ中間において液面変動の節点が発生しており、重複波的であることがわかる。

次に、流体としてシリコンオイルを用いた場合の結果について述べる。遠心加速度50g、液深6cm、波浪周波数11Hz、スリット開度0.3、遊水室長10.0cmの場合における、センサNo.1およびセンサNo.2での計測液圧変動の時刻歴を図-5に示す。両地点におけるフィルタリング後の液圧波形を比較すると、位相は約140度ずれているのに対し、振幅はほぼ等しい。本ケースにおいて、圧力変動より算定した反射率の値は $K_R = 0.14$ と小さく、進行波的な波浪が生成されているといえる。

実際、異なる3位相における液面形に着目すると、上述の $K_R = 0.8$ の場合とは明らかに異なる形で波形が推移している様子がよくわかる(図-6参照)。

スリット開度0.3の消波壁を用いて行った一連の波浪実験の結果に基づいて、波の反射率 K_R と波長に対する遊水室長の比 ℓ/L の関係をまとめて図-7に示す。図中の○印と●印は50gの遠心力場における実験結果を、□印と■印は30g場における実験結果を表している。また白抜き印(○、□)は、流体として水を用いた場合の実験結果を、黒塗り印(●、■)はシリコンオイル(50cSt)を用いた場合の実験結果を示している。同図より、波浪条件や構造条件が異なる場合にも、反射率 K_R と波長に対する遊水室長比 ℓ/L の間には強い相関関係のあることがわかる。特に注目すべきことは、 $\ell/L = 0.2 \sim 0.25$ において反射率が極小となっていること、またその極小値が0.15程度と小さく十分な消波効率を表して

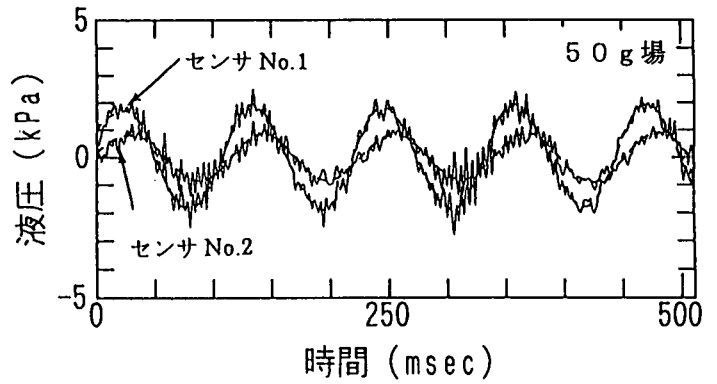


図-3 液圧波形 (反射率大)

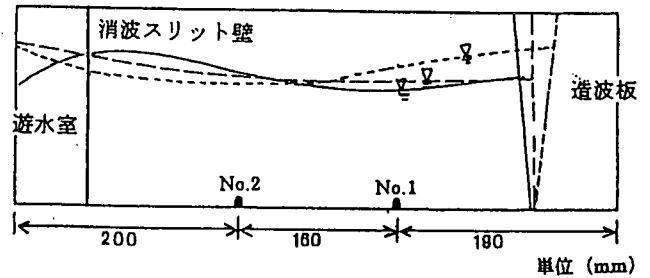


図-4 液面形 (反射率大)

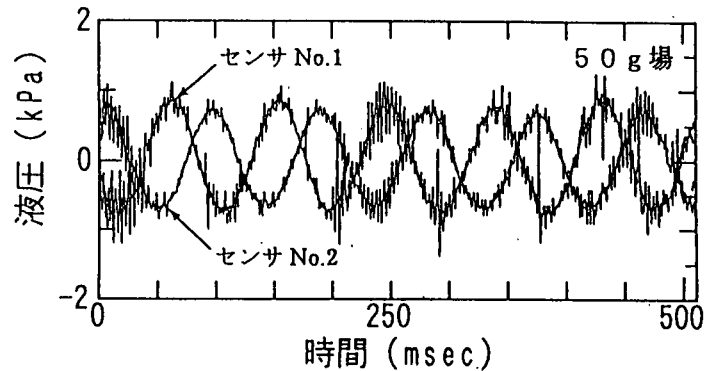


図-5 液圧波形 (反射率小)

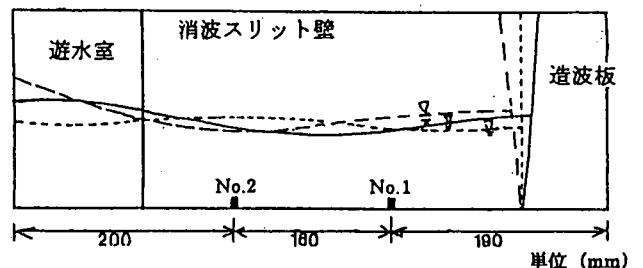


図-6 液面形 (反射率小)

