

ケーソン式護岸背後の沈下災害に関する一実験

Wave Flume Experiment on the Settlement of Reclaimed Sand behind a Caisson-type Seawall

高橋重雄* 下迫健一郎* 山本 悟*

善 功企* 山崎浩之*

TAKAHASHI, S., SHIMOSAKO, K., YAMAMOTO, S., ZEN, K., and YAMAZAKI, H.

A model experiment is conducted in a large wave channel to reproduce the settlement failures of caisson type seawalls. Due to wave overtopping and wave transmission through the rubble mound, the reclaimed sand is washed down through the back-fill rubble stones. The pore pressure variation in the rubble stones and reclaimed sand can well explain the through-wash of the sand.

1. まえがき

近年、沖合人工島や空港用の埋め立て地などが、比較的波浪の厳しい海域に造られるようになっており、防波堤を設けず、厳しい波を直接受ける防波護岸が造られる場合が少なくない。その設計では、護岸本体の耐波安定性の確保や越波対策の確立などいくつかの課題について十分な検討が必要であるが、特に重要なものの一つに護岸背後の沈下防止がある。たとえばケーソン式埋立護岸の背後には、通常は土圧軽減のために裏込め石が充填され、その上に埋め立て土砂が投入される。この埋立土砂が吸い出しを受け、場合によっては局所的な陥没や全体的な沈下が発生する事がある。

近年、こうした防波護岸が急速に施工される事例が多くなっており、実際に沈下災害も少なくない。本研究は、ケーソン式の防波護岸を対象に、護岸背後の沈下災害のメカニズムについて検討するものであり、現在実施中の水理模型実験によって明らかとなった事項について報告するものである。

2. 実験の方法

実験は、当所の大型造波水路で実施した。水路は105mの長さがあり3mの幅があるが、その内の80cmの測定水路内に図-1に示すようにケーソン式護岸の模型を設置し測定器をとりつけた。

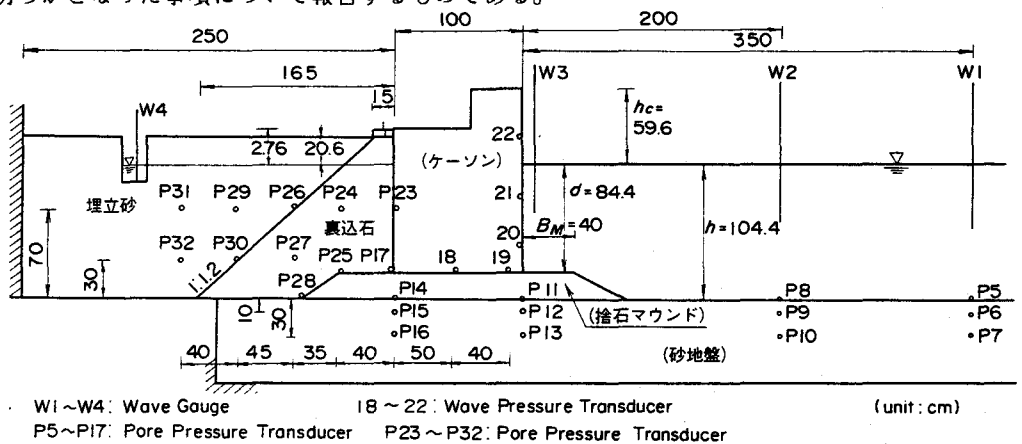


図-1 水路内の模型と測定器

マウンドと裏込め

部は碎石、埋立部は砂を用いており、その粒径等は表-1に示すとおりである。こうした砂と碎石を用いる事によって、粒径だけでなく透水係数等がフルードの相似則を満たすことができなく、結果の解釈上注意が必要である。また、防砂シートとして現場では透水性のシートを用いることが多いが、ここでは結果を分かりやすくするため厚さ1mmのビニールシートを用いた。図-1の断面は、この実験の基本断面であり、上部の舗装が無い施工途中を対象としたものである。この断面では防砂シートは、裏込め石と埋め立て砂の間にのみに敷設しており、マウンド上側には置いていない。ケーソン目地(ケーソンと水路側壁)は、完全に波を遮蔽するようにしている。

図-2は、実験を行ったケースを示すものであり、護岸の施工段階を考慮して実験断面を選定している。ただし、シートの効果を検討するために、シートを敷設した基本断面(ケース2)の他に、シートに穴をあけたケース(3)と、シートを取り外したケース(4)、さらには波面の動きが大きい静水面付近から上にシートを設け

