

防波護岸施工時の裏込石, シートに作用する 越波について

WAVE OVERTOPPING ACTING ON BACKFILL STONE AND GEOTEXTILE SHEET OF CAISSON TYPE SEAWALLS

下迫健一郎¹・鈴木高二朗¹・黒田豊和¹・大木泰憲²

Kennichiro SHIMOSAKO, Kojiro SUZUKI, Toyokazu KURODA, Yasunori OHKI

¹正会員 独立行政法人港湾空港技術研究所海洋水工部 (〒236-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

²正会員 東亜建設工業株式会社技術研究所 (元耐波研究室研修生)

The recent utilization of reclaimed land to provide large-area, man-made islands, e.g., those used for airports, has necessitated their construction in relatively deep seas, which naturally requires them to be surrounded by seawalls that are directly exposed to strong waves since no protective breakwaters are present. Consequently, failures frequently occur during and after construction. Especially, the breakage of backfill stone and geotextile sheet, which caused by wave overtopping and transmitting wave through rubble mound during the construction, result in land-use problems and expensive long-term maintenance requirements.

We conducted a hydraulic experiment in order to investigate the breakage mechanism caused by wave overtopping. The pressures and velocity acting on the part of backfill stones and geotextile sheet are measured. The impulsive pressures and consequent transmitting waves acting on the slope of backfill stones lead to the breakage of geotextile sheet and collapsing of backfill stones.

Key Words : Seawall, wave overtopping, geotextile sheet, backfill stones

1. はじめに

防波護岸の施工では, 図-1のようにマウンド透過波による埋立砂の吸い出しを防ぐために, 裏込石の上に防砂シートを敷設する. しかし, 防砂シートは, 敷設された後, 埋め立て土砂が載せられないまま数ヶ月放置され, 越波やマウンド透過波によって破れてしまうことも多い. また, 越波が激しい場合には, シートだけでなく, 裏込部全体が崩壊してしまう場合も見られる. このため, このようなシートの破れが発生した箇所では, 埋立土砂が投入されて防波護岸が完成した後に, マウンド透過波によって埋立土砂が吸い出され, 最終的に地盤が陥没するという被災に発展している.

マウンド透過波については, 周期が長く, 水深が浅い場合に圧力が大きくなり, シートの浮き上がりを防ぐのが困難であり, マウンド透過波がシートの破れの一因となっていることが分かっている. このようなマウンド透過波については, 高橋ら¹⁾の算定法でシートに働く波力を算定することができるようになってきている.

一方, 越波に対するシートの安定性については,

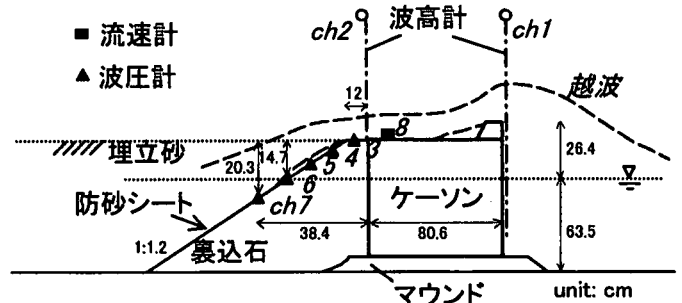


図-1 実験断面

越波の挙動が複雑であることもあり, 越波の裏込部への作用状況すら明らかにされていない.

そこで本研究では, 越波による防砂シートの破れ, 裏込部の崩壊の機構を明らかにすることを目的として, 裏込部に働く越波の状況, および越波による波力等を水理模型実験によって検討した.

2. 実験方法

実験は図-1の断面の他に, 図-2(a)~(c)に示す計4つの断面について行った.

図-1の断面では、裏込石部に働く波圧とケーソン岸側端部での流速、水位、越波量の計測、およびビデオによる越波形態の把握を行った。さらに、裏込石上部に防砂シート（透水係数 1.1cm/s 、厚さ 3mm ）、遮水性のビニールシートを敷設した場合と全く敷設しない場合の違いを調べた。なお、水深 h は 63cm であり、周期 $T=2.6\text{ s}$ 、波高 $H=10\sim 30\text{cm}$ の規則波を作用させた。また、実験を容易にするため、ケーソンより 46cm 背後には埋立砂を設けて実験を行った。

