

液状化した砂地盤の締め固まりと波の減衰について

—液状化消波システムの実用化に関する研究—

姜 閔 求*・高橋重雄**・高野忠志***

1. ま え が き

液状化消波システムは、砂地盤を液状化させて、その上を進行する波によって地盤を動かし、地盤内でのエネルギーの消費によって波を減衰させる新しい波浪制御システムである(高橋ら, 1994)。1 波長程度の砂地盤で波高伝達率を 30%程度にできることなど、その基本性能は明らかとなっており、与えられた地盤の条件に対して波高伝達率が計算できるようになっている(姜ら, 1997)。

現在、実用化に向けて種々の検討を行っているが、①波浪制御効率を高くするためには、地盤をより均一に液状化させることが重要であり、そうした性能の良い注水装置(液状化を発生する上向き浸透流装置)をより経済的に造ることが重要となっている。また、②液状化した地盤が波によって締め固まり、波浪制御効果が低減することもわかっており、その対策も不可欠となっている。特に、注水装置のポンプパワーを小さくすることが求められており、流量低減のために、透水係数の小さい細粒砂を用いる場合にはこの締め固まりが問題となる。

本報告は、こうした波と液状化した砂地盤の興味ある相互作用について、その実験結果を報告するものであり、液状化消波システムの実用化を促進するとともに、波に対する砂地盤の複雑な特性の解明に資するものである。まず、通常の砂を対象にし、均一な液状化地盤の形成と消波効果に及ぼす注水パイプ間隔の影響について調べ、透水係数の小さい細粒砂を対象とした地盤の締め固まり現象と消波効果について検討を加える。

2. 水理模型実験

(1) 実験水路と液状化消波装置

水理実験は、大型造波水路(長さ 105 m, 幅 0.8 m, 高さ 2.5 m)に長さ 6 m, 厚さ 0.65 m の砂地盤を設け、液状化消波装置を設置して行った。図-1 に液状化消波装置の断面図とパイプの配置や計測器の配置を示した平面図を示す。液状化消波装置は、その底面に内径 1.6 cm,

長さ 3 m の注水用のパイプを水路方向の 6 cm 間隔に設け(2 本×12 列)、パイプの両側面に 5 cm 間隔に直径 0.35 cm の孔を開けたものである。また、パイプには注水孔の目詰り防止を目的として防砂シート(透水係数 1 cm/s, 厚さ 3 mm)を 2 重巻きしている。なおそれぞれの注水パイプにはバルブを付けて、その開閉によって水が出る間隔(注水パイプ間隔 P_i)を変えた実験を行った。

(2) 実験砂

用いた砂は、姜ら(1997)の研究に用いた新潟砂と、流量を小さくすることを目的とした細粒砂(相馬硅砂 6 号)の 2 種類である(表-1)。表中の透水係数 k は、かなり軟らかい地盤状況より求められた値であり、波作用による地盤の締め固まりによって変わるが、この値を基

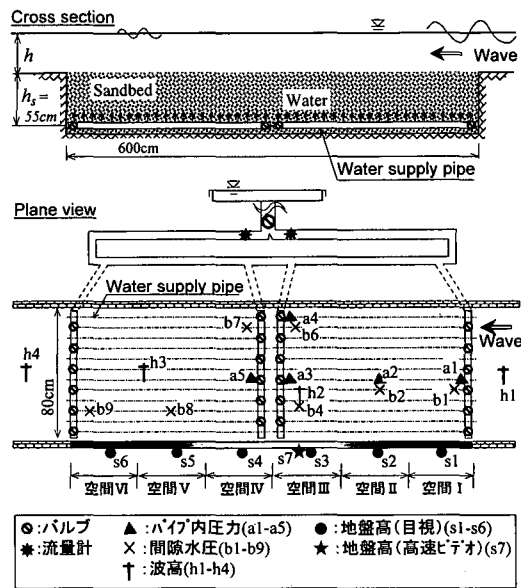


図-1 液状化消波装置の概要と計測器の配置

表-1 用いた砂の諸元(実験中の砂)

