

砂地盤の液状化消波システムの消波効果

姜 閔 求* ・ 高 橋 重 雄** ・ 鈴木高二朗***
三 浦 裕 信**** ・ 朴 佑 善*****

1. ま え が き

液状化消波システムは、図一1に示したように、砂地盤内にポンプで水を送り込み、間隙水圧の上昇によって砂を液状化させ、この上を通過する波を減衰させる新しい波浪制御構造物である。すなわち、砂地盤を適切な液状化状態にすると地盤が大きく動き、砂粒子間の摩擦によって波を大きく消波できる。砂地盤の液状化消波システムは①構造物を必要としないため景観を損ねない②海水交換が容易に行えるため環境に優れる③防波堤の開口部に設置することによる船舶の通行が容易になるなどの長所がある。高橋ら（1994）はすでに小型水理模型実験を行い、その基礎特性や消波効果について確認している。

波と地盤の相互作用から生じる地盤内の摩擦を用いた波の制御に関する研究は、柔らかい粘土地盤上における波の減衰の研究から始まっており、いくつかの研究成果が得られている（Gade, 1958；Yamamoto・Takahashi, 1985；中野, 1994 など）。しかしながら、消波に適した粘土がどこにでもあるわけではないこと、粘土の特性によって消波能力が大きく変わるため、制御しにくいことなどの問題点がある。

高橋ら（1994）による実験は小規模であり、地盤における砂の相似則にも問題がある。また、波の諸元や地盤の諸元によって消波性能がどう変化するのかも明らかで

はない。そこで本研究では、こうした問題を明らかにするため大型水理模型実験を行うとともに数値計算を行った。

2. 水理模型実験

2.1 実験の方法

大型水理模型実験は大型造波水路（長さ 105 m、幅 0.8 m、高さ 2.5 m）で行った。大型実験における砂地盤を液状化させる試験装置のスケール S_c は、現地スケールの 1/20 を想定したものであり、小型実験のスケールより 1.375 倍大きい。以降、小型実験と大型実験のことをそれぞれ Exp-I と Exp-II あるいは $S_c=1/27.5$ と $S_c=1/20$ と称する。大型実験と小型実験で用いた模型の諸元を表一1に示す。

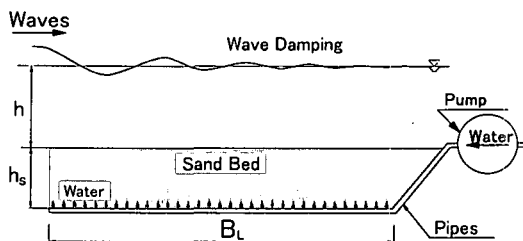
大型実験における液状化消波システムは、水路床を長さ 6.0 m、深さ 0.65 m にわたって掘り下げ、その底面にパイプを埋設しており、この上に砂地盤層を設けた。パイプの一端はポンプにつながっている。なお、小型実験の装置は高橋ら（1994）に詳しい。

表一1で、Exp-II において B_L を 6.0 m ではなく 5.5 m としているのは、砂地盤両端の壁面の影響により、波の作用による砂地盤の動きが制約されるため、消波装置としての実質的な長さがやや短くなったためである。実験で用いた砂は新潟砂（比重 = 2.65, $d_{10}=0.13$ mm, 空隙率 $n=0.45$, 湿潤密度 $\rho_s=1.91$ g/cm³）である。大型実験では、水深 h を 3 種類、周期 T はそれぞれ的水深に対し 3～5 種類、波高 H はそれぞれの周期に対し 1～2 種類の規則波を発生させており、さらに不規則波についても実施した。地盤中の間隙水の上向き流速（流量速度） V_d については 5～9 種類に変化させた。

実験では、波高計、間隙水圧計などを用いて計測を行った。波高については、砂地盤に進入する前の入射波高、砂地盤を通過した後の伝達波高、砂地盤の中央における波高の 3 つについて計測をしている。

2.2 上向き浸透流と液状化

図二2は、パイプからの注水によって砂地盤内に生じた間隙水圧の動水勾配 H_0 および地盤の体積変化率 R_v ($=V_v/V_0$) と上向き浸透流の流量速度 V_d の関係を示し