また、図-2(a)~(c)では、ケーソン背後地盤天端上に5つの波圧計を取り付けたアクリル版を設置し、地盤天端の高さを変えて越波水塊の落下高さの違いによる波圧の違いを調べた。ここで、(a)は天端が静水面より下で、越波水が水面に衝突し波圧が小さくなる場合、(b)は天端が静水面と等しく越波水が直接アクリル版に衝突する場合、(c)は天端が静水面より上にあり、落下距離が無く、越波水が越流状態でアクリル版に作用する場合である。

3. 裏込部に作用する越波

(1) 裏込石を防砂シートで被覆した場合

写真-1は、裏込石部に作用する越波の状況を示すものであり、裏込部は防砂シートで覆われている。周期 $T=2.6\text{ s}$ 、波高 $H=30\text{cm}$ の規則波を作用させた場合である。なお、裏込石には質量 32g の捨石を用いている。

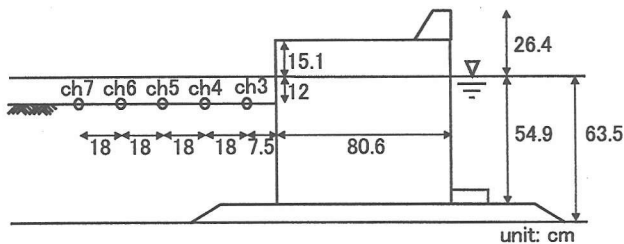


図-2(a) 実験断面：裏込天端が水面下の場合

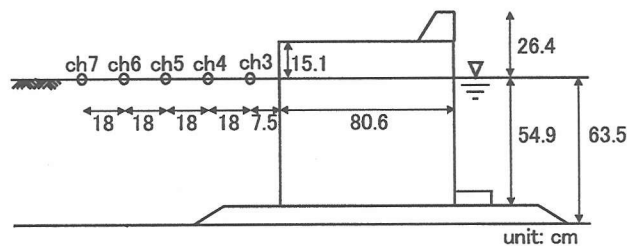


図-2(b) 実験断面：裏込天端が水面と同じ場合

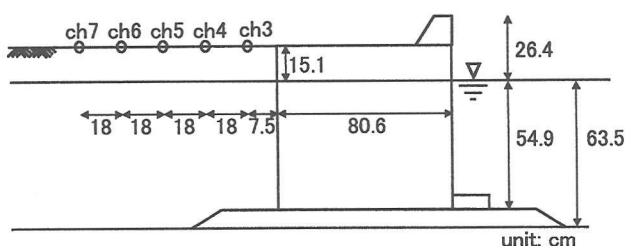


図-2(c) 実験断面：裏込とケーソンの天端高が同じ場合

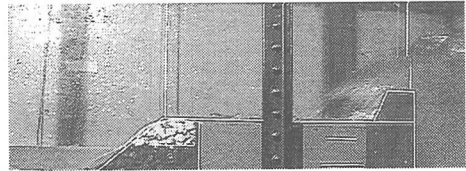


写真-1(a) 越波の開始

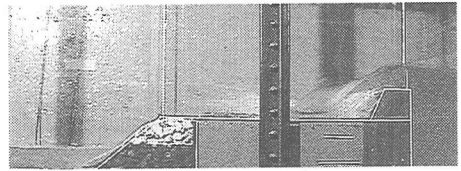


写真-1(b) 越波の打ち込み

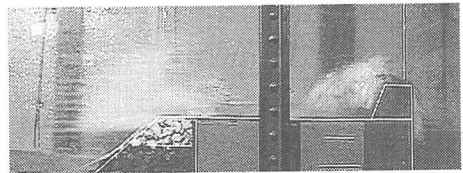


写真-1(c) 越波の飛び出し

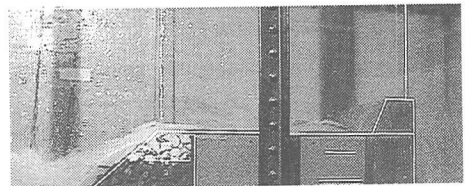


写真-1(d) 越波の打ち込み

まず、越波はパラペットを越えて、ケーソン上部に打ち込み（写真-1(b)）、その後、越流状態になって裏込石の法肩部分から飛び出す（写真-1(c)）。

さらに、飛び出した水塊は放物線を描いて落下し、裏込石斜面部に作用する（写真-1(d)）。このとき静水面より上では水塊が裏込部に直接作用するのに対し、静水面より下では水塊が静水面に衝突する際に発生する二次的な波の作用が見られる。