砂名称	D_{50} (mm)	D_{10} (mm)	比重 G_s	間隙率 n	透水係数 k (cm/s)
新潟砂	0.39	0.25	2.65	0.41-0.47	0.172
相馬硅砂 6 号	0.18	0.12	2.64	0.40-0.49	0.042

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

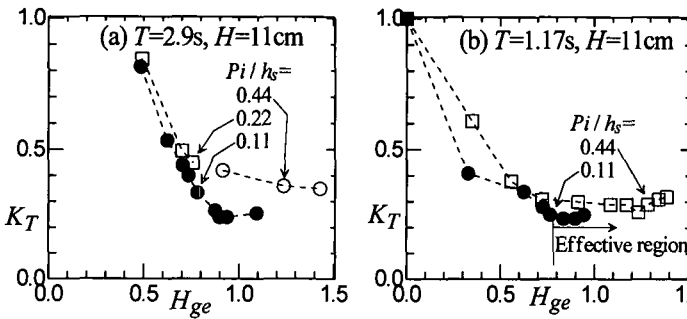


図-2 等価動水勾配 H_{ge} の変化に伴う波高伝達率 K_T の変化 (新潟砂, $h=34.4$ cm)

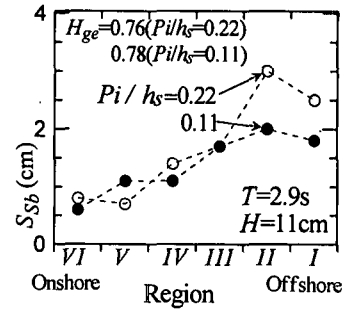


図-3 波作用による地盤沈下量の空間分布 (新潟砂, $h=34.4$ cm)

準値として用いている。

(3) 実験ケースと測定

実験では、水深 h を 34.4 cm と 50 cm の 2 種類にとり、周期 T をそれぞれの水深に対し 3～6 種類として規則波を作用させており、さらに一部は不規則波の実験も行った。実験波は、通常 240 s～270 s 間発生させている。なお、地盤中の間隙水の上向き流速 V_d を 5～9 段階に変化させており、注水パイプの間隔 P_i は主に 6 cm ($P_i/h_s=0.11$) について行っているが、12 cm ($P_i/h_s=0.22$) についても実施している。 $P_i=24$ cm ($P_i/h_s=0.44$) に対しては姜ら (1997) による結果を用いている。

計測は、図-1 に示したように波高 (4ヶ所)、地盤内の間隙水圧 (7ヶ所、平均地盤深さ 45.5 cm)、パイプ内の圧力 (5ヶ所)、地盤高 (2ヶ所: 1ヶ所は目視、1ヶ所はビデオカメラ) について実施している。

また、均一な液状化地盤を作り出すパイプ間隔などの条件を検討するため、造波水路の実験とは別に、上向き浸透流発生装置 (横幅 160 cm、奥幅 100 cm、高さ 160 cm) を用いた基礎的な試験も行った。

3. 注水パイプ間隔による地盤の均一性と消波効果

(1) パイプ間隔と波高伝達率 (新潟砂の実験結果)

図-2(a), (b) は、消波効果に及ぼす注水パイプ間隔 (P_i/h_s) の影響を示したものであり、上向き浸透流速 V_d を透水係数 k で除した等価動水勾配 $H_{ge}(=V_d/k)$ を横軸にとって波高伝達率 $K_T(=伝達波高/入射波高)$ の変化を示している。図の (a) は長い周期 ($T=2.9$ s) の結果であり、波高伝達率は等価動水勾配の増加に伴って減少し、最小となる波高伝達率 $K_{T(\min)}$ はパイプ間隔の短い方が小さくなっている。すなわち、 $P_i/h_s=0.11$ の場合の $K_{T(\min)}$ は 0.25 程度であるが、 $P_i/h_s=0.44$ の場合は 0.3 以上である。 $P_i/h_s=0.22$ の場合は明確ではないが、 $P_i/h_s=0.11$ の場合より若干大きい。また、波高伝達率が小さい値で安定となり始める最小の H_{ge} (以降、必要最小