図一1 液状化消波システム概要図

- * 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所科学技術特別研究員
- ** 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所水工部波浪研究室長
- *** 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所水工部耐波研究室
- **** 前運輸省港湾技術研究所水工部耐波研究室（運輸省第一港湾建設局）
- ***** 工博 韓国海洋研究所

表一 液状化消波システムの模型の諸元

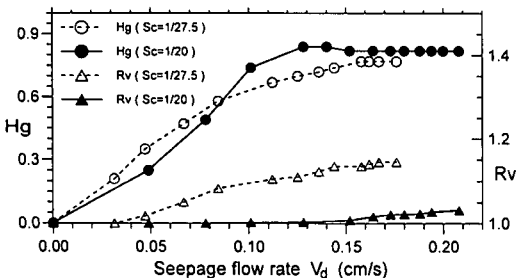
実験	水路内砂の長さ (m)	液状化消波システム					
		砂地盤部		パイプ部			埋設方向
		厚さ h_s (m)	長さ B_L (m)	開き穴の大きさ (mm)	穴の間隔 (cm)	パイプ間隔 (cm)	
Exp-I	11	0.40	4.0	0.2	3	6	水路方向
Exp-II	6	0.55	5.5 (6.0)	0.4	3	24	水路に直 角の方向

たものである。ここで、 V_o と V_r はそれぞれ注水前後の砂地盤の体積である。

通常の試験では動水勾配 H_g と流量速度 V_d はダルシー則によって線形な関係を示すが、 V_d がある動水勾配 (限界動水勾配 H_{gcr}) 以上のときは、 H_{gcr} の圧力以上の上昇はなく、ボイリング状態となる。 H_{gcr} は砂の湿潤密度 ρ_t および水の密度 ρ_w を用い、 $H_{gcr} = (\rho_t - \rho_w) / \rho_w$ で求められ、今回の実験における H_{gcr} は 0.91 となる。しかし、 $S_c = 1/27.5$ の場合、 $V_d = 0.09$ cm/s まで H_g が線形的に増加し、その後液状化が始まり、 H_{gcr} は 0.75 の値となった。 $S_c = 1/20$ の場合、 $V_d = 0.08$ cm/s から局所的なボイリングが生じ始まるが、 $V_d = 0.13$ cm/s で液状化となり、 $H_{gcr} = 0.8$ となった。

今回の実験に用いた砂の透水係数 k_0 はダルシー則によると 0.14 cm/s であり、きれいな砂の透水係数に相当する。また、注水による砂地盤の体積変化は、 $S_c = 1/20$ と $S_c = 1/27.5$ の実験における体積変化率 R_v はそれぞれ 1.03 と 1.15 まで増加している。

このように小型実験と大型実験において砂地盤が液状化となる流量速度 V_d と体積変化率 R_v に顕著な差が生じた原因は、砂地盤を液状化させるパイプシステムの違いによるものと推察される。すなわち、 $S_c = 1/20$ の大型実験で埋設したパイプの間隔が $S_c = 1/27.5$ に比べて 4 倍程度広がっているため、局所的なボイリング現象が強くなり、それによって砂粒子を持ち上げる力が相対的に弱くなったためであると考えられる。

図二 流量速度 V_d と動水勾配 H_g および体積変化率 R_v の関係

2.3 波高伝達率

図一3と4は、実験から得られた波高伝達率 $K_T (= H_T/H)$ (H と H_T は入射波と伝達波の波高を表す) を示したものであり、横軸に透水係数で無次元化した流量速度 (等価動水勾配 $EH_g (= V_d/k_0)$ と呼ぶ) をとっている。

図一3は、 $S_c = 1/27.5$ の小型実験 ($h_s = 40$ cm, $B_L = 4$ m) の場合の K_T を示したものである。水深の浅い $h/h_s = 0.625$ で、 $h/L = 0.192$ と 0.107 の場合、 K_T の値は $EH_g = 0.5$ の前後で最

も小さくなり、0.3以下となる。また、 $h/L = 0.083$ の場合、 K_T が 0.42 と比較的小さい。しかし、 h/h_s が 2 倍の 0.125 では、砂地盤が液状化しても K_T が 0.6~0.7 程度とあまり低下していない。いずれも K_T は液状化する前後で最も小さくなり、その後大きくなる傾向がある。また、 h/h_s が大きく、 h/L が小さくなるほど K_T が最も小さくなる EH_g の値は大きいほうにシフトしている。

