

沖合埋立地護岸内部における水圧伝播特性について

馬場慎太郎*・鶴ヶ崎和博*・小竹康夫**・吉野洋一***
古川好男***・相川秀一****・三宅達夫**・藤原隆一**

沖合に展開する埋立地の捨石護岸内部において、波浪に伴う護岸内水圧伝播の現地計測を行った。護岸内を伝播する水圧変動は、吸出し現象のような背後地盤の安定性や、海面管理型処分場の遮水工に作用する波浪荷重と関連するが、その減衰特性については、まだ不明な点も多い。現地計測は、2001 年から 2003 年にかけて行い、その間の冬季波浪および台風などの高波浪について、護岸内の伝達特性を整理した。その際に、護岸付近に設置された海上観測局の海象データをもとに、波高・周期と護岸内水圧伝播の関係を整理した。護岸内における水圧変動の伝達は、波浪の周期に強く影響され、周期の長い波ほど伝達率が高くなることが確認された。これらの観測結果から、波浪の周波数スペクトルによる伝達率の評価が重要であるとの結論を得た。

1. はじめに

空港島などの大規模埋立地が沖合に展開するに従い、捨石や腹付土で構成される捨石護岸断面構造も大規模化してきている。このような海上人工島においては、周囲の護岸が外海に面するため、冬季波浪や台風時波浪の作用を定期的に受ける。護岸構造は、完成時には背面を埋立てることから、波浪に対して安定な構造といえるが、維持管理における機能保全や安全性の観点から、背面の埋立材が健全な状態で保たれることが重要と認識されている。背面の埋立材が被災する例としては、吸出し現象が挙げられるが、潮位変動、越波、護岸内部の水圧伝播や流速など、様々な要因が考えられ、護岸自体の構造・使用材料や、防砂シートや目地板などの細部の構造も大きく影響する。

これらの要因を捉えて、護岸の健全度を評価するためには、波浪などの水理学的な現象に対する構造物・地盤の応答を、相互作用問題として取扱う必要があり、これまでに水圧変動の作用に対する地盤内応答（名倉ら、1991）や、護岸断面に対する水理模型実験（高橋ら、1996）が実施されてきた。しかし、実験結果から実物を定量的に評価することを試みた場合に、相似関係を明確にすることが難しいという問題点が存在する。関口ら（2001）は、波浪伝播と地盤内浸透の時間的相似関係に着目して、遠心力場波浪実験法を提案し、これをもとに、鶴ヶ崎ら（2002）は、管理型廃棄物処分場の遮水工に作用する波圧を、ドラム型遠心載荷装置を用いて、実験的に検討した。また、その際に数値波動水路と弾塑性有限要素法を連成させて、波浪に対する地盤の応答について解析を行った。数値解析は、相似則に関する制約がなく相互作用問題においても、有力なツールとなり得るが、現地に対する信頼性の高いパラメータの設定が必要である。

本報においては、波浪に対する捨石中の水圧伝播・減

衰特性について把握するため、関西国際空港二期工事護岸において、現地計測を行い護岸内の水圧応答を測定した。

2. 計測位置と計測装置の概要

現地計測は、図-1 に示すように、関西国際空港二期工事において北西方向に面した西側護岸のほぼ中間付近で行った。高波浪が卓越する波向きは、冬季には、北西方向を中心とした方向を示し、夏季には、台風来襲時に太平洋側から入射する長周期の波浪が卓越した。その場合の波向きは、西南西から南西であった。これらの波向きについては、空港島南西端の護岸法線から 500 m 程度離れた位置にある海上観測局（MT 局）の観測データ（潮位・波高・周期・波向）から求めた。

計測器設置箇所の護岸断面を図-2 に示す。護岸付近の原地盤の水深は 20 m 前後で、原地盤が沖積粘土であるため護岸の下部には、盛砂が水深 11 m 付近まで設置されており、捨石護岸部分はその上に位置する。捨石護岸背面側には防砂シートがあり、その背後に盛砂が腹付土として設置されている。