動水勾配 H_{gee} と称する) は、 P_i/h_s の短い方が小さい。

一方、図の (b) は短い周期 ($T=1.17$ s) の結果であり、注水パイプ間隔の差による $K_{T(\min)}$ と H_{gee} の差はあまり大きくない。すなわち、注水パイプ間隔を小さくすれば、波高伝達率を小さくし、また必要最小動水勾配も小さくできるが、その効果は周期の大きいほど明瞭に現れる。

(2) 地盤締め固まりの不均一性 (新潟砂の実験結果)

上述した消波効果の差は、波作用によって生じる地盤の締め固まりが、岸沖方向 6 m の間で不均一になることが原因の一つと考えられる。図-3 は、横軸を砂地盤の岸沖方向の位置 (I が沖側、VI が岸側) をとり、縦軸に地盤の沈下量 S_{sb} をとったものである。等価動水勾配 $H_{ge}=0.758$ (限界動水勾配の 95% ほどの値) で、水深 $h=34.4$ cm、周期 $T=2.9$ s、波高 $H=11$ cm の波が 240 s 間作用した場合の結果が示している。図より地盤沈下量は、波の入射する沖側で大きく、岸に向かうほど小さくなる。また、沖側の I における沈下量は、 $P_i/h_s=0.11$ の場合が 1.8 cm 程度で、 $P_i/h_s=0.22$ の 2.5 cm より小さくなり、沈下量の場所的な差も P_i/h_s の小さい方が小さい。こうしたばらつきが、消波効果の違いになったと思われる。

ただし、このような沈下量の空間分布の傾向は周期の小さい場合もほぼ同様となっていることも確認されたが、消波効果への影響は小さい。これは、周期の長い波ほど軟らかい (H_{ge} が大きい) 地盤で消波効果が最適となり、周期が長いほど地盤の不均一な締め固まりに敏感になり、消波効果が低下しやすくなるためと思われる。

(3) 必要最小動水勾配 (新潟砂による実験結果)

図-4 は、注水パイプ間隔を小さくすれば、周期の長い波でも必要最小動水勾配が小さくなることを示したものである。横軸に水深波長比 h/L を、縦軸に必要最小動水勾配 H_{gee} をとっており、注水パイプ間隔 $P_i/h_s=0.11$ と 0.44 について示している。全体的には h/L が小さくなるほど H_{gee} が大きくなっているが、 $P_i/h_s=0.11$ では、 h/L に関わらずほとんど同じ必要最小動水勾配で、高い消波

効果が得られることがわかる。

(4) 最小の波高伝達率 (新潟砂による実験結果)

図-5は、最小となる波高伝達率 $K_{T(min)}$ と h/L の関係を示した結果である。二つのパイプ間隔に対する結果より、やはり間隔が小さい $Pi/h_s=0.11$ では、 $K_{T(min)}$ が、 h/L に関してほとんど一定になっており、 $h/h_s=0.625$ で、30%の波高伝達率が得られている。また、不規則波の結果も規則波の結果とほぼ同様の結果となっている。図には計算結果を示しているが、計算ではある程度の剪断弾性係数のばらつきを考慮しており、そのばらつきを小さくすると、 $Pi/h_s=0.11$ の実験結果に適応する計算結果が得られる。

