

砕波衝撃波力を受ける海岸構造物の振動特性 と沈下との関係について

泉宮 尊司*・中田 正和**・浅井 尚之***・稲垣 実****

1. 緒 言

近年、海岸侵食の広域化に伴い、各地で離岸堤や潜堤が設置されてきたが、それらの沈下の問題が重要な研究課題となってきた（宮本ら，1986，糖沢ら，1986，浜口ら，1989）。海岸構造物の沈下に関する研究は、本間ら（1959）や豊島ら（1972）によって行われてきたが、前者の提案したパイピング機構による沈下以外のメカニズムは明らかにはなっていない。最近になり、波浪による海底地盤の液状化発生の可能性が示唆されるようになり（Okusa, 1985, 善ら, 1987, 前野ら, 1988, 泉宮ら, 1989），海岸構造物が地盤の液状化の発生により沈下するのではないかとという考えが提案されるようになった。また、波浪による海底地盤の液状化だけでなく、砕波衝撃波力を受けたブロックの振動によっても、局所的な液状化が生じ、沈下が起きるのではないかとという考えも提案されている（善, 1984, Zen et al., 1986）。

本研究では、ブロックの振動によって沈下が生じるのかを実験的に調べるために、まずブロックでできた離岸堤を設置し、砕波衝撃波力によってどのような振動が生じるのかを測定することにした。さらに、振動加速度や振動変位と沈下との関係を図にプロットし、これらの関係を明らかにする。

2. 離岸堤の振動および沈下に関する実験

(1) 実験装置および測定方法

離岸堤の振動および沈下に関する実験は、新潟大学工学部建設学科にある、2次元造波水槽を用いて行った。造波水槽に、平均粒径 0.18 mm の砂を勾配約 1/15 に敷き、所定の波を約 2~4 時間作用させた後、テトラポッドでできた離岸堤を設置した。用いたテトラポッドは、10t 級の 1/50 の模型テトラポッド（重さ 50g、高さ 5cm）である。離岸堤の種類として、テトラポッドを砂地盤に直接置いたもの、グラベルマット（平均重量

80g、および 20g の 2 層敷）を敷いたもの、および吸い出し防止シート（布製）とグラベルマットの両方を敷いた離岸堤の 3 種類作成した。いずれの離岸堤にも 190 個のテトラポッドを使用している。波高の測定には、容量式波高計を用い、加速度の測定には協和社製の ASW-1A を用いた。また、間隙水圧計を離岸堤の中央底部および沖側法先に設置した。これらの設置位置の概略を図-1 に示す。

実験ケースの選定にあたっては、波高および周期を変えて予備実験を行い、振動加速度が比較的大きい 9 ケースを本実験に用いることにした。実験条件の緒元を表-1 に示す。