表-1 石材、砂の諸元

対象	埋立砂	裏込め石
空隙率 n	0.445	0.529
湿潤密度 γ , gf/cm ³	1.90	1.74
乾燥密度 γ_s	1.49	1.21
実質部分の密度 γ_s	2.70	2.58
10%粒径 mm	0.13	—
平均重量/個 gf	—	19.5

* 運輸省港湾技術研究所 〒239 横須賀市長瀬3-1-1 FAX: 0468-42-7846

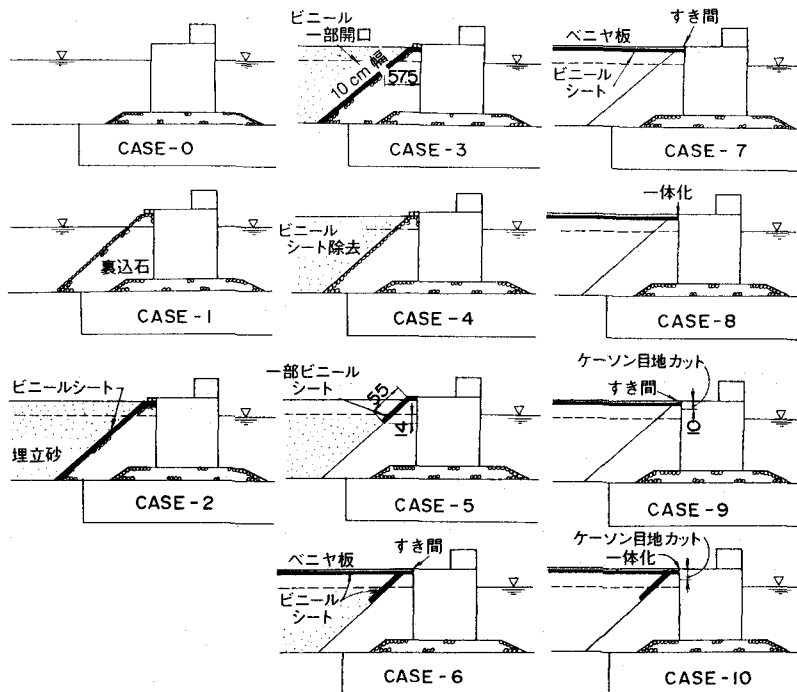


図-2 実験断面

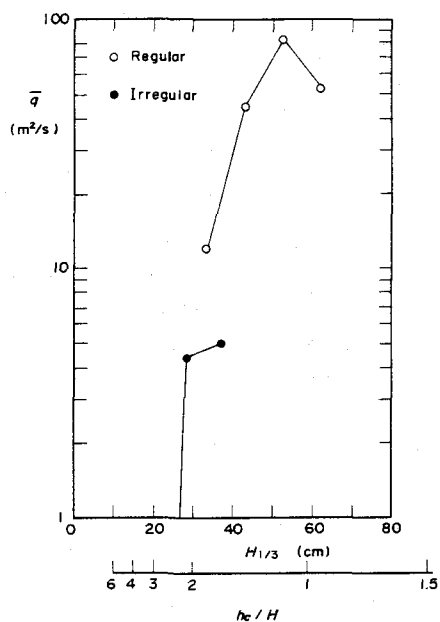


図-3 実験波の波高と越波伝達係

たケース(5)を実施している。このほか、基本断面では越波水による直接的な影響が大きいので、天端面に舗装がある場合を想定してベニヤ板を設置したケース(6)から(8)も実施している。さらに舗装版の目地の効果やビニールシートの効果を見る実験(9)(10)も実施している。実験は、このケース順に行っており、実験によってマウンドや裏込め内に入り込んだ埋立砂は取り除かず、天端面の砂を補給して実験を続けている。

実験では、主に周期3sの規則波を作用させている。図-3は、実験波の波高(護岸の無いときの通過波高)とそれをこの護岸に作用させたときの平均越波量をまとめたものである。通過波高が61.9cmの場合には52.4cmの場合より越波量が低下している。これは、61.9cmの場合は重複波の峰が崩れる碎波状態になるためと考えられる。天端高 h_c は59.6cmであり、 $H=61.9$ cmのケースであっても $h_c/H=0.96$ と比較的高いが、規則波であるため平均越波量は $52.7\text{cm}^3/\text{s}/\text{cm}$ と大きい。11波の測定対象波によって実験模型の250cmの護岸部で排水されないと仮定すると7cmの水位となる。ただし、測定対象波の前に6波の波がありそのうち3波は、測定対象波程度であることに留意する必要がある。

