

# 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

高橋重雄\*・下迫健一郎\*\*・山本 悟\*\*・三浦裕信\*\*

## 1. ま え が き

砂地盤が液状化する要因には、大きく分けて二つあり、一つはよく知られているように、地震時におけるせん断変形によって過剰間隙水圧が発生して生じる。もう一つは、地盤内の上向き浸透水の圧力が大きいときに生じ、ボイリングやクイックサンドとして知られている。この現象は波によって生じる砂地盤内の間隙水圧の圧力勾配によっても生じ、これがブロック等の沈下や砂地盤の洗掘の一つの原因と言われている。

本研究では、ボイリングによって液状化した砂地盤の基本的特性を明らかにする事を目的としている。特に液状化した地盤の注目すべき特性の一つとしてその消波能力について検討する。液状化した砂地盤による消波とは、液状化した地盤上を波が通過すると波によって砂が動き、この時砂粒子間にせん断摩擦力が発生して波のエネルギーを消費し、進行する波を低減させるものである。

## 2. 実験の方法

二次元小型水路において水理模型実験を実施した。砂地盤を液状化させる試験装置は、造波水路内に図-1のような砂地盤層を設けこの底面にパイプを埋設し、このパイプから砂地盤内に水を供給するものである。

実験は、以下の4つの項目に分けて実施している。

- ①上向き浸透流試験：ボイリングの発生条件の把握
- ②流動特性試験：液状化した砂地盤の基本的特性の把握
- ③沈下試験：液状化砂地盤上のブロック沈下速度の測定
- ④消波性能実験：液状化砂地盤上の波高伝達率の測定

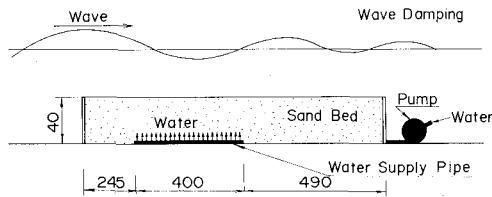


図-1 液状化消波システム実験断面図

なお、砂地盤の長さは11.4 mである。パイプは長さ4 mで内径13 mmであり、2 mmの穴を側面に3 cmおきにあけてあり、これを6本水路の長手方向に平衡に敷設した。したがって、液状化の対象とした地盤の長さは11.4 mのうち4 mである。パイプの一端はポンプにつながっており、途中にバルブを設けて流量を調整できるようにした。砂地盤の厚さは20 cmと40 cmの2種類であり、間隙水圧計、波高計、砂面計等を用いて計測を行った。間隙水圧計は、水路底面から高さ1, 10, 15 cmに置かれ、底面付近のものは中央付近の二本のパイプの間においてあり、パイプから4 cm離れている。

## 3. ボイリングの発生とその性質

### (1) 間隙水圧と上向き浸透流

図-2は、パイプから水を供給したときの圧力と流量の関係を示すもので、横軸は流速、縦軸は動水勾配（間隙水圧/砂地盤の高さに相当する水圧、動水傾度ともいう）である。また縦軸には体積の変化率も示している。図には、吉見(1991)が実施した上向き浸透流試験結果による動水勾配と流速の関係も示しているが、通常の試験では動水勾配と流量はダルシー則にそって線形な関係を示し、限界動水勾配の圧力以上の上昇はなく、ボイリング状態となる。限界動水勾配  $i_{cr}$  は、基本的には水圧がその砂を持ち上げる限界であり、砂の湿潤密度から求められ、吉見の実験では  $\gamma_t = 1.9 \text{ gf/cm}^3$  で  $i_{cr} = 0.9$  である。

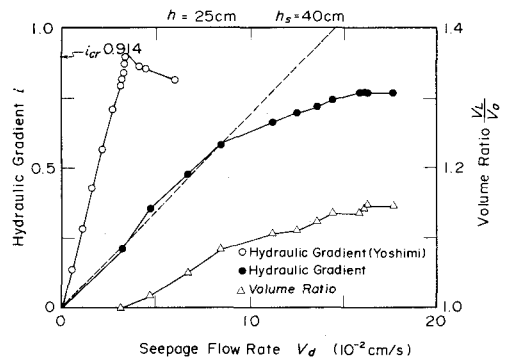


図-2 上向き浸透流試験結果

\* 正員 工博 運輸省港湾技術研究所水工部耐波研究室

\*\* 正員 運輸省港湾技術研究所水工部耐波研究室

また、透水係数はこの線の勾配から  $0.038 \text{ cm/s}$  となる。これに対して今回の実験では、砂の湿潤密度  $\gamma_t = 1.91 \text{ gf/cm}^3$  で  $i_{cr} = 0.91$  であるが、実線で示した結果では、限界動水勾配の 60% 程度まではほぼ線形であるがそれ以上ではボイリングが一部発生しており、圧力の増加は頭打ちとなっている。このパイプによる給水では、かならずしも水が一様に入っていないために、部分的なボイリングが発生していると考えられる。本報告でいう液状化は、この部分的なボイリング状態も含めている。