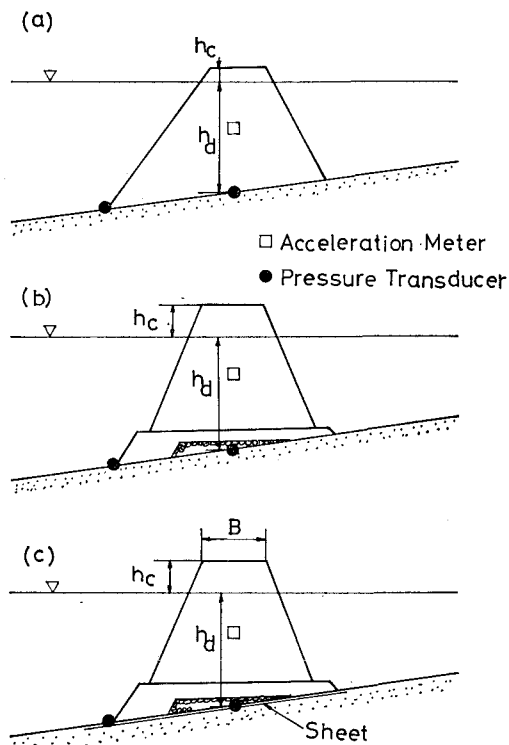


図-1 各種構造形式と測定装置の配置

* 正会員 工博 新潟大学助教授 工学部建設学科

** (株)NTT

*** 新潟大学大学院 工学研究科

**** 富山県庁

表-1 実験条件

CASE NO.	構造形式	入射波高 H_i (cm)	周期 T (s)	一様水深 h_r (cm)	沖波波高 H_o (cm)	設置水深 h_d (cm)	天端高 h_c (cm)	天端幅 B (cm)	設置位置 X (cm)	反射率 K_R	透過率 K_T	損失率 K_L
1	テトラポッドのみの 離岸堤	6.70	1.21	35.0	7.34	13.1	0.0	14	4.70	*未計測	*未計測	*未計測
2		5.68	1.50	35.0	6.09	12.1	1.0	17	5.20	0.21	0.57	0.64
3		9.39	0.85	35.0	9.86	12.1	0.0	15	5.20	0.15	0.41	0.81
4	グラベルマットを 敷いた離岸堤	10.23	0.85	35.0	10.74	12.0	3.0	13	5.20	0.27	0.22	0.88
5		5.40	1.21	35.0	5.91	13.7	1.0	13	4.70	0.33	0.57	0.57
6		5.40	1.50	35.0	5.79	13.7	3.0	13	5.20	0.31	0.45	0.70
7	グラベルマットと 吸い出し防止シ ートを敷いた離岸堤	5.61	1.50	35.0	6.01	13.4	2.5	13	5.20	0.33	0.50	0.64
8		5.75	1.21	35.0	6.30	15.7	1.0	18	4.70	0.32	0.66	0.46
9		9.87	0.85	35.0	10.36	12.7	4.0	11	5.20	0.27	0.21	0.88

(2) 加速度計の検定と2乗平均加速度の算定法

加速度計の検定は、振り子の原理を応用して行った。長さ1mの鋼尺の先に加速度計を絶縁状態にして取付け、まず周期を測定し、変化のないことを確認した。そして振り子運動の左右の振幅を測定することにより、加速度を算定し加速度計からの信号の出力値と比較を行った。加速度計の検定は、実験前後の2回行った。その1例を図-2に示す。図中の○印は実験前の結果を、△印は実験後の結果を示している。実験前後で数パーセント出力が変化しているようであるが、検定直線として平均的な値を採用した。

模型離岸堤の振動加速度が40~70Hzであったので、最大加速度および2乗平均加速度を精度よく算定するには、約1000Hzでデータレコーダに記録しなければならない。著者らの研究室には、そのような精巧なデータレコーダはないので、以下のような方法によった。加速度の大きさの分布がGauss分布に従うものと仮定すると、2乗平均加速度は次式により算定できる。

$$a_{rms} = \eta / [2 \ln(N_{0+}/N_+)]^{1/2} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 N_{0+} は測定時間内に加速度が0の線をプラス方向に横切る回数、 N_+ は加速度が η である線をプラス方向に横切る回数である。加速度 η の取り方について

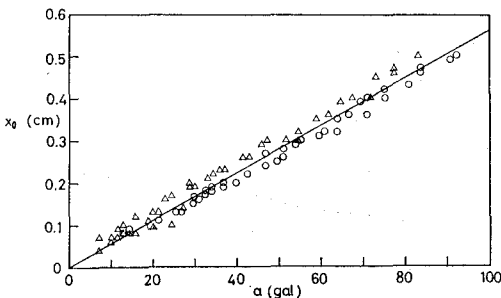


図-2 加速度計の検定例

は、 η の値が小さ過ぎても、大き過ぎても推定精度が悪くなる。そこで、 N_+ の値が N_{0+} の約1/3になるような η の値を採用した。

3. 実験結果とその考察

(1) 構造物の振動特性

予備実験により、構造物の振動加速度が大きい実験条件は、波が離岸堤沖側法面でちょうど砕波する場合であった。このような条件のもとでは、最大加速度は100~200galにも及んでいたが、1波1波ごとに大きく変動していた。このために最大加速度で沈下量との関係を議論するのは困難であるので、振動加速度の代表値として、前述の2乗平均加速度の値を採用することにした。