また、図には同じ周期の不規則波の越波流量を示している。規則波の波高が不規則波の最高波高に対応すると考えると、実験不規則波では最高波高が61.9cmの場合の有義波高は37cmに相当しており、 $h_c/H_{1/3}=1.61$ となる。この有義波高の場合の平均越波流量は $5.1\text{cm}^3/\text{s}/\text{cm}$ であり、最高波高に相当する規則波の越波流量の約1/10である事に注意する必要がある。模型縮尺を1/16と仮定すると、現地での有義波高5.9mの平均越波流量は $0.033\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ となり、通常の護岸に対する許容平均越波流量 $0.02-0.05\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ の範囲にある。ただし最高波に近い波が続く場合はかなり大きな越波量となる事が分かる。

3. 沈下状況

(1) 防砂シートの効果

写真-1は、基本断面(ケース2)で波高が42.8cmの場合の裏込めと埋立砂の部分を示すものである。越波がほとんど無いときでもマウンドからの透過波によって水面が変動し、それによって防砂シートとガラスの部分にすきまが生じ、そこから波の作用によって砂粒が落下している。

写真-2は、波高が61.9cmの場合であり、越波が比較的多くなると、越波水によって裏込め天端付近の砂が後方に運ばれるとともに、その部分のシートとガラス面との間に隙間ができそこから砂が流れるように落下している。その砂は、落下の途中で裏込め石の間に引っかかるようにしてたまっているのがよくわかる。裏込め石内の水面は越波水の流入によって上昇し、最初から14波目(測定波の8波目)では静水面上+5cmから+15cmの変動となっている。

ケース3では、シートが破損した場合を考え、やや大きめの穴をあけて実験をした。写真-3は波高が42.8cmの場合であり、やはり越波が少ない状況でもマウンド透過波によってシートの穴から砂が落下する。砂の落下によって静水面上の砂の中に空洞ができるのが興味深い。また写真の下の方に落下した砂がたまっているのがわかる。

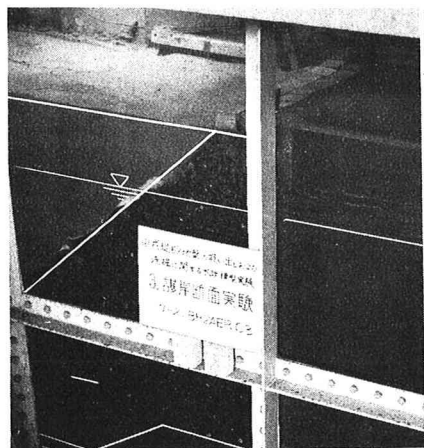


写真-1 シート隙間からの砂の落下 (ケース 2、 $H = 42.8\text{cm}$)

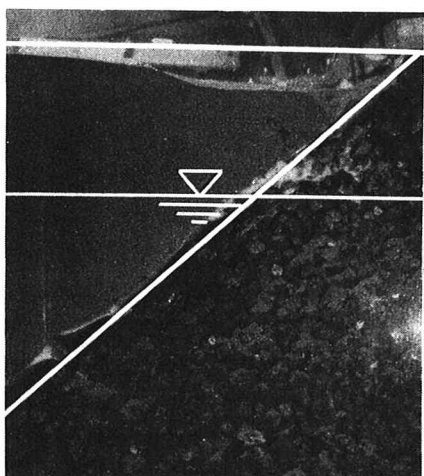


写真-2 越波水による砂の移動とシート隙間からの砂の落下 (ケース 2、 $H = 61.9\text{cm}$)

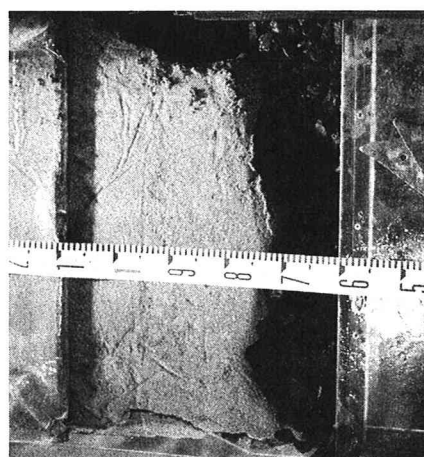


写真-7 舗装目地部の砂の流失 (ケース 7、 $H = 61.9\text{cm}$)