図一4は、大型実験 ($S_c = 1/20$, $h_s = 55$ cm, $B_L = 5.5$ m の規則波) から得られた K_T を示したものである。図一3の小型実験の結果と比較してみると、多少ばらつきがあるが、 EH_g の変化に伴う K_T の傾向がよく似ていることが分かる。 K_T に及ぼす相似則の影響はあまり現れないものの、本研究のスケール差程度ではその効果については言い難い。これについては第3章において数値計算により詳しく検討する。この図より波高伝達率に及ぼす波高の影響はほとんどなく、線形であることが分かる。

大型実験でも、小型実験と同様に K_T は、水深が浅いほど小さくなっている。また、一般に周期が短くなると K_T はほぼ同じか若干小さくなるが、さらに周期が小さくなると逆に K_T が大きくなることもある ($h/h_s = 0.91$, $h/L = 0.25$ の場合)。これについては後述する第3章の計算結果でも確認できた。

大型実験における結果が小型実験の結果と若干違う傾向にあるのは、①液状化の進展とともに K_T が小さくなった後の変化が小さい。これは、上向き浸透流によって砂地盤の体積膨張が小さく、液状化に伴う砂地盤の流動化が弱かったためである (図一2参照)。②最小の波高伝達率 $K_{T(\min)}$ の現れる等価動水勾配 EH_g が小型実験より大きいほうにシフトしている。これは大型実験と小型実験における砂地盤が液状化状態となる流量速度に差があることに起因する。

紙面の制約上示さなかったが、不規則波に対する波高伝達率 K_T は、流量速度 EH_g の増加に伴う K_T の全体的な変化の傾向は規則波と似ているが、その値は規則波よりわずかに大きくなった。これは、不規則波は有義波周期より大きい周期成分 ($h/L_{1/3}$ の小さい成分) を含んでいるためであると考えられる。

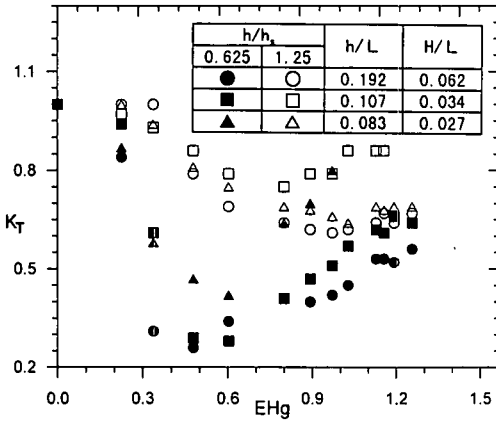


図-3 波高伝達率 K_T ($S_c=1/27.5$, $h_s=40$ cm)

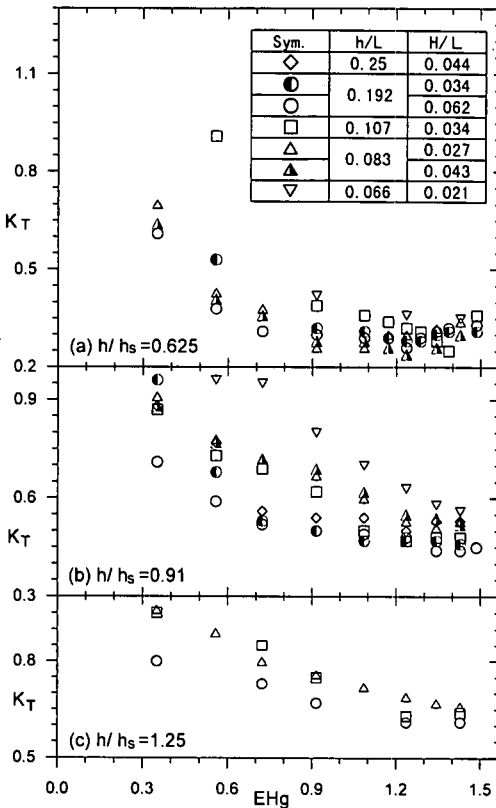


図-4 波高伝達率 K_T ($S_c=1/20$, $h_s=55$ cm, 規則波)