水圧計設置位置は、図-2 の 5 箇所に、施工の進捗に併せて順次設置した。PW2~4 は 2001 年 12 月、PW5 は

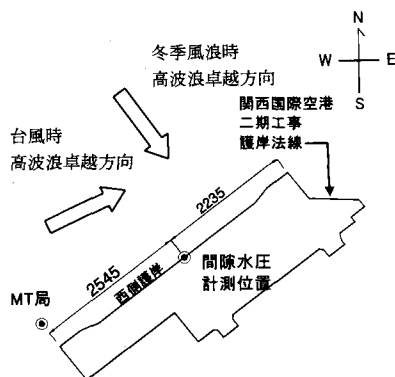


図-1 計測箇所および MT 局位置図

* 正会員 工修 東洋建設(株)鳴尾研究所
** 正会員 工博 東洋建設(株)鳴尾研究所
*** 東洋建設(株)大阪本店
**** 正会員 東洋建設(株)技術部

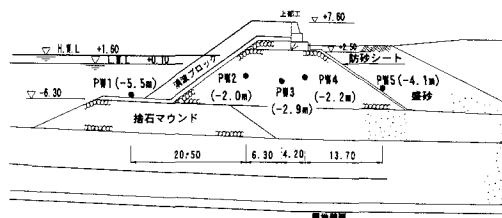


図-2 水圧計設置箇所(当初)護岸断面図

2002年1月, PW1は3月から計測を開始している. 図中には, 各水圧計の設置当初のレベルを()内に示している.

水圧計は, 測定レンジが200 kPaで, 分解能が0.1 kPaのゲージ式水圧計を使用した. また, データロガーは, 動ひずみ計を使用した. 測定条件は, 5秒程度の周期においても水圧応答を精度良く把握するために, 0.1秒のサンプリング間隔とした. 1回の計測期間は, 最大2週間程度連続で行い, バッテリー交換・データ回収後に再び計測を行った.

3. 水圧データの整理方法

計測した水圧値には, 潮位変動, 波浪による水圧変化に併せて, 護岸下の原地盤が沈下することによる静水圧の変化も含まれる. 沈下に伴い静水面と水圧計の位置関係が変化するため, 台風時や冬季波浪時のデータを整理する際には, 沈下量を求めて水圧計の標高を確認した. ただし, 大気圧の変化は補正していないため参考値的な取り扱いとなる. 沈下量の求め方を以下に示す.

- ① 水圧データを5分間(3000データ)で移動平均して, 静水圧の変動値へと変換
- ② MT局における潮位変動から, 静水圧変動値を差引きして水圧計のレベルを算定

図-3に静水圧変動とMT局における潮位変動値の一例を示す. 各データともMT局の潮位変動とほぼ同じ変化を示しており, 上記の処理方法で, 水圧データ中の潮位変動成分を求められることが分かる. 原地盤の沈下に伴う水圧計の標高の変化を図-4に示す. 高波浪時のデータについてはプロットにコメントを表記している.

各水圧計で設置時期が異なるので, 単純な比較はできないが, 捨石護岸内では, 当初より1.2~1.8mの沈下量となっている. 護岸前面のPW1では, 0.4m程度の沈下量を示している. 2002年12月以降の沈下速度は小さく, ほぼ横ばい状態となっている. 2003年8/6のデータは, 沈下と逆の傾向を見せているが, これは台風10号の通過に伴い大気圧が低下したことに起因するものと考えられる.