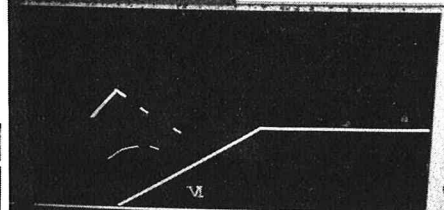
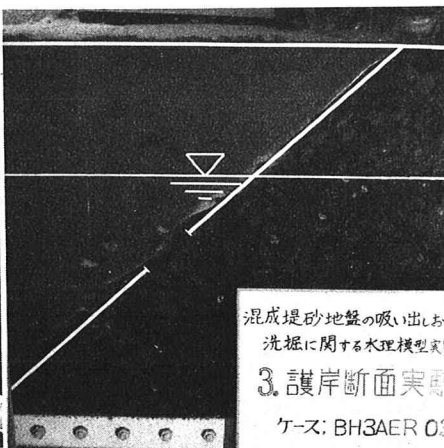


写真-3 シートの穴からの砂の落下と空洞 (ケース 3、 $H = 42.8\text{cm}$)

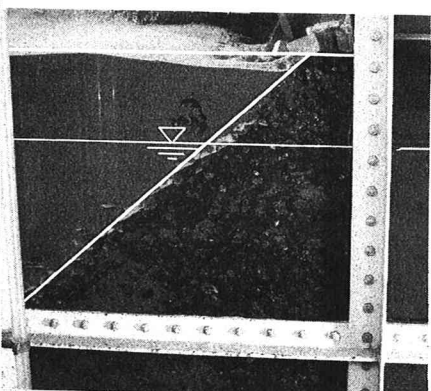


写真-5 シートが無い場合の砂の落下と空洞 (ケース 4、 $H = 42.8\text{cm}$)

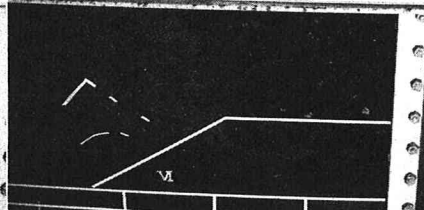
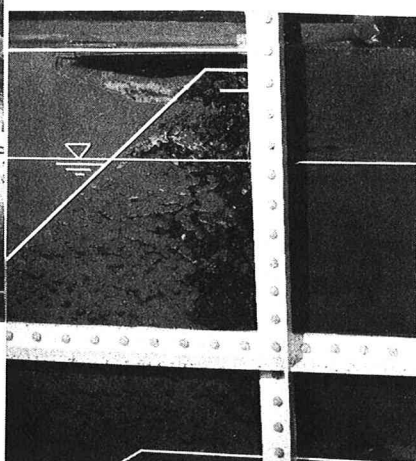


写真-4 越波による砂の移動とシートの穴からの砂の落下 (ケース 3、 $H = 61.9\text{cm}$)

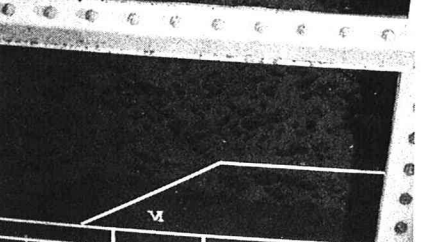
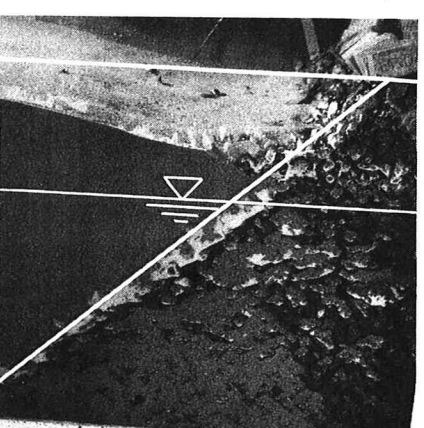


写真-6 シートが無い場合の越波による砂の移動と砂の落下 (ケース 4、 $H = 61.9\text{cm}$)

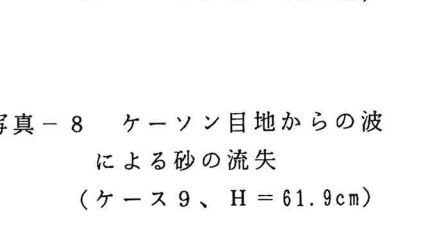


写真-8 ケーソン目地からの波による砂の流失 (ケース 9、 $H = 61.9\text{cm}$)