3. 波一地盤の相互干渉に関する有限要素法計算

3.1 数値計算の概要

著者ら(朴ら, 1996)は既に波と地盤の相互作用に関して検討するため、有限要素法(FEM)を用いた数値計

算法を提案している。計算は水部に対しては線形ポテンシャル理論を、地盤部に対してはBiotによる二相弾性理論を用いており、地盤と水との境界では圧力だけでなく流れの連続性も満たすように同時に解く。ただし、計算を簡単にするため、断面二次元での周波数領域の線形計算としている。本計算法では、せん断弾性係数 G と減衰係数 δ からなる複素せん断弾性係数 $G^*=G(1+i\delta)$ を用いることにより地盤によるエネルギー減衰が表現でき、 G と δ そして透水係数 k_0 等を与えることによって液化化した地盤による波の減衰が計算できる。

3.2 パラメータによる K_T の計算例

図-5は、地盤のせん断弾性係数 G と減衰係数 δ を変化させた場合の、波高伝達率 K_T の変化を示したものである。せん断弾性係数 G が 1.2 kN/m^2 程度のとき波高伝達率 K_T が 0.2 程度で最小となっている。実験では、注水量を変化させて地盤の軟らかさを変えて実験を行っており、ボイリング状態の軟らかすぎる状態ではかえって波高伝達率が大きくなる点など、計算と実験はよく似た傾向を示している。すなわち、実験における流量速度と計算におけるせん断弾性係数の対応がとれば、計算に

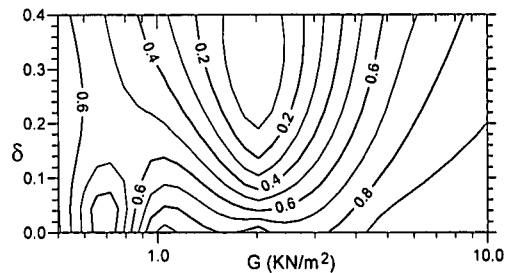


図-5 G と δ の変化による波高伝達率 K_T ($S_c=1/20$, $h_s=55$ cm, $h=34.4$ cm, $T=1.17$ s)

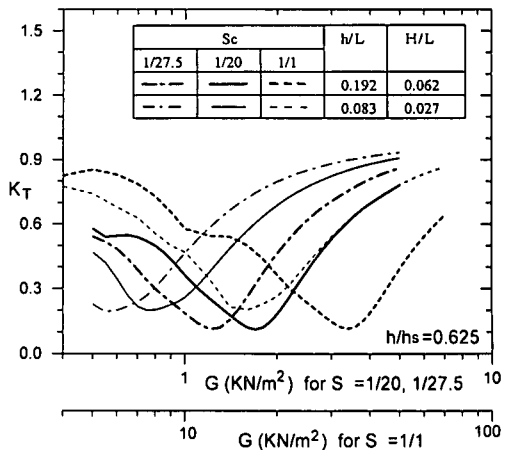


図-6 G とスケール S_c の変化による波高伝達率 K_T

よって実験結果を表すことができる。なお、計算結果との比較から $\delta=0.2$ として以後の計算を行うこととした。

図-6 は、図-3 と 4 の $h/h_0=0.625$ の場合に対応した波高伝達率 K_T の計算例であり、さらに現地スケールでの計算結果も加えている。計算する際、 G は地盤層全体に一定とし計算している。この計算結果からはスケールによって波高伝達率はほとんど変わらないことがわかる。但し、実験結果と異なるのは、 $K_{T(\min)}$ が現れる G の値はスケールに比例して G の大きいほう（硬い方あるいは EH_0 の小さい方）にシフトしていることである。

なお、透水係数 k_0 の変化による波高伝達率に対して計算した結果、透水係数によって波高伝達率はほとんど変わらないことが分かった。これは液状化消波システムにおいて透水係数の小さい細粒砂を用いても同じ効果が得られることを示唆しており、細粒砂の地盤を液状化させるのには小さいパワーでも充分であることから、より経済的な消波システムが可能と考えられる。著者は細粒砂の地盤における液状化の基本特性に対しても検討中である（高橋ら、1997）。