図-3は、各種構造物の2乗平均加速度と平均振動数との関係を示したものである。図中の○印はブロックのみの離岸堤、△印はグラベルマットを敷いたもの、□印はグラベルマットと吸い出し防止シートを敷いた離岸堤の結果である。構造物および波の条件の同一のものに対しても、30秒後、10分後、30分後、1時間後、2時間後および4時間後の測定結果も同図にプロットされてい

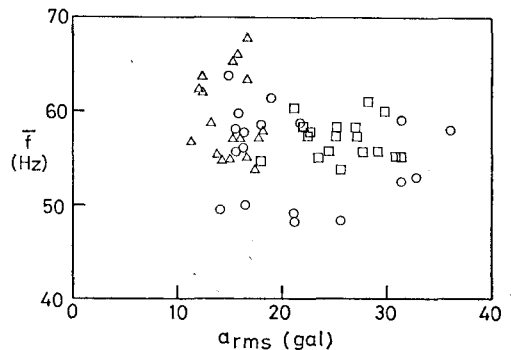
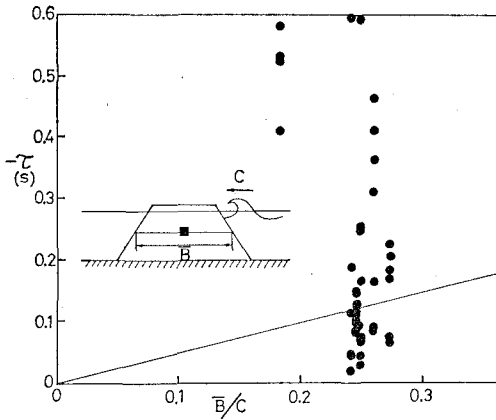


図-3 2乗平均加速度と平均振動数との関係


 図-4 時間差 τ と B/C との関係

る。この図をみると、ブロックのみの離岸堤の2乗平均加速度および平均振動数の変動が他の構造のものに比べて最も大きいことがわかる。これは、この形式ではブロックの沈下が大きいため、2乗平均加速度や平均振動数も変化するためであると考えられる。一方、グラベルマットのみを敷いた構造のものは、他の構造のものと比べ2乗平均加速度の値がかなり小さくなっている。この原因については、グラベルと砂が接触することによって、振動を吸収するためなのか、あるいは全くの偶然な結果であるのかは定かではない。この図より、本研究で用いた模型の離岸堤は、平均振動数40数 Hz から60数 Hz、2乗平均加速度が10数 gal から30数 gal で振動していることがわかる。

離岸堤の振動がどのようなメカニズムでどの場所から発生しているのかを調べるために、離岸堤の中央を波が通過する時間と最大加速度が発生する時間との時間差と離岸堤の平均幅 B と波速 C との比の関係をプロットすることにした。波速 C については、離岸堤設置平均水深を用いて微小振幅波理論によって算定した。時間差 τ と B/C との関係を図-4に示す。最大加速度が生じる時刻は、波の峰が離岸堤の中央を通過する以前である場合が多く、しかも図の実直線で示されている時刻、すなわち波の峰が離岸堤の沖側法面にある時刻に最大加速度が多く観測されていることがわかる。このことは、波が沖側法面で碎波するときに振動が発生し、ブロックを通して直ちに振動が離岸堤の中央部に伝搬したのではないかと考えられる。このことは、目視で観察されたように強い碎波ほど振動加速度が大きかったことから傍証される。

図-5は、振動の2乗平均変位の時間変化を示したものである。この図において、白抜き印のものはブロックのみの離岸堤を、半黒印はグラベルマットを敷いたもの、黒印はグラベルマットおよび吸い出し防止シートを