写真-4は、波高が61.98cmの場合で、越波が比較的多くなると越波によって砂が後方に運ばれるが、同時に越波水の浸透によってシートの穴からの砂の流失が促進される。シートに穴がない場合に比べシートの穴の上部における沈下が大きい事が分かる。

シートは破損したりしなければ砂の落下を防ぐ事ができるが、一方シートがない場合には、写真-5のケース4のように、越波が少ないときにもマウンド透過波によって砂は裏込め石内に容易に落下する。特に水面が裏込めと埋立砂との境界線と交わる付近で激しく、埋立砂の中に直径10cm程度の明確な空洞ができる。裏込め石内の水面の動きはケース2とほぼ同様であった。

写真-6は波高が61.9cmの場合であり、越波が大きくなると越波水の浸透によって砂が裏込め石の中に入っていく、砂を補給してこれを繰り返すと写真のようにケーソン付近を除いてほぼ砂が充填されたようになる。静水面下での裏込め部の砂と碎石の重量比が1:1.61となっており、碎石間の空隙の88%が砂（砂の空隙率0.445を仮定）で埋められたと考えられる。

この場合の目視できる裏込め石内の水の動きは、ケーソンに近い部分に限られ、越波水によって次第に上昇しながら上下に振動するようになる。ただし、14波目付近では上からの越波水で裏込め石内が満たされてしまっている。

写真-6の状態でも砂を補給しても越波水と透過波によって砂は流失してしまう。そこでケース5では、静水面下14cmから天端面にかけて防砂シートを隙間ができないように設置した。これによって越波水は砂面上にたまり、砂面が掘れ易くなるが、もちろんシートからの砂の落下はなくなる。

(2) 舗装版の効果

舗装版を設けると、埋立砂への越波の直接的な作用を無くなるが、舗装目地からの砂の流失が問題となる。ケース6では、ビニールシートが完全に砂を囲っているために砂の流失はなかったが、ケース7ではケーソンとベニヤ板やベニヤ板と水路側壁との隙間から越波水が流れ込み、写真-10（ベニヤ版をはずして砂の流失状況を見たもの）に示すようにケーソンに近い埋立砂が流失している。ただし、ケース8のようにケーソンとベニヤ板との隙間を無くすると、こうした大きな砂の流失はなくなるが、それでもケーソンとベニヤ版の間で側壁に接する部分が弱く隙間ができて、この部分の砂が流失した。やはり、完全に隙間をなくす事は困難であり、逆に一部にあらかじめ隙間（排水口）を造り、越波水をそこから裏込め内部に排水するとともに、マウンド透過波による圧力の影響を軽減する必要があると思われる。

(3) ケーソン目地の効果

これまでの実験は、ケーソン目地が十分止水している事を想定していたが、実際にはケーソン目地が破れる場合も少なくない。ケーソン目地が破れると、ケース9のようにその付近の埋立部の砂はもちろん、裏込め石の中の砂も洗われてしまう。写真-12は、静水面上のケーソン目地が破れたときに、その付近の砂が流失している状況である。ただしケース10のように、埋立部の砂は防砂シートが十分な強度で隙間がなければ流失しない。

4. 内部の水圧と水粒子の運動

(1) 基本断面の場合における圧力分布

図-4は、基本断面でH=61.9cmの場合の測定波形を示すものである。水位と水圧の波形であるがいずれも造波以前の状態をゼロレベルとしている。ケーソン前壁での波圧(20ch)の双山型重複波圧波形がケーソン底面で一つ目のピークが削られるように変形され、裏込め石内では鋸型の波圧波形となっているのが興味深い。マウンド下や埋立砂中の波形は滑らかであり、特に埋立砂中ではその振幅が小さくなっている。裏込め石や埋立砂、さらにはマウンド中においても水圧のゼロレベルが上昇しており、越波水による影響が認められる。

このような圧力の伝播状況は、図-5によってもよく分かる。この図は測定波中の8波目について示しており、水圧のゼロレベルの上昇量（静水圧上昇分と呼ぶ）を円の大きさと表し、矢印で変動圧力のピーク値とその位相