3.3 実験結果との比較

前節で、計算によって液状化消波システムの性能を求めるためにはすでに述べたようにその地盤のせん断弾性係数を適切に評価しなければならない。以下に、3つのステップによる G の算定方法を述べる。

① 液状化させる前のせん断弾性係数 G_0

せん断弾性係数の計算は地盤厚さの影響を考慮できるように次の計算式（Yamamoto ら、1985）を用いる。

$$G_0 = \alpha \times 10^8 (1-n) \left(\frac{\beta-n}{1-n} \right)^2 (\sigma'_0)^{0.5} \dots\dots\dots (1)$$

$$\sigma'_0 = 2\tau_{zz}'/3$$

$$\tau_{zz}' = (\rho_t - \rho_w)gz$$

$$\alpha = 2.19, \beta = 2.17: \text{丸みのある砂}$$

$$\alpha = 1.03, \beta = 2.97: \text{角ばった砂}$$

ここで、 n は空隙率、 z は地盤表層を原点とし鉛直上向を正に取った鉛直軸を表す。本実験で用いた砂の α と β はそれぞれ 2.19 と 2.17 である。

② 注水時のせん断弾性係数 G

地震による液状化における数値計算では液状化後の G を低下係数 W_{at} を乗じて評価しており、 $1/10 \sim 1/1000$ のを用いた。注水による液状化も同様に考えることができ、図-4 の実験結果と比較して G の低下係数を等価動水勾配 EH_0 の関数として以下のように表すことにした。

$$\text{Log}_{10}(1/W_{at}) = 4.507 EH_0^{0.182} \dots\dots\dots (2)$$

③ 砂地盤全体の G のばらつきに対する補正

図-4 の実験結果と図-6 の計算結果を比較すると計

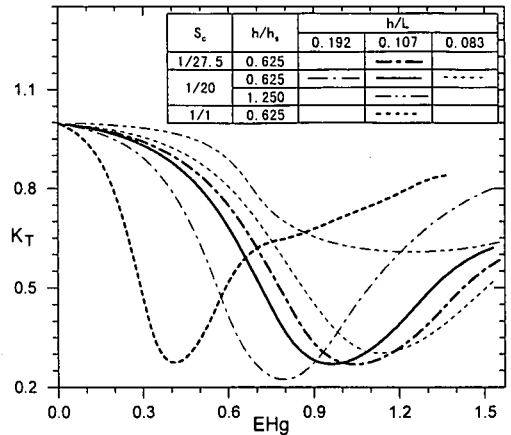


図-7 平滑化計算による波高伝達率 K_T

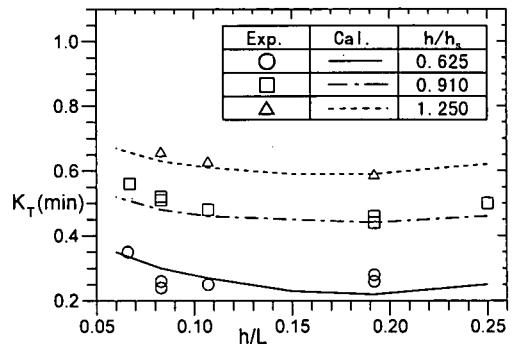


図-8 h/L と $K_{T(\min)}$ の関係

算ではある G の範囲で急に K_T が小さくなるが、実験ではそうした傾向はない。それは注水装置による注水の不均等によって G がばらついていることや、波の作用時に波の谷や峰における G の違いなどがあるためと考えられる。実験のシステムでもこうした G のばらつきは考えられるのでこの効果も考慮することにした。具体的には計算で得られる K_T をある G の範囲について平滑化している。図-7 は、図-6 をこの方法で平滑化した K_T を、 G の代わりに等価動水勾配 EH_0 を横軸にとって示したものである。この計算結果は、図-3 と 図-4 の実験結果をより精度よく表している。また、模型縮尺が大きくなると、波高伝達率が最小となる等価動水勾配 EH_0 は縮尺の $1/2$ 乗ほど小さいほうで得られることが分かる。