図-3はこのときのケーソン天端後端部の水位（ch2）、流速計（ch8）、裏込石天端部の波圧（ch3）、裏込石斜面部の波圧（ch4~ch7）である。

パラペットが無いケーソン天端を越波水が越流状態で流れる場合、波圧は高橋ら³⁾に示されるように天端部の越流の高さに相当する滑らかな波圧となる。しかし、裏込石天端部（ch3）の波圧はケーソン天端後端部と距離が離れていないにもかかわらず、ケーソン後端部の水面変位（ch2）と大きく異なっている。まず、波圧の立ち上がり時にch3の波圧にはch2の水位に対応する波圧が発生していない。これは、写真-1(c)に見られるように越波の先端の水塊がパラペットからケーソン天端に打ち込む際、水塊が上向きに跳ね上がるためである。

水塊が裏込石の法肩から空中に飛び出すと、水塊はch4, 5の位置する裏込部には直接作用せずに落下して、裏込石背後の水面に飛び込み（写真-1(d)）、ch6, 7で大きな波圧が発生している。

次に、流速が若干下がると、越流状態の越波水が裏込石天端部のch3にようやく作用するようになる。

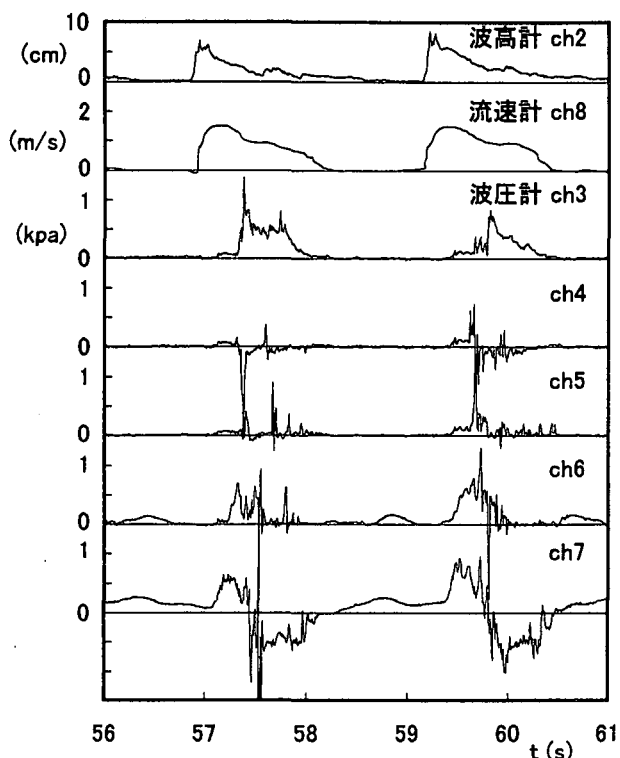


図-3 防砂シートがある場合の波圧の時系列波形

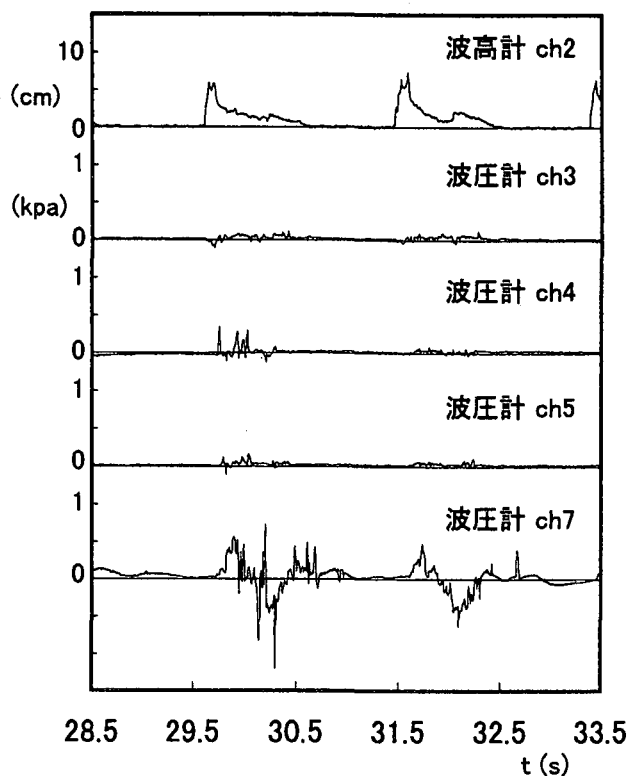


図-5 捨石のみの場合の波圧の時系列波形

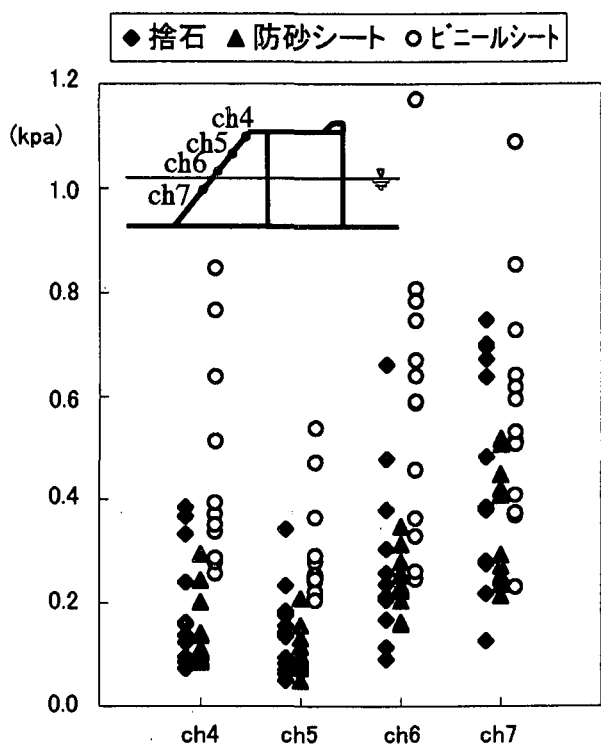


図-4 防砂シート、ビニールシート、捨石のみの比較