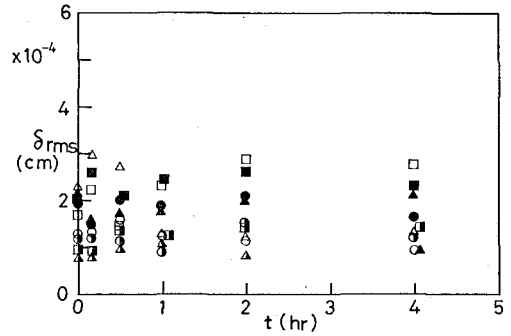


図-5 2乗平均変位の時間変化

敷いた離岸堤の結果である。2乗平均変位の算定にあたっては、振動加速度のスペクトルが極めて狭帯域であるので2乗平均加速度を平均角振動数の2乗で割って近似的に評価した。この図より、白抜き印のもの特に△印のケースは、時間とともに2乗平均変位が大きく変化していることがわかる。また、個々のケースについてみれば2乗平均変位の値は増加するものもあれば、減少するものもありまちまちであるが、沈下対策を施したものの方が時間的な変化も小さいと言える。

(2) 各種構造形式の沈下特性

図-6は、各種構造形式の沈下の時間変化を示したものである。図中の記号は、図-5と全く同様に白抜き印はブロックのみ、半黒印はグラベルマットを敷いたもの、黒塗り印はグラベルマットとシートを敷いたものである。この図をみてもわかるように、ブロックを直接砂地盤に置いた形式のものは沈下はかなり大きい。それに対して、グラベルマットを敷いたものおよび吸い出し防止シートを敷いたものは、沈下はかなり小さい。このような結果は、糖沢ら(1986)の現地実験でも得られており、グラベルマットを敷いたものは、3ケースとも沈下量は小さいが、■印のケースのように4時間後より沈下が徐々に進行する場合もある。これは、離岸堤法先が洗掘されるに伴い、グラベルの下砂が徐々に吸い出され

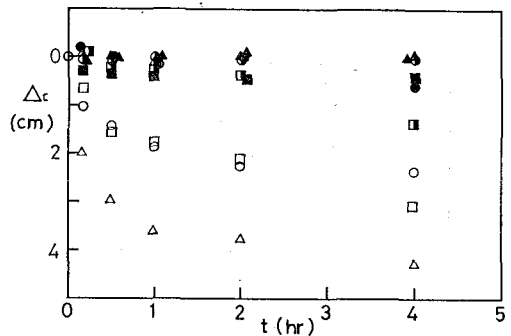


図-6 各種構造形式の沈下の時間変化

るためであると考えられる。この点からもシートを敷いた方が、吸い出しおよび沈下に対して有効であると思われる。

(3) 振動加速度と沈下との関係について

図-7 は、ブロックのみの離岸堤の沈下量と2乗平均加速度との関係を示したものである。沈下量については離岸堤中心線上の天端ブロックの沈下量の平均値を用いている。図中の Δ_c は、それぞれ0~30秒間、10~30分間、30~60分間、1~2時間および2~4時間の沈下量を示している。この図より、各時間の間の沈下量と2乗平均加速度との間に比較的高い相関関係があることがわかる。特に、沈下速度の大きい30秒から60分間の沈下量との相関が高い。

このように、実験結果からは沈下量と2乗平均加速度との相関があることが確認されたが、それでは沈下が碎波による構造物の振動によって生じていると判断してよいであろうか。一般に沈下の生じる原因として、本間・堀川(1959)によるパイピングによる砂の吸い出し作用によるもの、ブロックの締め固めによるもの、および液状化の発生によるもの等が考えられている。この内、ブロックの締め固めによる沈下は、後にも述べるように実験室での模型実験ではかなり小さい。また、波浪にともなう海底圧力変動による液状化発生による沈下も、砂粒径が現地とはほぼ同じで模型実験の方は波高が数10分の1程度であるので極めて小さいと言える。したがって、今回の実験による沈下は、砂の吸い出しによる沈下であると考えられる。このことは、ビデオ撮影の画像からも離岸堤の底層の強い戻り流れによって、砂の吸い出しが観測されたことから支持され得る。それでは、振動加速度が大きいほどなぜ沈下量が増えるのかを考察しなければならない。まず、ブロックの振動による局所的な液状化の発生については、実験室で測定された2乗平均変位の値が 10^{-4} cm のオーダーであるので、セン断変位も高