なお、実験に用いた砂の透水係数は  $0.14 \text{ cm/s}$  であり、きれいな砂の透水係数に相当する。すなわち、限界動水勾配程度の間隙水圧であっても  $0.14 \text{ cm/s}$  の上昇流速となり、長さ  $4 \text{ m}$  幅  $0.48 \text{ m}$  の砂地盤面積に対して  $2700 \text{ cm}^3/\text{s}$  の流量となる。いいかえれば、水が  $40 \text{ cm}$  の砂地盤を通過するには、限界動水勾配の程度の圧力であっても約  $290$  秒かかり、砂地盤中の水の動きは小さいことが理解できる。

## (2) 流動化と洗掘

液状化した砂地盤の特性の一つはもちろん砂の流動化であり、砂面は常に水平を保とうとしており、液状化した砂面ではリップルができない。リップルができないため、液状化した砂地盤では砂が移動しにくいとも考えられる。実際、何ケースも波を作用しても、実験の範囲では砂の移動は認められなかった。

しかしながら、液状化は一般に洗掘の原因とも考えられている。したがって、実験波では水粒子の速度が十分ではなかったと考えられるので地盤に噴流を作用させてそれによる変化を調べた。すなわち、流速  $104 \text{ cm/s}$  (流量  $520 \text{ cm}^3/\text{s}$ ) の噴流を砂地盤に高さ  $20 \text{ cm}$  の位置から水平から下に角度  $20^\circ$  で作用させたときの砂の舞い上がりを調べており、通常の砂地盤と液状化した砂地盤とを比較している。液状化した方がやや舞い上がりが大きいですが、結果的に洗掘された深さは通常の砂地盤の方が  $13 \text{ cm}$  で、液状化した地盤はほとんど洗掘されていない。これは、洗掘されても流動化した砂でそこが埋め戻されるためである。砂の舞い上がりが大きいのも、液状化した砂地盤では、舞い上がる砂が常にそこに供給されるためとも考えられる。

埋め戻しの現象をさらにはっきり示すために、まず給水を止めた状態で砂地盤に穴を掘りマウンドを造った後、給水を再開した場合の砂地盤の変化を調べた。間隙水圧は限界動水勾配の 70% 程度であるので完全なボイリング状態ではなく、マウンドはある程度残るが穴はかなり埋め戻されている。そこに波を作用させると砂地盤が動き、完全に埋め戻される。液状化は洗掘とも大きく関わっているとは考えられるが、この簡単な実験では流れによる砂の舞い上がりもそれほどなく、たとえ洗掘さ

れても埋め戻されており、液状化した地盤が洗掘され易いと必ずしも言いがたい。

## (3) ブロックの沈下

図-3 中の写真は、液状化した砂地盤上の高さ  $8 \text{ cm}$  で  $250 \text{ g}$  のブロックが沈下していく様子を示すものである。液状化した砂地盤の特徴の一つは、やはりせん断強度の低下による地盤上や地盤中の構造物の沈下、破壊である。

このブロックの沈下を定量的に把握するために、一個の異形ブロックを砂地盤上に置き、その沈下速度(沈下し始めてからその  $1/2$  が沈下するまでの時間)を測定した。この実験では砂地盤の底面から水を供給するのであるが、以下の 3 種類の方法で実施している。

- ① 定常圧 (一定の間隙水圧)
- ② 片側変動圧 (バルブ開度を変え、5 秒間隔でゼロと所定の間隙水圧を繰り返す)
- ③ 両側変動圧 (波による間隙水圧の変化を考慮し、バルブによってパイプから給水と排水を 5 秒置きに繰り返す)