このとき裏込斜面部のch4では、速い流れが通過するため鋭い負圧が発生している。こうした負圧によって写真-1(c)に見られるように、シートが流れに引きずられるように舞い上がるものと考えられる。

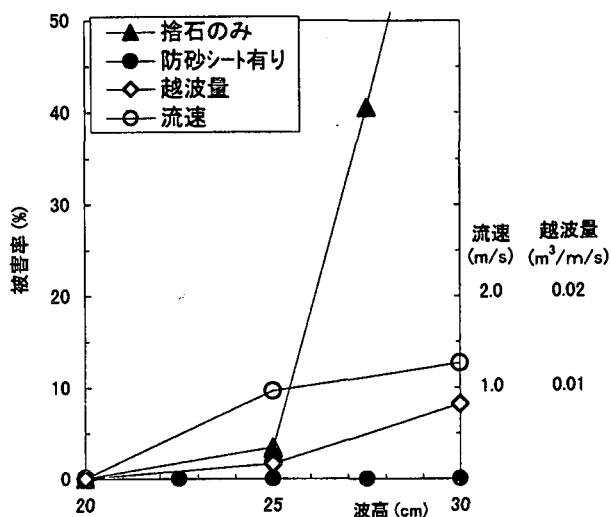


図-6 波高と捨石の被害率

その後、越波水塊の静水面への飛び込みが小さくなると、ch7では水塊飛び込み時の水位低下(写真-1(d))のため、負圧が発生するようになる。この時点で、ch7周辺でもシートの舞い上がりが見られる。

このようにシートが受ける力は、裏込天端部と静水面付近で大きく、静水面付近ではさらに負圧も発生し、シートをバタつかせている。現地でのシートの破れは主に静水面付近および法肩部に集中しており、越波の作用によるシートのバタつきがシートを破損しやすくしているものと考えられる。

その後、さらに越流の流速が小さくなると、越波水は防砂シートを透過して裏込石内部に流れ込んで

行くため、ch3まで到達せず、ch3ではch2の水位に比較して波圧が急激に減衰する。

なお、今回用いた防砂シートは比較的透水係数が大きいシートであり、縮尺の影響を考慮すると現地では越波水の裏込石への流れ込みは見られない可能性がある。図-3において、裏込天端部での越流の水位は約5cm程度であり、今回の厚さ3mmの防砂シートでは、単純にダルシー則を適用すると浸透流速は

$$v = k i = 1.1(\text{cm/s}) * 5(\text{cm}) / 0.3(\text{cm}) = 18.3(\text{cm/s})$$