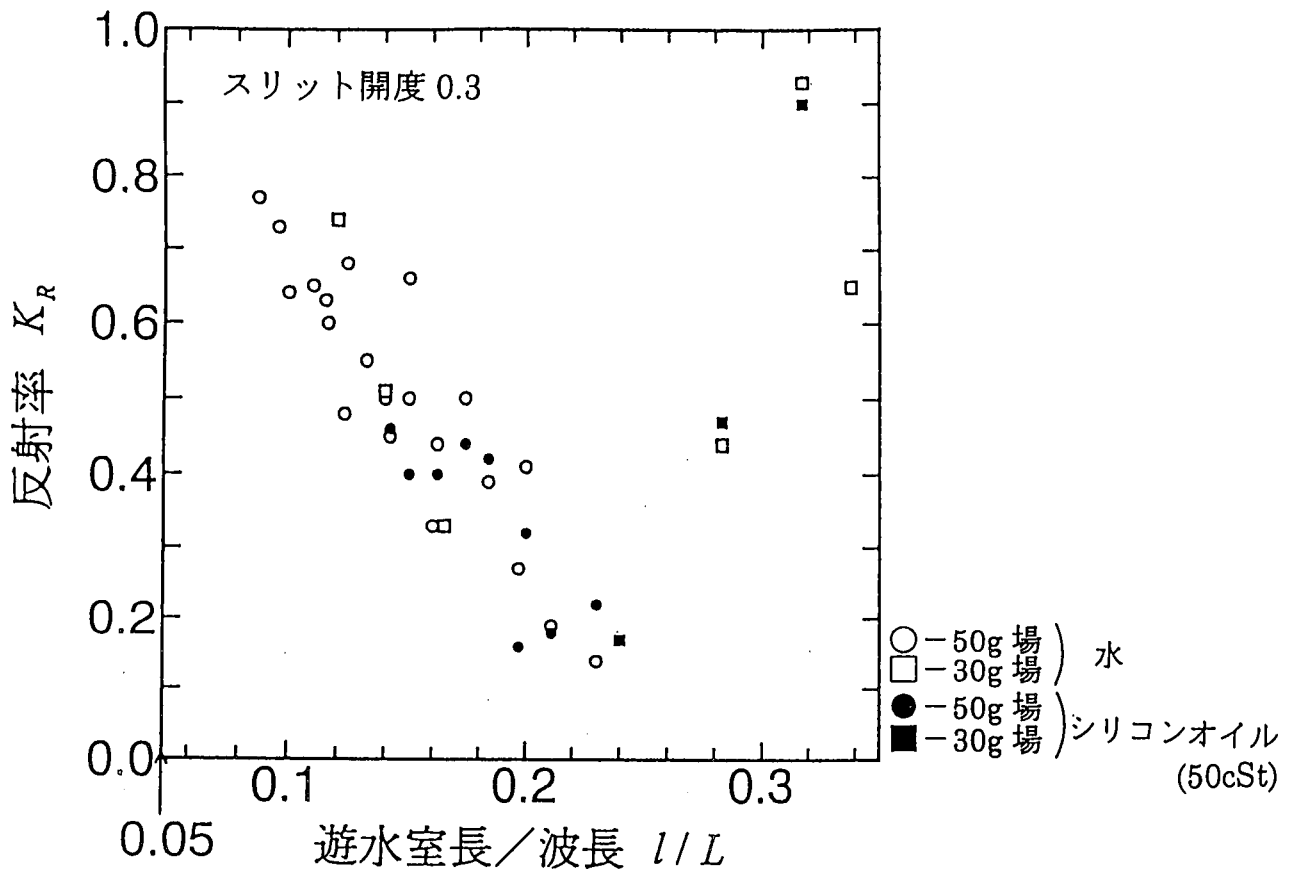


図-7 反射率に及ぼす遊水室長の影響

いることである。また、流体としてシリコンオイルを用いた場合にも水を用いた場合と同様な $K_R \sim l/L$ 関係が得られていることにも留意したい。

4. 進行波による水平砂質地盤の間隙圧応答実験

4.1 実験概要

上述の進行波造波システムを用いて、50gの遠心力場において砂質トレンチ地盤の波浪応答実験を行った。流体としては、動的遠心力载荷試験における時間相似率を満足させるために、粘度が 50cStのシリコンオイルを採用した。

実験条件は、遠心加速度50g、液深9cm、波浪周波数1111Hz、スリット開度0.3、遊水室長10.0cmである。これは原位置において水深4.5m、周波数0.2211Hzの波浪条件に相当する。試料には、細砂に属するLeighton Buzzard砂（以下LB砂）を用いた。脱気したシリコンオイルにLB砂をスプーンで少量ずつ投入することにより模型地盤を作成した。