図-3 は、実験結果であり、横軸に動水勾配(変動圧の場合はそのピーク値)をとってブロックの沈下速度を示すものである。比較的小さな動水勾配ではほとんど沈下は生じないが、限界動水勾配の 60% 程度から沈下が急速に進むようである。すなわち、完全なボイリング状態でも、上向き浸透流によって砂がゆるみ、ブロックの沈下となっていると思われる。

波による間隙水圧が原因とされるパイプラインの破壊やブロックの沈下については、山本 (1983)、善 (1993)、名合 (1991)、前野 (1990)、酒井 (1993)、岩垣 (1993) らの研究があり、現在では善らのいうように間隙水圧の圧力勾配  $dp/dz$  が水中単位体積重量を越えるとき(限界動水勾配のとき)に発生すると考えられている。しかしこの実験結果では、完全なボイリング状態でも発生する可能性もあると考えられる。

なお写真-1 のように、高さ  $40 \text{ cm}$  幅  $39 \text{ cm}$  長さ  $48 \text{ cm}$  水中重量  $123 \text{ kg}$  のケーソンを長さ  $100 \text{ cm}$ 、幅  $48 \text{ cm}$ 、高さ  $20 \text{ cm}$  の透水性ジオテキスタイル上に載せて砂地盤に上向き浸透流を作用させると、90 秒でケーソン後端が  $6.8 \text{ cm}$  沈下して傾いている。この場合の動水勾配は  $0.7$  程度であり、液状化はかなり進んでいるはずにもかかわらず、沈下は少ない。よく見ると、ジオテキスタイルの下の砂地盤はボイリング状態にはなっていないが、それ以外の所で液状化しており、その境界付近の砂が横方向に押し出されてマウンドとともに傾いて沈下している。すなわち、ケーソンの下の砂地盤ではその重量によって有効応力が大きくなるために液状化していないようである。構造物がある場合には単に  $dp/dz$  だけでなく、その上載荷重の影響や排水条件についても考慮する必要が

あることを示している。これについてもさらに検討する予定である。

#### 4. ボイリングした砂地盤による消波

##### (1) 測定記録例

図-4は、砂地盤の厚さ40cm、地盤上水深25cmで  $T=1\text{ s}$ 、 $H=8\text{ cm}$ の波が作用した場合の測定記録である。4つの波形のうち上段、中段上、下段が波高、中段

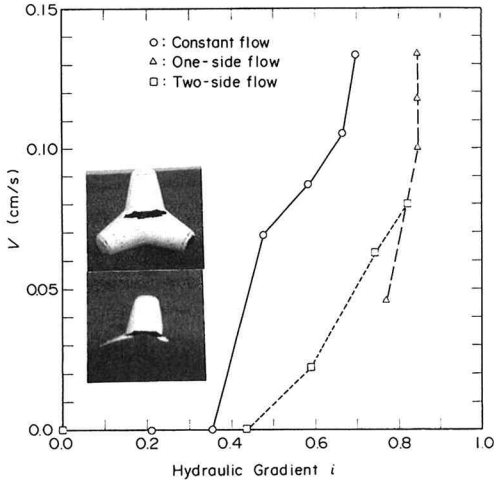


図-3 ブロックの沈降速度

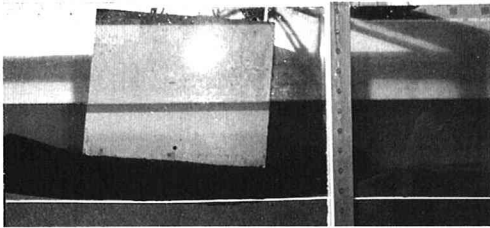


写真-1 ケーソンの沈下

下が砂の上面の動きである。砂面の動きは砂面計で計測している。地盤に水を供給し始めると、波に連動して砂が上下に動き、地盤上を通過した波の波高が大きく低下し伝達率は0.25となっている。このときのバルブの開度は、 $3/8$ であり、動水勾配は0.47である。砂は、水面より位相が0.15秒程度早く、上下に0.6cm程度動いている。

##### (2) 間隙水圧と波高伝達率

図-5は、横軸に動水勾配をとり波の伝達率を示すものである。地盤の厚さが40cmの場合であり、それぞれ3種類の波と二つの水深について実験したものである。水深25cmでは、限界動水勾配の50%程度で伝達率は最も小さくなり、30%以下に達することがある。すなわち、前掲図-4の測定例で示した  $T=1.0\text{ s}$ 、 $H=8\text{ cm}$ では、動水勾配が0.47で波高伝達率が0.25であり、 $T=1.6\text{ s}$ 、 $H=8\text{ cm}$ で波高伝達率が0.28となっている。 $T=2.0\text{ s}$ 、 $H=8\text{ cm}$ でも、0.42と比較的小さい値である。ただし、水深が2倍で周期が $2^{1/2}$ 倍の場合には、動水傾度0.7程度でも波高伝達率は0.6程度とやや高いままである。