となる。

越流速が1.0m/sのとき、水塊が天端部12cmを通過する時間は約0.12sであり、この間に越波水が裏込石内に流入するとすると、約2.2cmの越流水位の低下、すなわち全ての水塊が裏込石内に流れ込むものと考えられる。実際には、流速1.0m/sの時点でch3に水圧が発生しているものの、圧力は急激に減衰し始めている。

ただし、透水係数1.1cm/sは比較的大きい値であり、仮に透水係数0.1cm/sのシートを用いると流入量は0.2cmとなり、越波水は裏込石内部にほとんど流入せず、そのまま天端を越えることになる。

現地では透水係数が実験と変わらないこと、および越流速が速くなることを考慮すると、越波水は裏込石内部に流入せず、そのまま天端を越えているものと推察される。

(2) 裏込石をビニールシートで被覆した場合

そこで、防砂シートの代わりに遮水性のビニールシートを敷設して実験を行った。図-4は捨石のみの場合、透水係数1.1cm/sの防砂シート、および遮水性のビニールシートを用いた場合の斜面部の波圧のピーク値である。ビニールシートの場合に圧力がかなり大きくなっており、越波水が裏込内部に流入せず、そのまま斜面部へ流れ込んでいるのが分かる。特に、ch4での圧力増大が顕著である。なお、入射波は $T=2.6\text{s}$ 、 $H=30\text{cm}$ の規則波であるが、衝撃成分が含まれるためデータはかなりばらついている。

また、遮水性を考慮すると、捨石のみの場合に最も圧力が小さくなると考えられるが、実際には捨石に越波水塊が作用すると、水塊が跳ねて波圧計に当たるようになるため衝撃成分が大きくなり、防砂シートの場合より波圧が大きくなっている。

(3) 捨石のみの場合

図-5は捨石のみの場合の波圧の時系列波形である。裏込内部への越波水塊の流入量が多いため、静水面付近のch6、7以外は波圧がかなり小さくなる。

ところが、捨石のみの場合には捨石の越波水塊に対する安定性が問題となる。波圧の計測では、波圧計の受圧面を斜面に垂直に設置していたため、斜面に平行な圧力は計測できなかった。しかし、捨石のみの場合は捨石が凹凸をもっているため、斜面に平行に流れ込む越波水塊が斜面に平行に捨石に作用するようになり、捨石を崩すようになる。図-6は、波高と捨石の散乱による被害率の関係であり、越波量

と流速も同時に示している。捨石のみの場合は、波高27.5cmを越えると散乱が激しくなり、30cmでは法肩付近が全くなってしまった。特に法肩と斜面部の捨石が崩壊すると、裏込部の崩壊が一気に進む傾向が見られた。一方、防砂シートがある場合には、捨石の散乱が全く見られなかった。このように、防砂シートは越波水塊をスムーズに法肩から放出することにより、捨石を安定にしている効果があることが分かる。ただし、ここでは防砂シートの縮尺効果については考慮しておらず、現地では防砂シートを敷設していても持ちこたえられず、崩壊してしまっているケースも見られる。

4. 裏込法肩からの越波水塊の放出と落水

裏込部に作用する越波水塊の作用地点についてみると、以下のように分けられる。すなわち、

- 裏込天端部：越流による静水圧と剪断力が作用する部分
- 裏込斜面部1：越流状態の水塊が裏込天端から水平方向に飛び出すため越波が直接作用しない部分
- 裏込斜面部2：静水面上の水塊の落下地点で、水塊が直接作用する部分
- 裏込斜面部3：静水面下の水塊の落下地点で、新たに発生した二次的な波が作用する部分である。

このうち、水塊の落下地点では、水塊が水面に衝突すると水面がクッションとなり、波圧が直接裏込石に作用する場合に比較して低減しているものと考えられる。そこで、図-2(a)～(c)の条件について波圧を計測し、越波水塊が波面に衝突することによる波圧低減効果について検討した。すなわち、(a)越波水が落水し直接版に作用する場合、(b)越波水が水面に一旦衝突して作用する場合、(c)越波水が落水しない場合である。

(1) 越波水が落水し直接作用する場合

図-7は、周期 $T=2.6\text{s}$ 、波高 $H=30\text{cm}$ で越波水塊が直接版に作用する際の波圧波形である。ここでは、図-2(b)のように裏込天端の高さを静水面と同じにした。