間隙圧計の配置、及びCCDカメラより観測した液面変動の模式空間波形を図-8に示す。間隙圧センサ（No.1～No.3）の配置は、造波板からそれぞれ135mm（センサNo.1）、200mm（No.3）、および265mm（No.2）離れた位置である。ただし、これらの間隙圧センサの設置高さについては、入力流体圧変動を測定するためにトレンチ地盤表面直

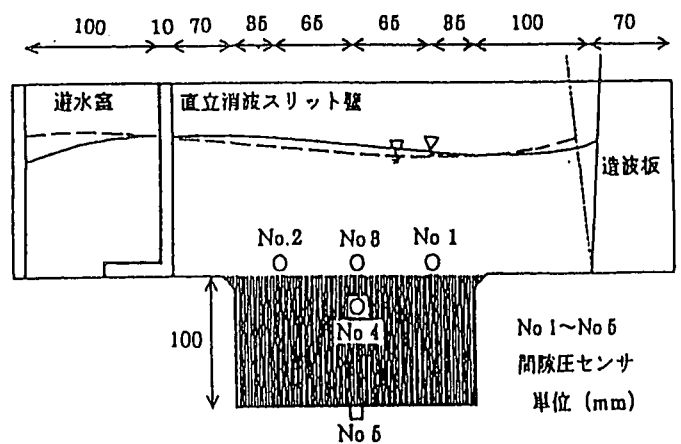
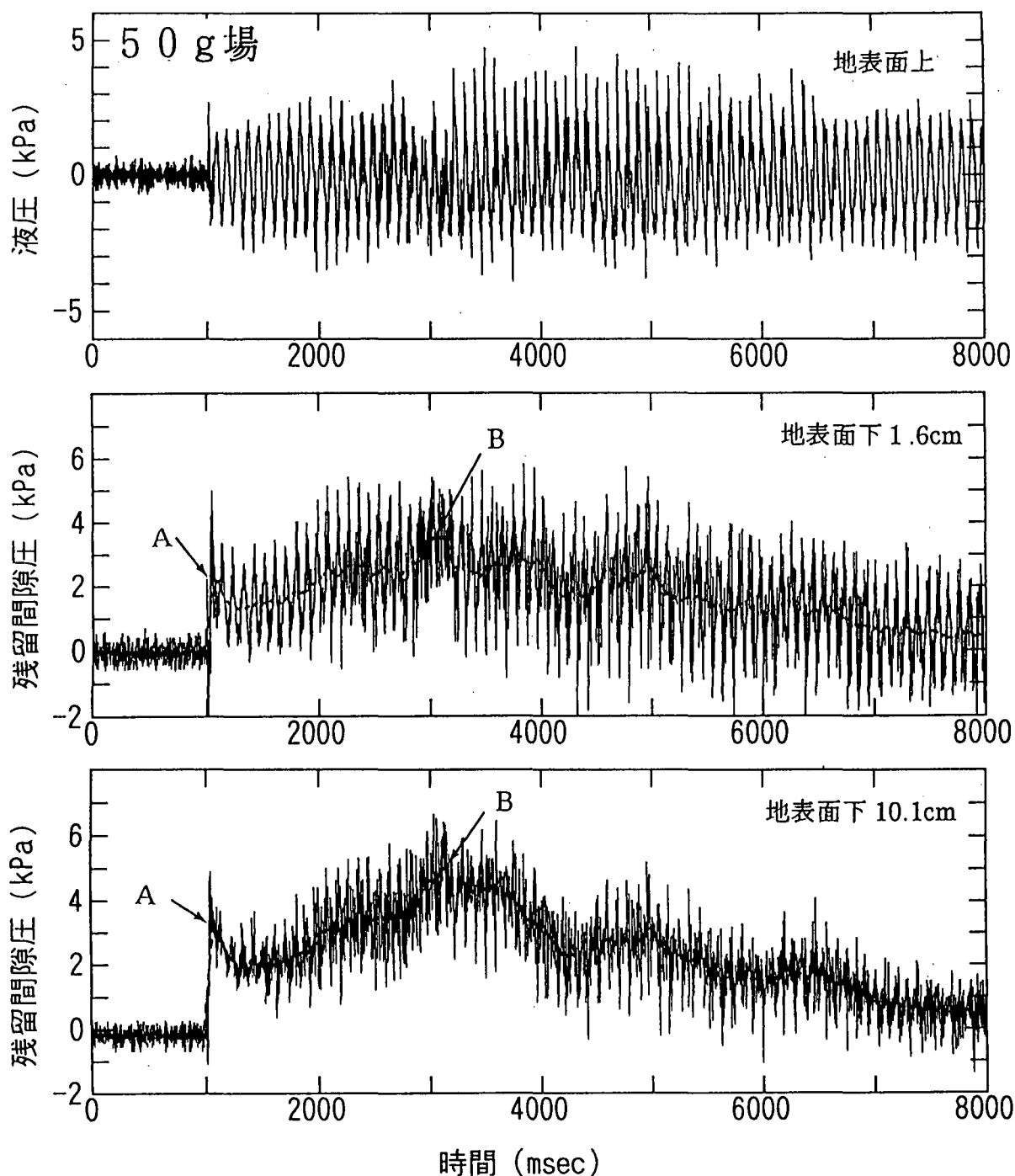