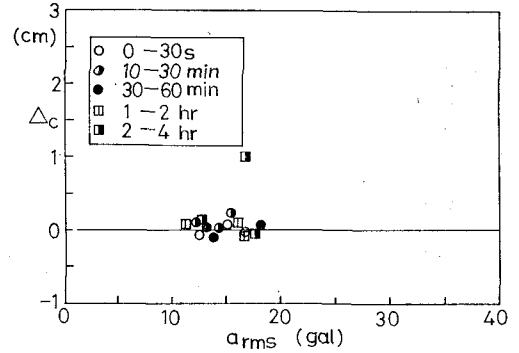


図-8 沈下量と2乗平均加速度との関係 (グラベルマットを敷いた離岸堤)

々 10^{-4} cm のオーダーであることが推測できる。したがって、このような小さなセン断変位では液状化は発生しないであろうと推測される。このことは模型実験での結果であるが、現地では構造物の振動数が模型実験のそれに比べて1 order 程度小さいこと、および変位は平均振動数の2乗の逆数におよそ比例することから、局所的な液状化の発生の可能性は残されている。以上のことから、今回の模型実験では沈下と砂の吸い出し作用が強く関係していることが推測される。つまり、2乗平均加速度が大きい場合には、強い碎波にともなった岸向きの質量輸送が生じ、離岸堤の底層では強い戻り流れが発生するために砂の吸い出しが促進され、沈下量が大きくなり図-7のような結果が得られたものと考えられる。

図-8 および 図-9 は、それぞれグラベルマットを敷いたもの、グラベルマットおよびシートを敷いた離岸堤の沈下量と2乗平均加速度との関係をプロットしたものである。両図とも沈下量がほとんど小さく図-7のような明確な相関は認められないが、2乗平均加速度が増大すると、沈下量も僅かであるが増大する傾向にあることが伺える。また、グラベルマットや吸い出し防止シート

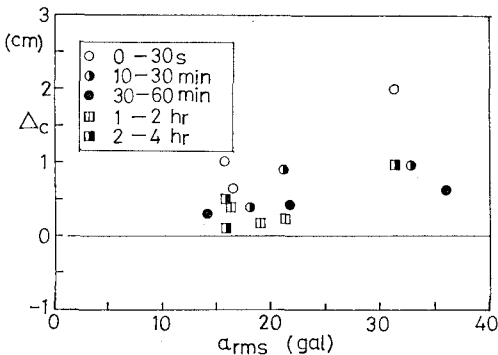


図-7 沈下量と2乗平均加速度との関係 (ブロックのみの離岸堤)

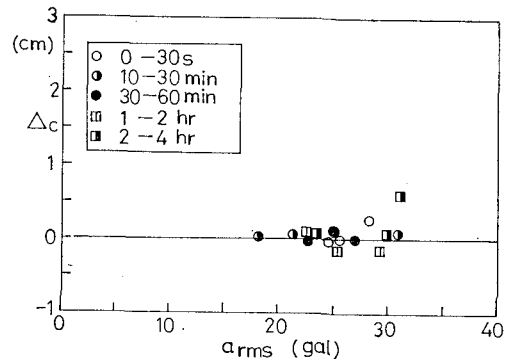


図-9 沈下量と2乗平均加速度との関係 (グラベルマットと吸い出し防止シートを敷いた離岸堤)

を敷くことによって、離岸堤の沈下がかなり小さくなることから、ブロックのみの離岸堤の沈下が砂の吸い出しによって生じていること、およびブロックの振動による締め固めによる沈下量も模型実験では比較的小さいことがわかる。