図-6は、前図と同様であるが、地盤の厚さが20cmと1/2倍にした場合である。この地盤厚さで水深が25cmでは、動水勾配が0.77程度でも波高伝達率はやや高く0.58から0.7程度である。水深が40cmのケースでは、同じ周期で約2倍の波高であるが、波高伝達率は0.7から0.9とかなり高くなってしまふ。

図-7は、波作用時の間隙水圧を調べたものであり、間隙水圧の波による変動成分(半振幅)とゼロレベルの給水前からの上昇分を示している。同じバルブ開度で波作用前(静水時)の間隙水圧のゼロレベルが同じであっても、波の作用によって間隙水圧のゼロレベルが変わることが興味深い。これは、砂の動きによって透水係数が実質上変わるためではないかと考えられる。この傾向は、バルブ開度が小さい(静水時の動水勾配が小さい)とき

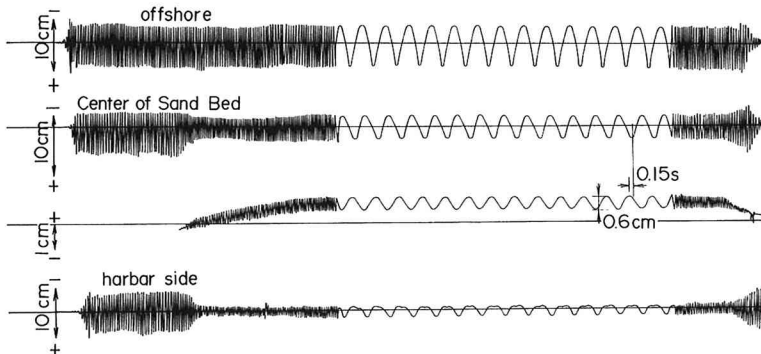


図-4 測定記録例

に顕著であり、バルブ開度が大きいときには見られないことにも注意する必要がある。これは、少しでも上向き浸透流があると波によって液状化が発生しやすくなる可能性を示しており、特に注目すべき点である。なお間隙水圧の変動成分を見ると、バルブ開度が大きいほど大きくなっており、やはり液状化するほど波の圧力が砂地盤内に伝播する。

図-8(1) と (2) は、波作用時の砂面の動きの測定結果であり、砂面と水面の位相差と波高に対する砂面の全

振幅の比を示している。動水勾配が大きいほど砂面の動きは大きくなり、位相差は0に近づいているのが分かる。周期が1sで動水勾配が0.6付近では、砂面の全振幅は波高の10%近くあり、位相も約周期の1/10(40°)程度進んでいる。データはばらついているが、これは砂面の振

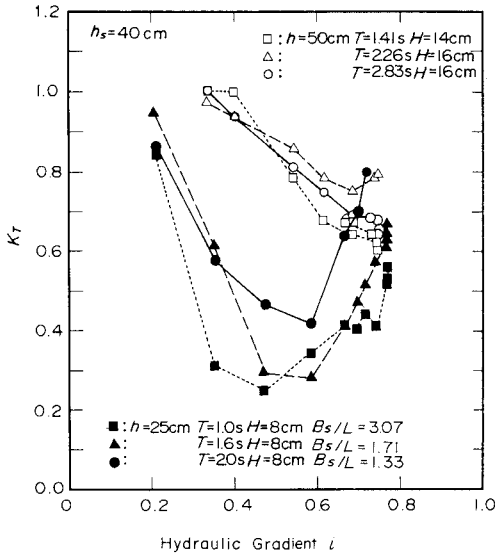


図 5 動水勾配と波高伝達率 ( $h_s=40$  cm)