図-8 間隙圧計の位置及び模式空間波形



図－9 間隙圧の時刻歴

上に配置した。また、トレンチ中心軸上の地盤内部（センサNo. 4）及び地盤底部（No. 5）においても間隙圧応答を計測した。

4.2 実験結果

緩詰め砂（間隙比0.95、層厚10.1cm）の波浪応答実験結果を紹介する。上述の通り、本実験の実験条件は、原位置において水深4.5m、周波数0.22Hzの波浪条件に、また緩詰め砂の層厚は5mに相当する。

まず図－8におけるセンサNo. 1とセンサNo. 2による実測液圧波形から、反射率 K_R を算定した。その結果、 $l/L = 0.20$ において、 $K_R = 0.12$ となり、ほぼ進行波的な波が生成されているといえる。

本実験においてセンサNo. 3～No. 5（図－8）で測定された入力流体圧および間隙圧の時刻歴を図－9に示す。図－9 (a)は、トレンチ中心軸上の地表面（センサNo. 3）で計測された入力流体圧の時刻歴を表している。図－9 (b)、

(c)は、それぞれ同軸上の地表面下1.6cm (センサNo. 4)、および地盤底部で10.1cm (センサNo. 5)において計測した間隙圧の時刻歴を表している。図中の点線部は実験データの移動平均を取ったもので、残留間隙圧の推移を表している。地盤中の間隙圧応答(同図(b))に注目すると、波浪载荷1波目(点(A))において残留間隙圧が急激に上昇し、その後も20波目程度まで蓄積傾向にある。ここで興味深いのは、最初にピーク(A)に達しいったん減少した後、再び蓄積して最大残留間隙圧値(点(B))に達していることである。またその後は徐々に消散している。次いで地盤底部(同図(c))に注目すると地盤浅部(同図(b))と同様の現象が確認され、最大間隙圧値も同程度となっている。

ここに関口ら¹²⁾が先に行ったLB砂に対する重複波载荷の場合では、残留間隙圧は立ち上がり後、単調に減少し、進行波载荷の場合に見られるような第2のピークが現れるという現象は確認されていない。これは重複波载荷と進行波载荷の負荷条件の明瞭な違いを表していると考ええる。

また多孔質弾性論では進行波の場合と重複波の場合で、海底地盤内に誘起される応力状態に明らかな違いがあることから、今後は、それぞれの波浪による海底地盤の応力状態及び応答の対比に注目して検討していく所存である。

5. まとめ

(1) スリット式消波機構を装備した遠心力場進行波造波システムを開発した。本システムを用いて液深、波浪周波数の波浪条件、スリット開度、遊水室長の消波機構の構造条件を変化させてスリット壁の反射率を計測したところ、反射率の値 K_R は遊水室長/波長比(ℓ/L)に強く依存し、 K_R の極小値が $\ell/L=0.2\sim0.25$ のときに現れることを確認した。またシリコンオイルにおいても同様の傾向を確認した。実現された最小反射率の値は $K_R=0.13$ (図-7)であり、この実験状況のもとではほぼ進行波的な波浪が生成されている。

(2) 上記のシステムを用いて生成した進行波を模型細砂地盤に载荷し、その間隙圧の応答を調べた。その結果、残留間隙圧の立ち上がり後に最大残留間隙圧値が現れ、重複波载荷の場合とは明瞭に異なる現象が確認された。

参考文献

- 1) Sekiguchi, H., Kita, K. and Okamoto, O. : 'Wave-induced instability of sand beds,' Proc. Int. Conf. CENTRIFUGE94, Singapore, pp. 295-300, 1994.
- 2) Sekiguchi, H., Kita, K. and Okamoto, O. : 'Response of poro-elastoplastic beds to standing waves,' Soils and Foundations, to appear.
- 3) 合田良實：港湾構造物の耐波設計, 鹿島出版会, p222, 1981.