(5) 上向き浸透流装置による実験

注水パイプの間隔を小さくするほど地盤を均一に作り出しやすいことについては、別途実施した上向き浸透流装置による液状化試験によって確認している。実験は、上向き浸透流の流量を変えて、間隙水圧を測定し、液状化の発生で間隙水圧が上限となる値を求めている。この限界動水勾配について、パイプ間隔 Pi/h_s を 0.2~1.0まで変えて測定した。用いた砂は新潟砂と相馬砂6号で

あり、その間隙比はそれぞれ0.426と0.428である。

図-6は注水パイプ間隔 Pi/h_s を横軸にとって限界動水勾配 H_{ocr} の実験値を示したものである。同図には H_{ocr} の理論値も図中の白抜き (新潟砂: ●, 相馬砂6号: ▲) で表している。図より H_{ocr} は、 $Pi/h_s=0.2$ 程度で粒径に関わらず理論値に近くになっており、 Pi/h_s がそれより大きくなるにつれて小さくなる。限界動水勾配が小さくなるのは、間隙水圧に場所的なばらつきがあり、局所的なパイピングが発生してしまうためである。なお、相馬砂6号の方が Pi/h_s の増加に伴う H_{ocr} の減衰率が大きくなっている。これは、相馬砂6号の方の透水係数が小さいため場所的なばらつきが大きくなるためと思われる。

この実験結果によれば、粒径に関わらず Pi/h_s を 0.2より小さくすれば、ある程度均一な液状化地盤が形成できることになる。ただし、前述のように波の作用場では、波による締め固まりがあり、注水パイプ間隔は0.1以下が望ましいと思われる。

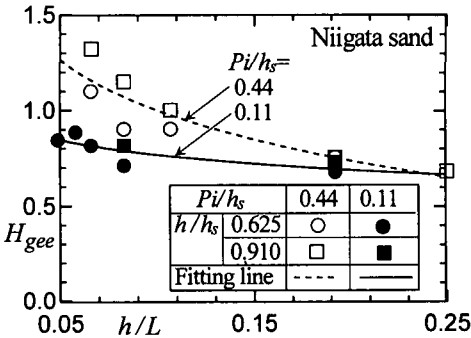


図-4 相対水深 h/L の変化に伴う H_{gee} の変化

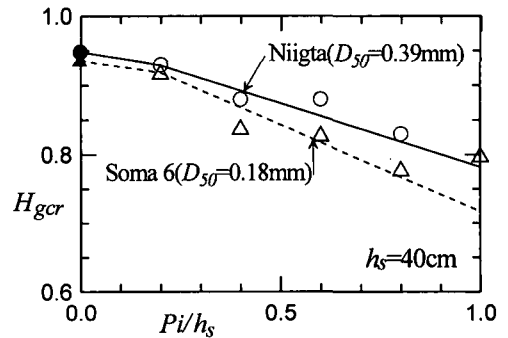


図-6 Pi/h_s と H_{ocr} の関係 (上向き浸透流発生装置)