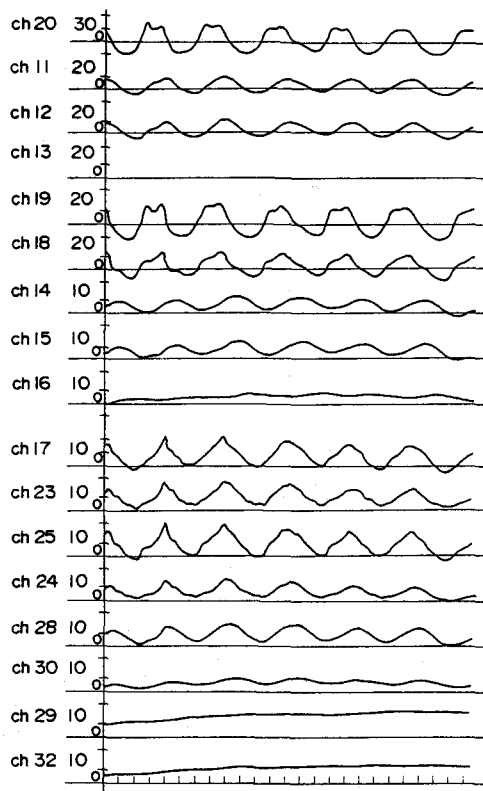
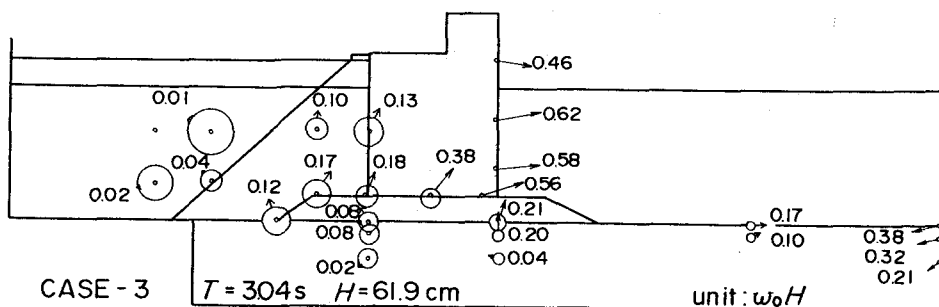


図-4 測定波形の例

を時計回りで表している。裏込め石内では位相が90°近く遅れケーソン後壁のch 23では変動圧力が1/4以下となっている事が分かる。埋立砂内では、裏込め石との境界付近まではまだ変動圧力は残るもの

の、内部ではほとんど消えているのが分かる。また、円の大きさを示す静水圧上昇分が想像以上に大きく、ケーソン前面の波圧（変動圧力）のレベルに達しており、越波水の影響が顕著である事が分かる。



(2) ケーソン後面（裏込め部）の間隙水圧

図-6 は、ケーソン後面で静水面下34.4cmにおける圧力（ch23、間隙水圧）の測定値である。横軸に波高をとり、各ケースにおける測定対象の第8波目におけるゼロレベルの上昇分（静水圧上昇分）とそこからの変動成分（ピーク値）を示すものである。ただし、ケース1' は、護岸の天端をさらに32cmかさ上げして越波量を減少させたものである。この図によって、越波水の影響や透過波による圧力の伝播について、埋め立て砂や防砂シート（ビニールシート）、舗装版（ベニヤ版）、さらにはケーソン目地の影響が以下のようにわかる。

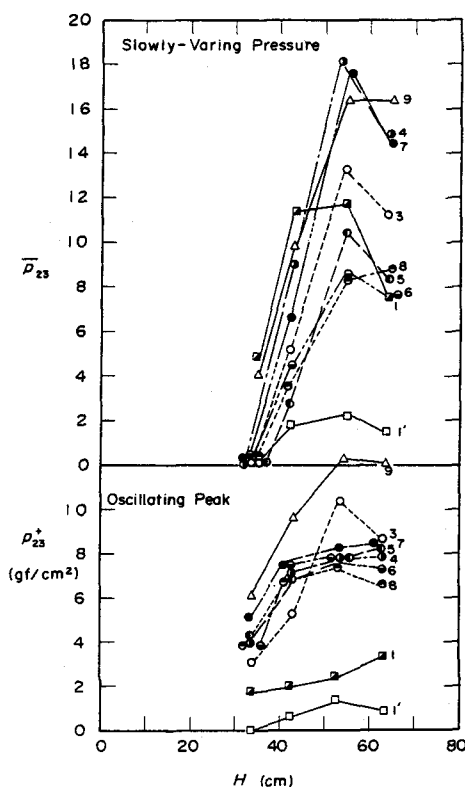


図-6 ケーソン後面の圧力の変化

①埋め立て砂が無く天端が高いケース1'では、越波量が少なく静水圧の変化は小さい。また、マウンドからの透過波は、極めて小さく波高が61.9cmのときでも1gf/cm²程度にすぎない。これに対しケース1では越波のために静水面がかなり上昇しており、H=61.9cmでは8gf/cm²程度に達するが越波による擾乱（越波伝達波）に起因する変動圧力は比較的小さい。