図-8 は、横軸に h/L をとって、実験結果より得られた波高伝達率の最小値 $K_{T(\min)}$ をプロットしたものであり、計算値も線で示している。計算値はほぼ実験結果と一致している。この図より、波高伝達率の最小値は水深により大きく影響を受けていることが分かる。また、 $K_{T(\min)}$ は h/L によってあまり変化せず安定性のある消波効果が得られていることが分かる。

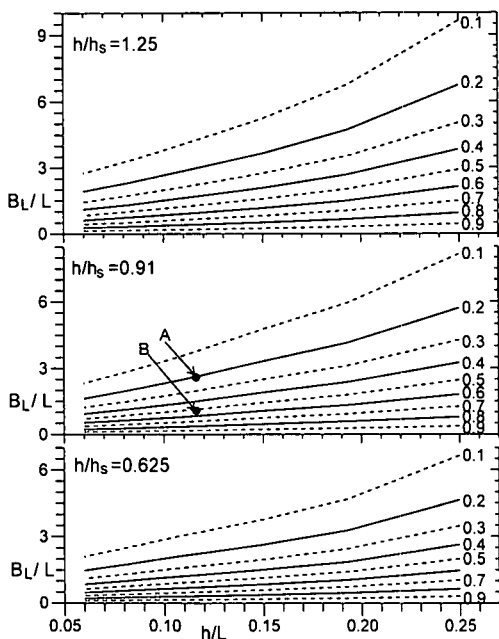


図-9 任意の波高伝達率 K_{T0} に必要な B_L/L

3.4 消波システムによる消波効果の予測

図-9は、目標とする最小の波高伝達率 K_{T0} の消波効果を得るために必要となる消波システムの長さ B_L を波長で無次元化した計算結果である。ここで、最小とは最適な注水量として最適の G となったとしたときの K_T を意味する。図中の数字は K_{T0} である。例えば、水深 $h=10$ mで、設計波の周期 $T=10$ sの海域で目標の K_{T0} を0.4としたとき、液状化消波システムの長さ B_L は $h_s=11$ m ($h/h_s=0.91$) の場合(図中の点A)、2波長分必要であり、1波長とした場合(点B)には0.53の $K_{T(min)}$ が得られる。このようにして液状化消波システムによる消波効果の予測ができる。また、この結果は現地スケールにも適用できる。

4. あとがき

液状化した砂地盤による消波システムについて、水理模型実験とFEMを用いた数値計算の両面より、その消波効果について確認した。得られた結論は次のようにまとめられる。

1) 砂地盤が1波長程度の長さで水深程度の深さであれば大きな消波が期待できる。ただし、水深が小さいほど消波効果は大きく、同一水深では波の周期に関わらずかなり安定な消波効果が得られる。また、不規則波に対する消波効果は規則波よりやや落ちる程度である。

2) 消波システムの消波効果は現地でも模型でも変わらないことが明らかになっており、現地では相対的に小さい圧力でも模型実験の結果と同様の消波効果が得られることが分かった。

3) 液状化消波システムの消波性能の算定図を示した。

なお、透水係数によっても消波効果は変わらないという結果が得られたので、今後、より小さい圧力によっても液状化が可能な透水係数の小さい細粒砂を用いた検討も行う予定である。また、消波効率をより高めるためのシステムの改良についても検討を進める予定である。

参 考 文 献

- 高橋重雄・鈴木高二朗・姜 関求・常数浩二 (1997): 細粒砂地盤の液状化に関する一実験, 海岸工学論文集, 第44巻(印刷中)。
- 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. 611-616。
- 中野 晋 (1994): 底泥の堆積した海域における波高減衰と底泥の移動現象に関する研究, 京都大学博士学位論文, 212 p。
- 朴 佑善・高橋重雄・鈴木高二朗・姜 関求 (1996): 波-地盤-構造物の相互作用に関する有限要素法解析, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 1036-1040。
- Gade, H. G. (1958): Effects of a nonrigid, impermeable bottom on plane surface waves in shallow water, J. of Marine Research, Vol. 16, No. 2, pp. 61-82。
- Yamamoto, T. and S. Takahashi (1985): Wave damping by soil motion, ASCE, WW, Vol. 111, No. 1, pp. 62-77。