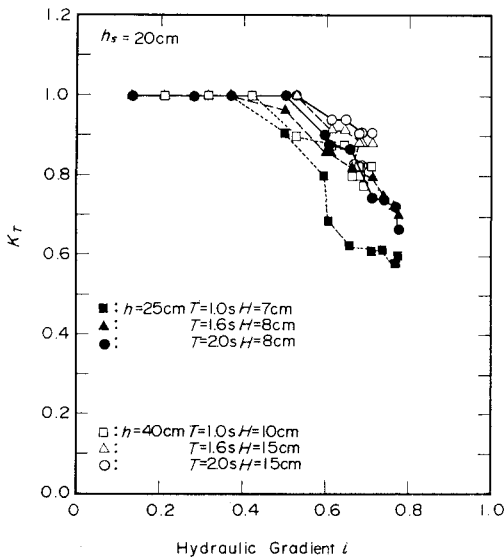


図-6 動水勾配と波高伝達率 ( $h_s=20$  cm)

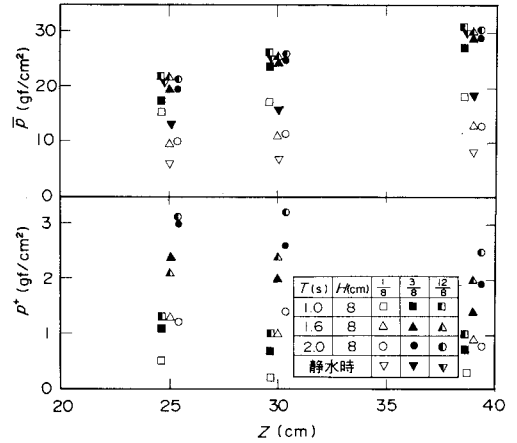


図-7 間隙水圧の変化

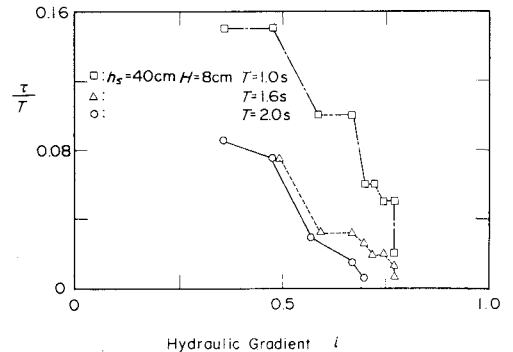


図-8(1) 砂面の動き (振幅)

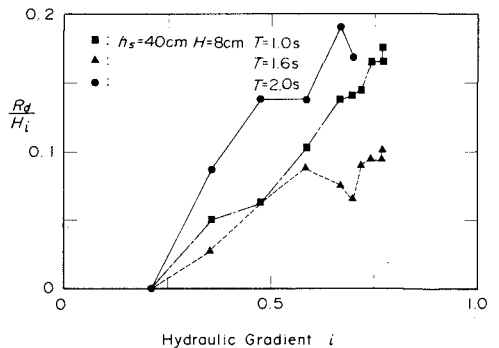


図-8(2) 砂面の動き (位相)

動が必ずしも正弦波でないことによる読み取りの困難さも一因である。特に周期の長い場合は液状化させている砂地盤が有限であるためか、乱れた波形となっている。

図-5~8より以下のことが考えられる。

①基本的には、地盤層が厚いほど、水深が浅いほど波高伝達率は小さくなっている。周期の影響は、当然  $B_s/L$  が長いほど、すなわち周期が短いほど波高伝達率は小さくなるようであるが、後で述べるように  $h/L$  が小さいほど、すなわち周期が長いほど波高伝達率が小さくなる傾向もあり、特に  $T=1.0\text{ s}$  と  $1.6\text{ s}$  の差が比較的少ない。

②最適な動水勾配は波の波高や波長によって変わる可能性がある。すなわち、波の作用によって砂の流動化が促進される傾向があり、それによって最もエネルギーを消費する動水勾配が見かけ上変化することも考えられる。

③図-5の水深が50 cmのケースは、図-6の水深が25 cmの場合と比べると、水深だけでなく地盤厚さ、波長  $L$ 、波高がほぼ2倍となっている。ただし、地盤の長さ  $B_s$  は同じままである。したがって実験縮尺が2倍になった場合には、 $B_s$  が  $1/2$  になってもそれほど波高伝達率の変化は少ないことがわかる。これは、後で述べる模型が大きいほど波高伝達率が小さくなる可能性を示している。