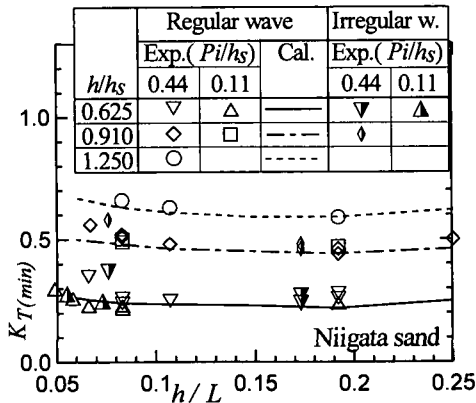


図-5 相対水深 h/L の変化に伴う $K_{T(min)}$ の変化

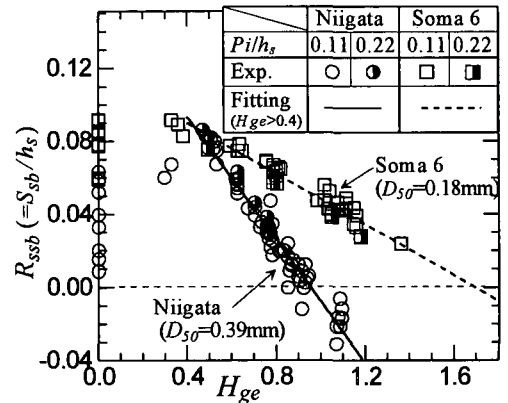


図-7 H_{oe} と地盤沈下率 R_{ssb} の関係

4. 波作用による地盤の締め固まり

図-7は、上向き浸透流の強さと波の作用による地盤の締め固まり（沈下量）の関係を示すものであり、横軸に等価動水勾配 H_{ge} をとり、地盤沈下率 $R_{ssb}(=S_{sb}/h_s)$ を示している。図に示した結果は、本研究で実施した全実験ケース（規則波）より得られたものである。地盤沈下量は、地盤沈下がほぼ安定となった 240 s ~ 270 s 間の波作用の結果より求めている。

図から明らかなように、地盤の締め固まりによる沈下量は大きく、 $H_{ge}=0.4$ 程度で、地盤沈下率はほとんど最大（約 0.09）となる。 $H_{ge}>0.4$ では、多少ばらつきはあるが、 H_{ge} を大きくすると沈下率は低減する。また、新潟砂の沈下率が 0 となる H_{ge} は 1.0 程度である。新潟砂の場合は、 H_{ge} が 0.8 ~ 1.0 程度で消波効果が高い最適な柔らかさとなるが、この範囲での沈下量は小さく、締め固まりが問題とはならない。

一方、相馬硅砂 6 号の場合、沈下率が 0 となる H_{ge} は、1.7 と大きく、同じ H_{ge} に対して相馬硅砂 6 号の沈下率が新潟砂の場合より大きくなっている。これは、粒径が小さいほど地盤の締め固まりが不均一であり、パイピングの発生による流量の漏れが大きいためと考えられる。相馬硅砂 6 号の場合でも H_{ge} を大きくすれば、波作用による地盤の締め固まりも防止できるが、こうした大きな H_{ge} の範囲では、後に述べるように必ずしも高い消波効果が得られない。これは、地盤の締め固まりが不均一で、柔らかすぎるところが表れるためと思われる。ただし、 H_{ge} が 1.2 程度以下では、次章で述べる締め固まりの問題が発生する。

5. 地盤の締め固まりと消波効果の時間変化

(1) 測定記録の例（相馬硅砂 6 号による実験結果）

図-8は、相馬硅砂 6 号の実験における測定記録の一例であり、新潟砂に比べ複雑な挙動を示すことがわかる。これは注水パイプ間隔 $Pi=6$ cm、水深 $h=34.4$ cm で周期 $T=3.3$ s、波高 $H=16$ cm の波が作用した場合の結果である。図中、上から 2 つはそれぞれ入射波 (h1) と伝達波 (h4) の水位変動であり、次が地盤深さ 45.1 cm の間隙水圧 (b2) で、最後に地盤高さの平均レベル (s7) である。まず、上向き浸透流の無いまま波を作用させ、80 秒ほど経過した後給水 ($H_{ge}=1.17$) を開始している。

初期状態は比較的柔らかい状態であるため、給水がない状態で波が通過した場合でも、砂地盤は動き、ある程度消波されるが、伝達波高は徐々に大きくなる。地盤内の間隙水圧は（図には示していないが）平均レベルが 40 gf/cm² (=3.92 kPa) 近くまで上昇した後、徐々に減っていき、そのとき地盤高の平均レベルも徐々に下がって