図-3に示したように水圧データ中の潮位変動成分が

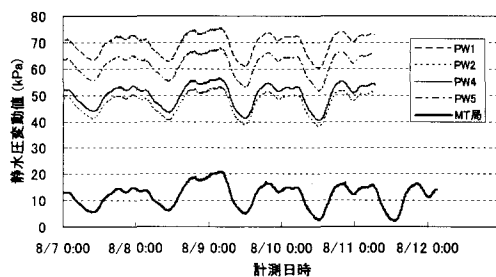


図-3 各水圧計およびMT局の水圧変動例

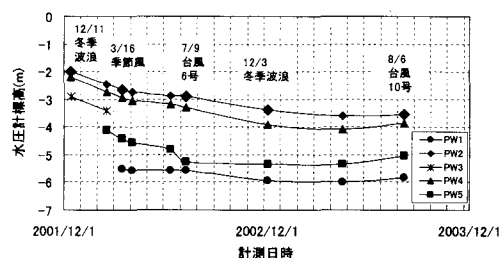


図-4 水圧計の設置標高経時変化

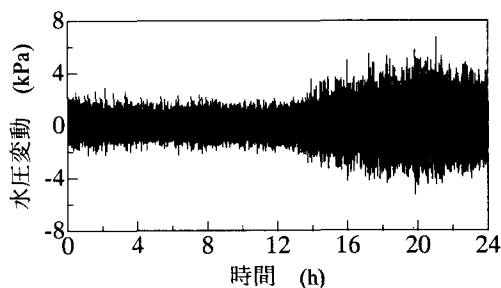


図-5 波浪による水圧変動成分 (PW2: 2003/8/8)

求まることから, 波浪による水圧変動成分は, オリジナルデータから潮位成分を差引くことで求めた. 図-5に, 波浪による水圧成分の一例としてPW2の2003/8/8のデータを示す. 潮位変動成分が取り除かれて, 水圧変動が0を中心とした振動となっている.

4. 波浪データと護岸内水圧応答の比較

水圧データ計測中に高波浪が来襲したケースについて, 波浪に対する水圧変動成分を前述した手法で整理したうえで, MT局において測定された海象条件と比較した. 低気圧が通過したケース1(2002年3/20~3/24)と台風が通過したケース2(2003年8/6~8/11)について以下に示す.

ケース1, 2各々に対して, MT局において観測された潮位・波高・周期および各水圧計の水圧変動値の時刻

歴を、図-6、図-7に示す。各グラフの横軸は、計測日時で表示している。MT局データの潮位は10分毎、波高・周期に関しては毎正時をはさむ20分における値である。一方、水圧変動については1時間毎に最大水圧変動幅を求めている。また、着目する時点の最高波高 $H_{\max}$ と周期 $T_{\max}$ および有義波高 $H_{1/3}$ 、周期 $T_{1/3}$ を表-1に示している。着目点は、波高 $H_{\max}$ が大きいデータおよび周期 $T_{\max}$ が長いデータを選び出した。着目点の潮位は、ケース1では+1.0m程度、またケース2においては+1.7~2.0m程度となっており、ケース毎にほぼ同じ値となっている。なお、沈下量と潮位差により護岸内の水圧計は、ケース1に較べて、ケース2で2m近く水深が大きくなっており、条件の変化により、海底面のPW1よりも護岸内の水圧変動が大きくなる現象が認められる。

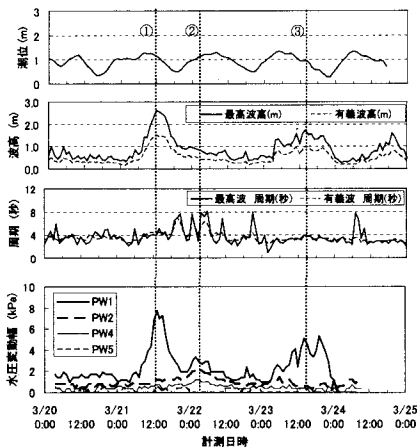


図-6 計測結果時刻歴 (ケース1)

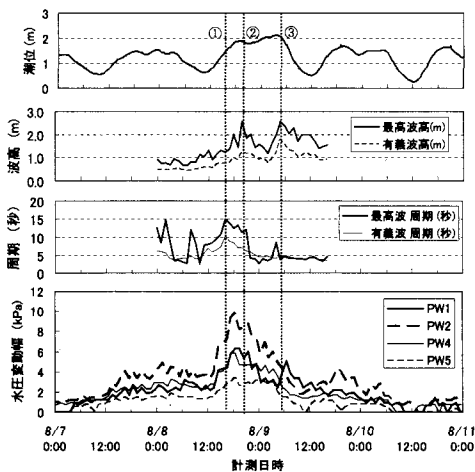


図-7 計測結果時刻歴 (ケース2)