②ケース3では、埋め立て砂があるため変動水圧は大きくなり、H=61.9cmの場合には8.8gf/cm²に達する。また、越波水は裏込め天端付近から流れ込んでくるため、変動成分より大きい静水圧の上昇が認められる。

③ケース4では、ビニールシートを撤去したため裏込め天端からの越波水の流入がさらに多くなり、静水圧の上昇分が大きくなる。一方、変動圧力はケース3に比べ波高が小さいときにやや大きくなるものの、裏込め部に埋め立て砂が入り込んでいるためか、やや低下している。

④ビニールシートを裏込め部の上部にだけ敷設したケース5では、そこへの越波水の流入が阻止されるために静水圧上昇分はケース3よりも少なくなり、変動圧力はケース4とほぼ等しい。

⑤ケース6のベニヤ板を設けた場合でも、ここでの圧力に及ぼすベニヤ板の効果は比較的少ない。ビニールシートの影響の方が強く、ベニヤ板がないケース5と静水圧上昇分はかなり近く、変動圧もほとんど同じである。ケース7のビニールシートを撤去した場合にもやはりベニヤ板の影響は顕著ではなく、ケース4とほとんど同じである事が興味深い。これに対し、ベニヤ板とケーソンの間の目地を塞ぐと（ケース8）そこからの越波水の流入はほとんど無くなり、ビニールシートがあるケース5とほぼ同様な静水圧の上昇分と変動圧になる。

⑥ケース9では、ケーソン目地をカットしたためそこから波が侵入して変動水圧がかなり上昇している。間隙水圧計は水路の中央の位置にあり目地からやや離れている事を考えると、目地付近ではさらに大きいと思われる。

(3) 埋立砂部の間隙水圧（裏込め部との境界）

図-7 は、埋立砂における間隙水圧であり、裏込め捨石との境界のch30における静水圧上昇分と変動圧である。前掲図-6 と比べるとゼロレベルは約1/2になり、正のピーク値は1/4程度になっているが、全体的な傾向が図-6 とほぼ同様である事が興味深い。

図-8 は、埋立砂の内部の間隙水圧(ch32)である。やはり、砂であるので透水係数が小さくマウンド透過波による間隙水圧の変動は非常に小さい。一方、静水圧の上昇分はケース3、4、5の裏込め部からの越波水の排水

が比較的小さい場合に大きく、ベニヤ板におおわれて越波水がマウンド部に入りにくいケースで小さくなっている。ケース9のケーソン目地に穴をあけた場合には、裏込め部での静水圧の上昇分が大きいに対し、埋立砂の部分ではそれほど多くない事が分かる。(gf/cm²)

すなわち、越波水の流れる場所によって静水圧の上昇分が大きく変わることがわかる。

(4) マウンド下の砂地盤内の間隙水圧

図-9は、同様にケーソン前面マウンド直下の砂地盤内の間隙水圧を見たものである。ケーソンの前面であるためにケーソン背後の様子が変わってもそれほど影響が無いと思われるが、静水圧の上昇分が以外に大きい。また、変動成分にもケーソン背後の影響が多少現れている。特に、ケース9のケーソン目地に穴をあけた場合にやや小さくなっているのが興味深い。これらの間隙水圧の変化については、さらに検討が必要である。

5. あとがき

ケーソン護岸の裏込め及び埋め立て部の沈下に関する水理模型実験を実施した。裏込めの防砂シートはマウンド透過波によって隙間ができる危険性があり、そこから埋立砂が裏込め部に落下（流失）する可能性がある。こうした砂の流失は、越波水によって促進される。埋立部が舗装されていても、その目地から入る水によって砂が流失する危険性がある事が実験的に確かめられた。

また、静水圧の上昇や変動水圧を測定する事によって越波やマウンド透過波の影響を定量的に評価できるようになった。今後はこのデータの解析を進めるとともに、さらにケーソン目地やマウンドの法面での止水を含む実験を行いたい。また、数値計算法等の整備を図り、メカニズムを明らかにしてその対策法を確立して行く予定である。この研究は、運輸省第一港湾建設局のご支援を得て実施している。また、運輸省港湾技術研究所の高山知司水工部長から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