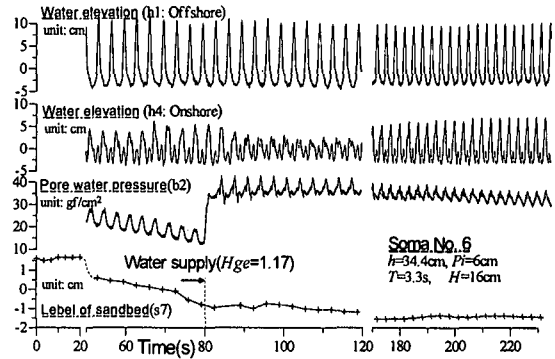


図-8 測定記録の例（相馬硅砂 6 号）

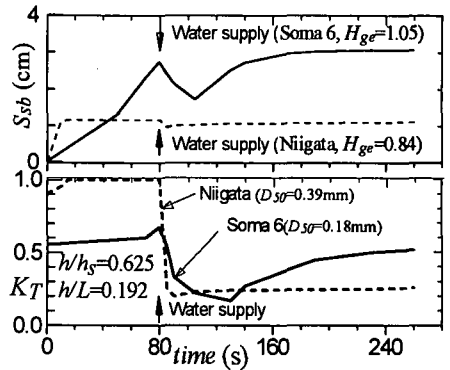


図-9 S_{sb} と K_T の時間波形 ($h/h_s=0.625$)

いる。80 秒後に給水を始めると、まず間隙水圧が 40 gf/cm² (=3.92 kPa) 近くまで上昇し地盤が液状化し、地盤高もそれに伴って若干上昇する。伝達波高は、間隙水圧や地盤高の上昇に比べればゆっくり小さくなってからまた大きくなる。この際、波の分裂が強く現れている。地盤が堅くなって地盤高がほぼ一定になるとともに分裂の現象は徐々に弱くなっており、間隙水圧の変動振幅も小さくなっている。

(2) 新潟砂と相馬硅砂 6 号の地盤締め固まりの比較

図-9は、横軸に時間をとって、地盤の沈下量 S_{sb} とそのときの波高伝達率をみたものであり、図には新潟砂と相馬硅砂 6 号が示してある。図に表した地盤沈下量は砂地盤全体での平均の沈下量である。新潟砂では、注水が無い状態で波を通過させると、地盤はある程度沈下（締め固まり）し、80 秒ほど経過後に $H_{ge}=0.84$ で注水を開始すると、沈下が若干もどり、波が大きく減衰し K_T が 0.2 まで小さくなる。波の作用を継続させてもこの状態が安定して続く。一方、相馬硅砂 6 号の場合、注水する前の沈下量が大きく、注水 ($H_{ge}=1.05$) を開始すると沈下がかなり戻り、 K_T も 0.2 程度まで小さくなるが、注水を継続しているにも関わらず、次第に地盤が沈下し、 K_T

も大きくなってしまふ。

(3) 地盤沈下量と波高伝達率 (相馬 珪砂 6号)

図-10は、相馬珪砂6号について地盤沈下量と波高伝達率の時間変化についてより詳細に表したものであり、地盤の初期条件(締め固まり具合)によって波高伝達率の変化傾向が異なることを示した例である。実験における初期地盤は、 $H_{ge}=2.0$ 程度で完全に液状化し、自然に沈降した状態のかなり軟らかい地盤をつくり、一定時間 T_s の間上向き浸透流の無いまま波を通過させることによって異なる初期地盤を形成し、その後注水($H_{ge}=1.05$ か 1.17)を開始している。

図の(a)は、短い周期($T=1.17$ s)である。 $T_s=0$ の場合を除いて、給水の開始時間 T_s に係わらず、 K_T は最小値 0.2 まで一旦小さくなり、その後 0.5 まで大きくなっている。また、地盤沈下量 S_{sb} もほぼこれに対応している。しかし、 $T_s=0$ sの場合は、地盤がかなり軟らかい状況から波が作用するため、高い消波効果に至らないまま地盤沈下が進んでおり、 K_T の変化はわずかである。