表-1 着目点の波浪条件

ケース1 日時		$H_{\max}$ (m)	$T_{\max}$ (秒)	$H_{1/3}$ (m)	$T_{1/3}$ (秒)	波向
①	3/21 12時	2.6	4.1	1.5	4.4	南西
②	3/22 01時	0.9	7.7	0.5	5.3	西北西
③	3/23 14時	1.8	3.9	1.0	3.8	西
ケース2 日時		$H_{\max}$ (m)	$T_{\max}$ (秒)	$H_{1/3}$ (m)	$T_{1/3}$ (秒)	波向
①	8/8 16時	1.3	15.1	0.8	10.4	南西
②	8/8 20時	2.6	11.3	1.2	7.1	西南西
③	8/9 05時	2.6	3.9	1.8	5.2	南西

(1) 波高と水圧変動幅の関係

ケース1の①~③における、護岸法先に設置したPW1の水圧変動幅はそれぞれ7.0, 3.8, 5.1 kPaであり、表-1の波高に応じて変動幅が変化する。一方、護岸内沖側のPW2の値は、1.2, 2.0, 0.6 kPaとなり、波高が最も小さい条件において、最大の水圧変動幅を示した。護岸内背面側のPW4についても、PW2より値は小さいものの同様の傾向を示した。また、防砂シート境界部のPW5については、有意な水圧変動は認められなかった。

ケース2の①~③については、PW1が4.4, 5.3, 3.9 kPa, PW2が7.2, 8.3, 4.3 kPaを示した。①と②の波高は1.3m, 2.6mと異なるが、PW2を比べると、7.2, 8.3とほぼ等しい値を示している。②と③については波高が2.6mで等しいが、②の周期の長い方がPW2について大きい値を示した。以上のように、波高および法先の水圧変動幅と護岸内水圧応答を比較すると、それぞれ異なる挙動を示しており、関連性を把握するためには、以下に示すように周期の影響を考慮する必要があると考えられる。

(2) 周期と水圧変動幅の関係

ケース1の着目点②では、波高はもっとも小さいが、その一方で周期は最も長く、図-6のMT局データにあるように、②付近において、周期8秒前後の波が継続している。それに伴って護岸内の水圧計PW2, PW4の反応は高くなっている。ケース2においても、周期の長い期間と護岸内水圧応答が大きい期間が、概ね一致している状況を読み取ることができる。また、ケース2の②と③において、PW1は波高の増大に②と③の双方で対応しているが、護岸内の水圧計は周期の長い②のみで対応している。

5. 護岸内水圧応答のパワースペクトル

護岸内における水圧伝播波形について、ケース2(台風時)の8/8 20時頃を一例として図-8に示す。グラフの縦軸は設置水深の静水圧も含めた全水圧で表示した。

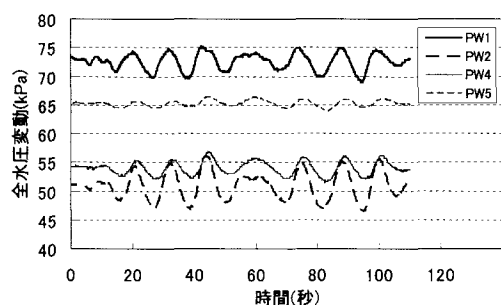


図-8 全水圧変動波形 (2003年8/8 20時)

海底に設置したPW1に比べて、護岸内部では振幅だけでなく位相にも若干の相違が見られる。このように、護岸内を水圧が伝播する場合は、波形に含まれる各周波数成分において伝達率が変化するため、以下では各水圧計の計測値を周期に対してスペクトル表示して、護岸内部の伝達特性を調べることにした。通常パワースペクトルは横軸を振動数で表示するが、ここでは便宜上、周波数の逆数である周期で表示した。

スペクトルは、以下の手順で求めた。最初に潮位変動成分を差し引いた水圧データをもとに横軸に周期をとったパワースペクトルを求めた。数日間にわたる連続計測では途中で波浪の特性が変化することから、MT局の波高、周期のデータをもとに、波高が大きく、かつ周期が同様である部分を計測データから抽出してパワースペクトルを求めた。抽出部分の時間幅は、風浪の継続状態から8時間以上を確保した。データの測定間隔は0.1秒であるため、パワースペクトルの分解能は 3.5×10^{-5} Hz程度となるが、周期による伝達率の違いを見ることを目的としていることから、1秒間隔で平均した値を求めて各周期の代表値とした。