越波水がケーソン後端から飛び出し、放物線を描いて版に落下すると、水塊はケーソン直背後の波圧計ch3の上を越えてch4～6に作用し、大きい場合で $1.0\eta_0 H$ を超える衝撃波圧が発生している。図-3で見たように、越波水の流速は飛び出し時に最も速いため、最初はケーソンから離れたch5、6に打ち込んでいる。その後、ケーソンを飛び出す際の流速が小さくなると、落下地点は徐々にケーソン側へ移動し、ch3にはch5、6より0.8sほど遅れて落水し、波圧のピークも小さくなっている。

(2) 越波水が水面に一旦衝突して作用する場合

図-8は、裏込部を静水面下15.1cmに設置したケースで、越波水が水面に一旦衝突して作用する場合の時系列波形である。

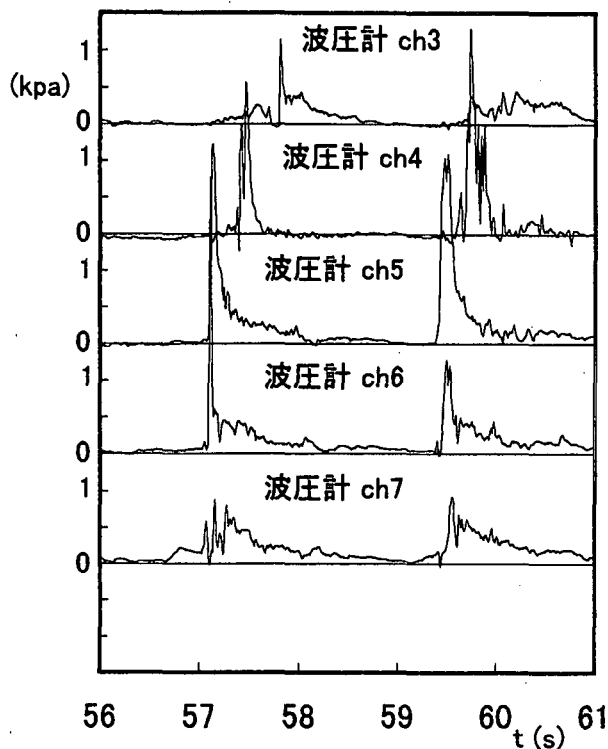


図-7 越波水が直接作用する場合

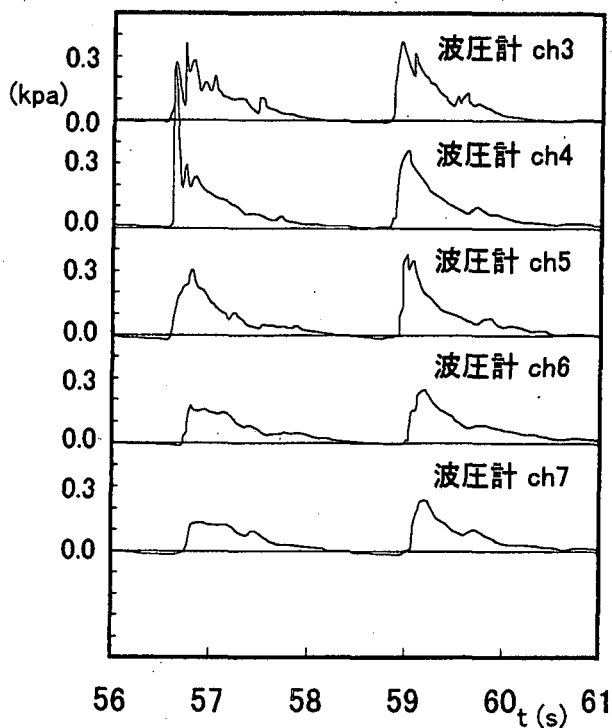


図-9 越波水が落水しない場合

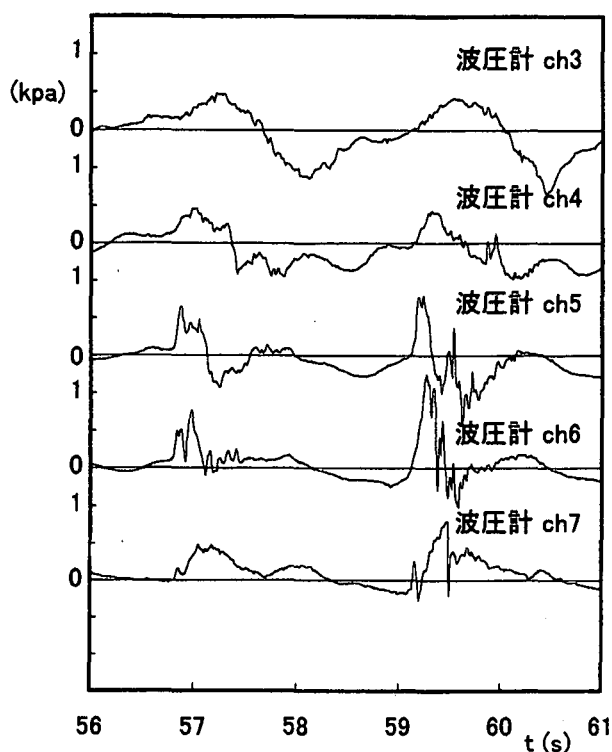


図-8 越波水が水面に一旦衝突して作用する場合

最初の落下地点ch5, 6で、比較的大きなピークが出ているが、圧力は1.5kPa(0.5 γ_0)程度まで落ちている。自由落下する距離が長くなることによる波力増大よりも、水がクッションになる効果の方が大きく、波圧は直接水塊が裏込部に当たるより小さいことが

分かる。また、水塊の水面への衝突後はケーソン背後に伝達波が発生するため、負の圧力が発生するようになる。こうした伝達波は、圧力のピーク自体は小さいが、シートを動かすには十分な圧力を持っているものと考えられる。

(3) 越波水が落水しない場合

図-9は裏込石の位置をケーソン天端と同じ位置まで上げた場合の波形である。越波水はケーソン天端部での越流のまま流れ込むため、(1)や(2)で見られた衝撃的な波圧は発生していない。以上のことから、越波を考える上で最も危険な部分は、越波の最先端の水圧が直接作用する部分と越波水塊落下後の二次的な波の影響による静水面以下である。静水面付近はこの2つの現象が重なる部分であり注意を要する地点である。