図の(b)は、周期の長い場合である。全体的な変化傾向は短い周期の場合と同様になっているが、 T_s が大きいくほど沈下量と波高伝達率が大きくなっていることが短い周期の場合とは異なる傾向である。これは、周期の長いほど地盤深くまで締め固まり、全体的に地盤締め固まりが不均等になりやすいと考えられる。

6. 相馬珪砂6号の場合の消波効果向上策

(1) 全体に締め固まりを小さくする

前掲図-7に示したように、等価動水勾配 H_{ge} を大きくすると波の作用による地盤沈下量 S_{sb} が0になる。新潟砂の場合は H_{ge} を1程度にすれば地盤の締め固まりはほとんどなくなり、相馬珪砂6号であっても、 H_{ge} を 1.7 まで大きくすれば地盤沈下量は0となる。しかし、この砂ではあまり柔らかくすると周期によっては消波効果が返って悪くなることもあり、制御が難しいと思われる。

(2) 地盤締め固まりのばらつきをより少なくする

① 流量を場所別に制御する方法

図-2と3に示したように、消波効果の低下の原因である地盤沈下量のばらつきを小さくする方法として、沈下量が大きい領域(波の入射する沖側部)では供給流量を増やし、他の領域では減らすことができるような流量供給システム(独立給水システム)の導入が考えられる。

② パイプの孔からの流量を制御する方法

相馬珪砂6号のように透水係数の小さな砂において

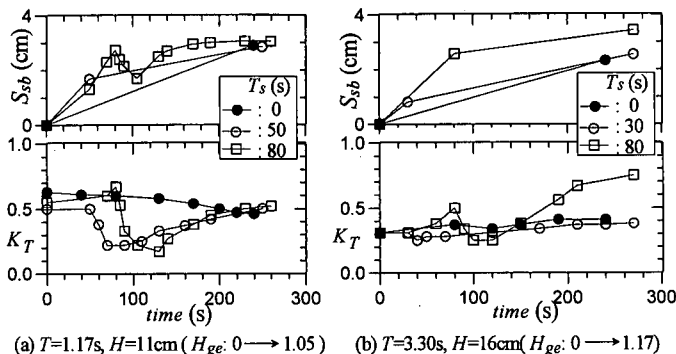


図-10 初期地盤の差による S_{sb} と K_T の時間変化 (相馬珪砂6号, $h=34.4$ cm, $P_i=6$ cm)

は、パイピングが発生するとその付近の注水孔から流量が増え、他の孔からの流量が低減し、柔らかさに大きなばらつきが発生する。こうしたばらつきは波による締め固まりによってさらに進行する。特に周期の長い波の場合に問題がある。したがって、パイピングが発生してもその付近のパイプ孔からの流量が増加しないよう抑制することが必要となる。その方法として、(i)注水孔を小さくする方法、(ii)孔の流量係数を流量が増大するほど小さくする方法がある。透水係数の小さい砂の場合には、前者の方法はほとんど効果がなく、後者の方法が有効であるが、後者の具体的方法についてはさらに検討が必要である。

7. あとがき

本研究で得られた主要な結論は以下の通りである。

(1) 新潟砂のような通常の砂では、注水パイプ間隔を地盤厚さの10%程度以下に小さくすると、①より均一な液状化地盤の形成が可能となり、②広い水深波長比の条件で高い消波効果が安定的に得られ、特に③水深波長比の小さい波ほど供給流量の節約が図れる。

(2) 相馬珪砂のような細砂の場合にも、高い消波効果が得られる。ただし、地盤の締め固まりと特に締め固まりの不均一性による消波効果の低下がある。

今回の実験結果を含め、液状化消波装置の設計法がほぼ確立されている。現在、大規模な実用化試験装置の試験設計を行っており、今回の検討で残された問題点を含めて実験を行う予定である。

参考文献

- 姜 関求・高橋重雄・鈴木高二朗・三浦裕信・朴 佑善 (1997): 砂地盤の液状化消波システムの消波効果, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 706-710.
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.