4. 結 論

碎波衝撃波力を受ける海岸構造物の振動特性および沈下との関係を調べるために、模型実験を行った結果以下のようなことが明かとなった。

(1) 構造物の振動加速度が大きくなる条件は、波高が大きくしかも離岸堤沖側斜面でちょうど碎波する場合であった。このとき計測された最大加速度は、100~200 gal にも及んだ。

(2) 模型離岸堤は、その構造形式によっても幾分異なるが、平均振動数が 40 数 Hz~60 数 Hz、2 乗平均加速度が 10 数 gal~30 数 gal で振動していることがわかった。

(3) 離岸堤の振動の発生源を調べたところ、数多くの場合において、離岸堤の沖側法面で碎波し衝撃碎波圧がブロックに作用する時に発生していることがわかった。

(4) 今回の実験では、構造物の振動加速度は比較的大きかったが、平均振動数が 40 数 Hz~60 数 Hz とかなり大きいので、2 乗平均変位は 10^{-4} cm のオーダーであると推測された。このことより、模型実験ではセン断変位も 10^{-4} cm のオーダーであるので、局所的な液状化の発生の可能性は低いと考えられる。

(5) ブロックのみでできた離岸堤の場合、沈下量と 2 乗平均加速度との間に比較的高い相関が見られた。しかしながら、構造物の振動によってのみ沈下が生じるとは言えない。今回の実験では、振動よりも戻り流れによる砂の吸い出し作用の方が沈下の原因の大部分を占めていることが、ビデオ画像より確認された。

(6) 以上のことより、模型実験では歪模型となり現地で海岸構造物の沈下の真のメカニズムを明らかにするには限界がある。今後、現地実験で振動を計測し局所的な液状化の発生の可能性を探ることが望まれる。

最後に、本研究は平成 2 年度文部省科学研究費奨励研究 (A) の補助を受けたことを付記し、感謝いたします。

参 考 文 献

- 泉宮尊司・古俣弘和・飯田秀樹 (1989): 波浪による海底地盤の液状化発生条件および海底谷のある海浜への適用, 海岸工学論文集, 第 36 巻, pp. 784-788.
- 善 功 企・山崎浩之・源辺 篤 (1987): 海底地盤の波浪による液状化および高密度化, 運輸省港湾技術研究所報告, 第 26 巻, 第 4 号, pp. 125-180.
- 善 功 企 (1984): 海洋開発における波と海底地盤の動的問題, 昭和 59 年度港湾技術研究所講演会講演集, pp. 77-133.
- 糖沢宏二・宇多高明・宮崎光弘 (1986): 離岸堤の沈下対策に関する現地実験, 第 33 回海岸工学講演会論文集, pp. 422-426.
- 豊島 修・坂本忠彦 (1972): 離岸堤の沈下について, 第 19 回海岸工学講演会論文集, pp. 71-75.
- 浜口達男・宇多高明・市ノ瀬栄彦・五十嵐晃 (1989): 新潟海岸の人工リーフの沈下実態調査, 海岸工学論文集, 第 9 巻, pp. 434-438.
- 本間 仁・堀川清司 (1959): 潜堤に関する研究 (II) —沈下機構ならびに維持—, 第 6 回海岸工学講演集, pp. 114-120.
- 前野賀彦・酒井哲朗・間瀬 肇 (1988): 波浪による砂層の液状化傾向と波形勾配との関係, 海洋開発論文集, Vol. 4, pp. 5-10.
- 宮本卓次郎・吉永 茂・曾我富士雄・清水謙吉・川又良一・佐藤峰雄 (1986): 孔間弾性波探査法による離岸堤の埋没状況に関する考察 (その 2), 第 33 回海岸工学講演会論文集, pp. 427-431.
- Okusa, S. (1985): Wave-induced stresses in unsaturated submarine sediments, *Geotechnique*, Vol. 35, pp. 517-532.
- Zen, K., Y. Umehara and W. D. L., Finn (1986): A case study of the wave-induced liquefaction of sand layers under the damaged breakwater, *Proc. 3rd Canadian Conf. on Marine Geotech. Eng.*, Vol. 2, pp. 505-520.