5. 結 論

1) 裏込部に越波が作用する越波水塊の作用地点は大きく以下のように分けられる。

- 裏込天端部：越流による静水圧と剪断力が作用する部分
- 裏込斜面部1：越流状態の水塊が裏込天端から水平方向に飛び出すため越波が直接作用がない部分
- 裏込斜面部2：静水面上の水塊の落下地点で、水塊が直接作用する部分
- 裏込斜面部3：静水面下の水塊の落下地点で、新たに発生した二次的な波が作用する部分

2) 1) の分類のうち、越波の作用が厳しいのは、裏込天端部と斜面部2,3であり、特に静水面付近は斜面部2と3の重なる部分となることがあり、注意を要する。

3) 今回の実験では、ケーソン背後の裏込部に作用する越波形態が明らかになったが、実験ケースが限られており、ケーソン模型等も1種類しか試しておらず、防砂シートの破損を防ぐ方法を検討するためにはさらに実験を行う必要がある。

謝 辞：本研究の一部は運輸施設整備事業団「運輸分野における基礎的研究推進制度」の中で行われたものである。また、研究の実施に当たり、前田工織(株)木下克巳氏、シバタ工業(株)西野好生氏、港湾空港技術研究所耐波研究室高野忠志研究員より貴重な情報を、さらに港湾空港技術研究所高橋重雄海洋・水工部長より貴重なご意見を頂いている。ここ

に深甚なる感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 高橋重雄・鈴木高二朗・徳淵克正・岡村知光・下迫健一郎・善 功企・山崎浩之：護岸の吸い出しに関する水理模型実験，港湾技術研究所報告，第35巻第2号，pp. 3-58，1996.
- 2) 高橋重雄・遠藤仁彦・室善一朗：親水性防波堤上の越波水の運動に関する研究，海岸工学論文集，第38巻，pp. 536-540，1991.
- 3) 高橋重雄・遠藤仁彦・室善一朗：混成防波堤上の越波水の運動と波力に関する実験的研究－親水性港湾構造物に関する水工的研究（第1報）－，港湾技術研究所報告，第31巻，第1号，pp3-50，1992.
- 4) 早川哲也・渡辺靖憲・鈴木孝信・木村克俊・土井善和・工藤貴弘：混成堤における越波水の打ち込み特性と被覆材の安定性，海岸工学論文集，第45巻，pp. 691-695