### (3) 地盤による消波の考え方

地盤の動きによる波浪減衰については、山本・高橋(1985)の研究があり、半無限の地盤の場合の波浪減衰について線形の簡略式を示している。それによれば、入射波  $H_i$  が  $x$  だけ進行して減衰を受けるとき波高  $H$  は

$$H = H_i \exp(Dx) \quad \dots\dots\dots (1)$$

で表され、減衰係数  $D$  は浸透水による減衰を無視して、地盤粒子間の摩擦による減衰を簡単に表すと

$$D = -kU_{zi}(0)/(nH_i \cosh kh) \quad \dots\dots\dots (2)$$

で表される。 $k$  は波数、 $h$  は水深で  $n$  は群速度と波速の比、 $U_{zi}(0)$  は地盤の動きの虚数部である。この式は、そこの地盤の動きが大きく位相差があると波高が減衰することを表している。地盤の動きの虚数部を簡単に表すと、

$$U_{zi}(0) = p_0 \delta / 2Gk \quad \dots\dots\dots (3)$$

となる。すなわち、地盤表面の水圧  $p_0$  が大きいほど、地盤の土のせん断弾性係数  $G$  が小さいほど、土の減衰定数  $\delta$  が大きいほど、そして周期が長いほど大きくなる。したがって、減衰係数は  $\rho_f$  を水の密度として、

$$D = -\rho_f g \delta / (4nG \cosh^2 kh) \quad \dots\dots\dots (4)$$

となる。ただし、この  $G$  や  $\delta$  は歪によってかわり、その歪レベルでの値を使う必要がある。例えば、図-4のケースでは  $D=0.35\text{ m}^{-1}$ 、 $G/\delta=1600\text{ N/m}^2$  となり、 $\delta$  を  $0.1$  から  $10$  と考えても  $G$  はかなり小さくなる。この式では、地盤が柔らかく減衰定数が大きいほど、そして波長が長く水深が小さいほど波高減衰が大きいことになる。しか

し、これは半無限深さの液状化地盤が無限に続く場合であり、実際には液状化した地盤の深さや長さや波長の比が大きく影響すると考えられる。実験結果は、以上の簡略式で表される波高減衰の傾向に比較的一致しているが、さらに検討を進める必要がある。なお、同じ地盤であれば、現地も模型も  $D$  が同じになるため、 $D$  と距離  $x$  の積である波高減衰は、現地の方が大きくなると期待できるが、大型の実験で確かめる必要がある。

## 5. あとがき

ポイリング状態の砂地盤の特性について基礎的な実験を行った。特に、その地盤に波が作用した場合を検討し、液状化した砂地盤に消波機能があることを明らかにした。これを波浪制御システムとして用いるには、液状化するためにエネルギーが必要であり、またある程度の面積が必要である等の問題がある。しかし構造物を必要としなく、また必要なときだけ稼働させることができるので、防波堤の開口部や重要な船舶のための波除堤としての利用をまず考えていきたい。必要なエネルギーについては波エネルギー変換装置から供給する事も考えられる。今後は理論的な検討を行うとともに、さらに大型の実験を実施する予定である。

なお消波だけでなく、液状化した砂地盤の特性についてもさらに検討を進めて行きたい。砂地盤の液状化については、港湾技術研究所の上部産生構造振動研究室長および善功企動土質研究室長から貴重な助言を得ている。また高山知司水工部長からは、全体にわたって貴重な助言を得ている。ここに記して感謝の意を表する。

## 参考文献

- 岩垣雄一・西口松雄・奥田雄司 (1993): 変動水圧による砂地盤と構造物の鉛直変位に関する研究, 海岸工学論文集第40巻, pp. 591-595.
- 酒井哲郎・後藤仁志・山本哲也・柏村真直 (1993): 水圧変動と振動流の同時作用下での砂地盤上のブロックの沈下, 海岸工学論文集第40巻, pp. 811-815.
- 善功企 (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, 122 p.
- 名合宏之・前野詞朗・西岡 操 (1991): 変動水圧による構造物の沈下機構に関する研究, 海岸工学論文集第39巻, pp. 826-830.
- 前野賢彦 (1990): 遠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.
- 山本督夫・高橋重雄・SCHUCKMAN, B. (1983): Physical Modeling of Sea-seabed Interactions, ASCE, EM, Vol. 109, No. 1, pp. 54-72.
- 山本督夫・高橋重雄 (1985): Wave Damping by Soil Motion, ASCE, WW, Vol. 111, No. 1, pp. 62-77.
- 吉見吉昭 (1991): 砂地盤の液状化, 技報堂出版, 182 p.