以上の手順で求めた周期に対するパワースペクトルを、図-9、図-10に示す。図-9は、ケース1(低気圧通過時)①と②に相当する期間、図-10は、ケース2(台風通過時)8日12時～9日2時と9日2時～13時の期間を示している。

図-9に示すケース1-①において、PW1は周期5秒付近にピークをもち、MT局の波浪周期と同様となっている。護岸内のPW4, 5については、反応はなく、パワースペクトルはほぼ0となっている。PW2の8秒付近では若干の立ち上がりを見せている。ケース1-②については、MT局では8秒前後の周期が観測されている。それに対してPW1, PW2, PW4とも9秒前後にピークをもつ応答を示している。周期が長くなることにより、PW2のパワースペクトルはケース1-①と比較して、非常に大きくなっており、PW1とほぼ等しい値を示している。なお、PW2においては6秒付近から、PW4では8秒前後か

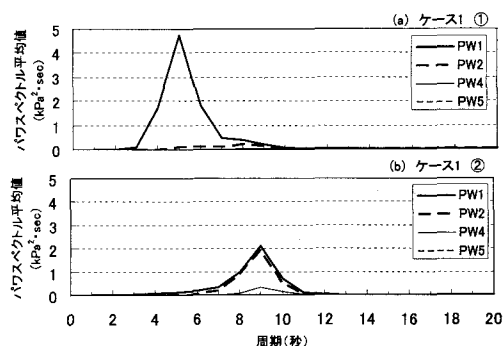


図-9 パワースペクトル平均値 (ケース1)

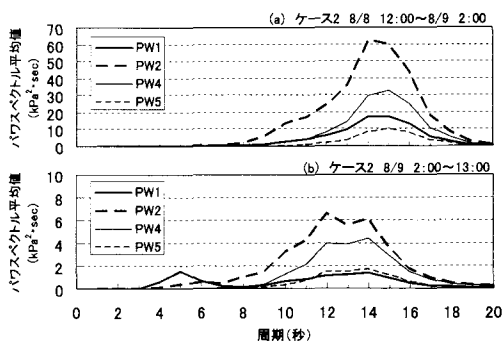


図-10 パワースペクトル平均値 (ケース2)

ら立ち上がりを示し、PW5は反応していないことから、短周期の波ほど護岸内部へと伝播しにくい傾向を示している。

次に台風通過時のケース2について検討を行った。図-10上段は、ケース2の①②を含む台風時における波浪が最も厳しい時で、パワースペクトルは全体的に大きな値を示している。ピークがある周期は14～16秒でMT局の周期よりも若干大きくなっている。これは、最大波の周期より大きな周期をもつ波浪成分が比較的大きなエネルギーを有していたことが原因の一つとして挙げられる。なお、ケース2ではケース1に比べて、PW1で0.6 m, PW2で1.2 m程度沈下していることと、高潮により通常潮位より0.5 m程度潮位が高かったことから、護岸前面水深は深くなり、その結果、PW1に比べて護岸内の水圧応答が大きくなる傾向を示したと考えられる。

一方、図-10の下段の図は、ケース2-③付近のデータで、MT局による最高波浪の観測結果では周期5秒程度となっているが、同様に長周期12～15秒のパワースペクトルが卓越している。5秒付近のスペクトルは、PW1に立ち上がりが認められるが、護岸内では減衰して伝播していない。以上のことから、護岸内の水圧伝播を考慮する際には、最高波のみならず、波浪のスペクトル形状