- 善功企・山崎浩之(1993)：海底地盤の液状化に関する研究、港研資料、No.755、112p.
 高橋重雄(1991)：大水深・高波浪海域における新形式構造物の開発、人工島施工技術、土木学会、pp.13-20.
 谷本勝利(1993)：耐波設計技術（護岸の構造と越波）、人工島、土木学会誌、Vol.78-12、別冊、pp.67-70.
 前野賀彦・山本方人・遠藤泰司(1990)：緩傾斜護岸裏込砂の吸出し機構、海岸工学論文集、Vol.37、pp.499-503.
 門司剛至(1980)：埋立護岸における裏込め砂の浄化効果に関する実験的研究、港研報告、第19巻2号。

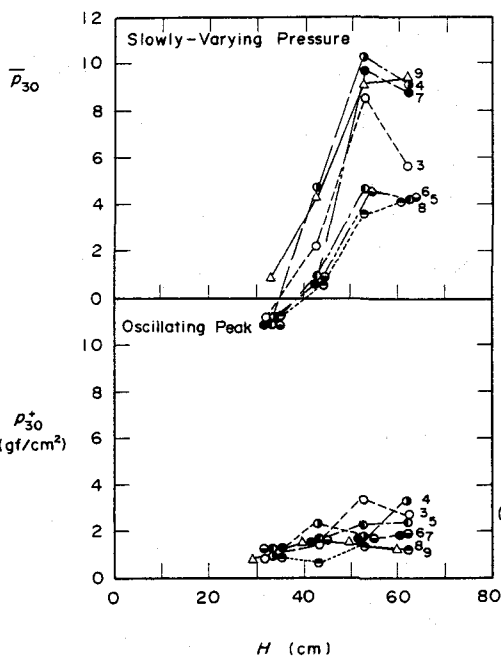


図-7 埋立土砂内の圧力の変化
(防砂シート付近)

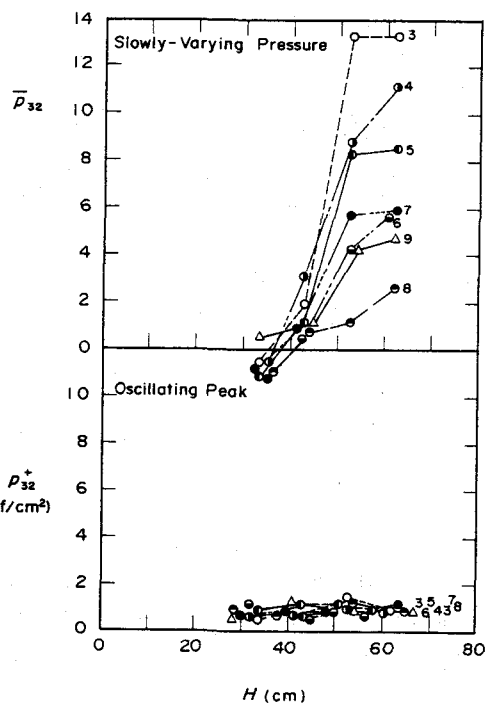


図-8 埋立土砂内の圧力の変化
(埋立部内部)

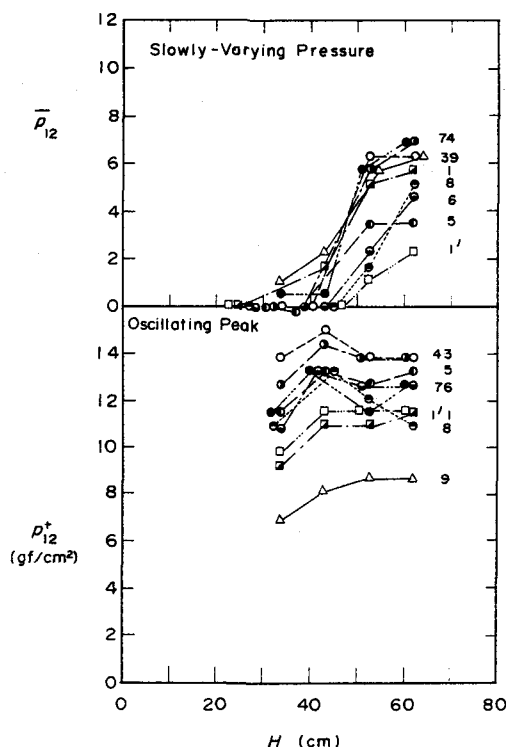


図-9 マウンドした砂地盤内の圧力の変化