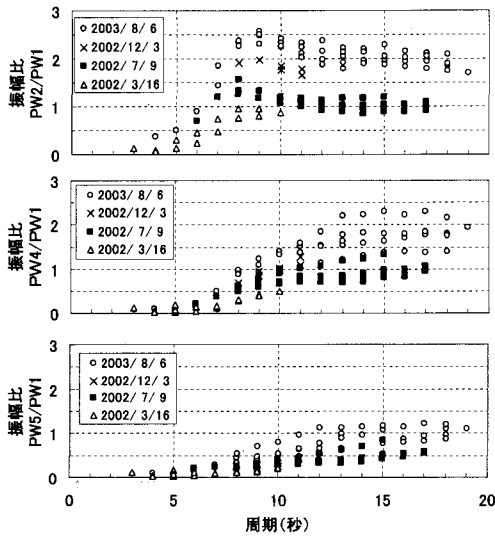


図-11 護岸内水圧伝播の伝達率

により確認する必要があるといえる。

6. 護岸内部への水圧変動の伝達率

捨石護岸断面内における波浪に伴う変動水圧の伝達について、周期に関して整理した。複数の波浪条件として、図-4に示した高波浪時について各々のパワースペクトルを求め、平方根をとり水圧変動の振幅に換算した。振幅は、波浪条件によって変化するため、PW1の値を護岸に入射する波浪を代表する値として、PW1に対する比の形で求めた。1回の計測期間中でも波浪条件は変化するため、各高波浪時を複数回に分けてスペクトルを求めている。高波浪時の振幅比を図-11に示す。上段からPW2, PW4, PW5の順番で表示している。PW1は海底面における値なので、図中では振幅比が1を上回る場合も見られる。PW2は、周期4秒以下では反応が小さく、12秒程度でほぼ一定となっている。また振幅比は、沈下や潮位により水深が増加するに伴い大きくなる傾向を示している。中段の図に示す護岸背面側のPW4, PW5については、反応が見られる周期が6秒程度とPW2より長周期側に移動し、周期の増加とともに振幅比が漸増している。周期12秒前後で、振幅比はほぼ一定値に落ち着く傾向を示した。

図-12に、護岸内水圧計の振幅比とPW1パワースペクトルの関係を示す。PW1パワースペクトルはPW1振幅と対応する。図中では、振幅比を周期により分類している。PW1の大きさが振幅比に与える影響は小さく、周

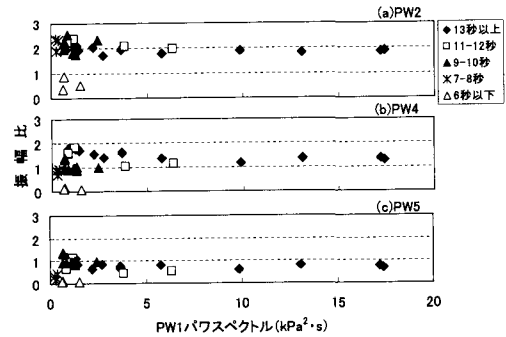


図-12 振幅比とPW1パワースペクトルの関係

期の影響が大きい傾向が現れている。

7. まとめ

捨石護岸内における波浪に伴う水圧伝播について、関西国際空港二期工事護岸において現地計測を実施した。水圧データから、沈下データ、潮位成分、波浪成分を分離して、波浪成分に関する伝達特性を整理した。主要な結論を以下に示す。

- ①波浪伝達特性は、周期により伝達率が変化する傾向を示し、長周期になるほど伝達率が高い結果となった。
- ②伝達率と護岸前面側における海底の水圧変動の関係は、周期が同様である場合は、水圧変動の大きさに関わらず同様な伝達率を示した。
- ③護岸内の水圧伝播特性を評価するには、波高とともに波浪の周期が重要である。したがって波浪の周波数スペクトルにより評価する手法は有効である。

謝辞：現地計測を実施するにあたり、計測場所の提供や計測継続への御理解と御助力いただきました関西国際空港用地造成株式会社、関西国際空港株式会社の方々に、この場を御借りしまして謝意を表します。

参考文献

- 名合宏之・前野詩朗・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.
- 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 (1996): 護岸の吸出しに関する水理模型実験, 港研報告, 11巻, 3号, pp. 92-104.
- 関口秀雄・北 勝利・岡本 修 (1995): Response of poroelastoplastic bedsto standing waves, Soils and Foundations, Vol. 35, No. 3
- 鶴ヶ崎和博・馬場慎太郎・金 夏永・三宅達夫・金子清美・手塚隆・佐藤 清・徳永和幸 (2002): 波浪が護岸背面地盤へ及ぼす影響, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 776-780.