

委員会報告
COMMITTEE
REPORT

【委員会報告】

海岸海洋構造物基礎地盤の波浪安定性

STABILITY OF FOUNDATION OF COASTAL AND OFFSHORE STRUCTURE UNDER WAVES

土木学会海洋開発委員会波浪・海底地盤・構造物相互作用研究小委員会

Subcommittee on Wave-Seabed-Structure Interaction,
Committee on Civil Engineering in the Ocean

1. まえがき

土木学会海洋開発委員会の中に「波浪・海底地盤・構造物相互作用」研究小委員会が設置されたのは、平成4年10月であった。この年の4月に、海洋開発委員会主催の講習会として、「沿岸域の開発における海底地盤の波浪応答」講習会が開催されている。この講習会は上記小委員会の準備会として、重力式海洋構造物の基礎地盤及び捨石式防波堤とその基礎地盤の波浪安定性、海底地盤そのものの波浪安定性、漂砂、洗掘現象における海底地盤の波浪応答の効果、さらにこれらの現象に共通する波浪によって発生する海底地盤内の間隙水圧などについて、その現状をレビューした結果を公表したものである。この準備会の成果をもとに、改めて上記の小委員会が設置され、とくにケーソン式防波堤のマウンドおよび基礎地盤の波浪安定性に関してさらに詳細に検討し、何らかの提言を行うこととなった。

小委員会では、当初捨石式防波堤の信頼性設計に関してオランダの研究者、技術者がまとめた報告書¹⁾を検討し、さらに数多くの関連文献をレビューし、ケーソン防波堤特にそのマウンドと基礎地盤の設計における対波浪安定性の取り入れ方の現状および被災例を検討して、波浪によるその変形、破壊機構を議論した。その結果、現状ではその理解は不十分で信頼性設計を行うまでには至っていない事が痛感されたが、現時点においてもケーソン防波堤の破壊のフォールトツリーを作ることは有意義なことと考え、問題点が数多くあることを承知のうえで敢えて1つのフォールトツリーを作成した。以上の成果は平成7年9月に報告書としてまとめられた。

報告書には、上述したオランダの捨石式防波堤の信頼性設計に関する報告書¹⁾の日本語訳を付録として添付している。またこの報告書をもとに、平成7年9月7日の報告と同じタイトルの講習会を土木学会において開催した。

なお本報告では、若干用語の不統一がある。防波堤に関しては、「捨石式防波堤」と「捨石式傾斜堤」を同じ意味で用いていること、また「ケーソン式混成堤」に対して、やや広い意味で「ケーソン防波堤」を用いている。

2. ケーソン式混成堤の基礎の設計の現状

ここでは、ケーソン式混成堤の基礎の設計についてわが国における現状²⁾を紹介するが、最後に一般的な海洋構造物における基礎地盤の設計に関する外国における考え方の例として、繰り返し荷重の効果を考慮しているノルウェー船級協会の規則³⁾についても紹介する。

(1) 基礎の支持力に対する検討

捨石マウンドの下部の基礎地盤の支持力は、浅い基礎に対する以下の支持力式により検討する。

・砂質土地盤

$$q_a = \frac{1}{F} (\beta \gamma_1 B N_r + \gamma_2 D N_q) + \gamma_2 D$$

・粘性土地盤

$$q_a = \frac{1}{F} N_c c_0 + \gamma_2 D$$

ここに、 q_a ：許容支持力（水中部の浮力を考慮した値, tf/m^2), B ：基礎の最小幅（円形基礎の場合は直径, m), γ_1 ：基礎底面から下の地盤の単位体積重量（水面下にある部分は水中単位体積重量, tf/m^3), γ_2 ：基礎底面から上の地盤の単位体積重量（水面下にある部分は水中単位体積重量, tf/m^3), D ：基礎の根入れ深さ (m), c_0 ：基礎底面における粘着力 (tf/m^2), F ：安全率, N_r , N_q ：支持力係数, β ：基礎の形状係数である。 N_r , N_q は内部摩擦角に対して、 N_c は基礎幅と地盤の粘着力に対して、それぞれ図示されている。安全率は、重要な構造物に対して2.5以上、その他の構造物に対して1.5以上を標準とする。なお、これらの支持力式は、波のない

場合の鉛直支持力を与えるもので、波圧時には次に述べる偏心傾斜荷重に対する支持力に対する検討を行う。

(2) 偏心傾斜荷重に対する支持力

波力を受ける防波堤に作用する外力の合力は通常偏心し傾斜している。このため基礎捨石の安定性の検討においては、偏心傾斜荷重に対する支持力の検討を行う。また、ケーソン式混成堤の場合、基礎地盤の上に捨石マウンドを有する二層系構造をなしており、検討方法はこの特性を十分反映したものであることが必要である。従来は、各種の支持力算定法を組み合わせて検討を行う方法が採用されてきたが、現在は波圧時を対象としてビショップ法による円形すべり解析法に基づいて基礎の支持力を検討するのを標準としている。ただし、同等の設計条件に対して十分な支持力の実績が確認されている算定法については、それによることができる。

ビショップ法によると、安全率 F は図-1 の表示のもとに次式で与えられる。

$$F = \frac{1}{\sum(W_1 + W_2) \sin \alpha} \sum \left\{ c' b + \tan \phi' \times (W_1 + W_2 - bu_s + X_n - X_{n-1}) \frac{\sec \alpha}{1 + \frac{\tan \alpha \tan \phi'}{F}} \right\}$$

ここに、 W_1 ：水位から上の土の重量 (tf/m)、 W_2 ：水位以下の土の重量 (tf/m)、 X_n 、 X_{n-1} ：細片 n 、 $n-1$ に作用する鉛直方向せん断力 (tf/m)、 b ：細片の幅 (m)、 α ：細片底面が水平となす角 (度)、 c' ：有効応力に基づく見かけの粘着力 (tf/m^2)、 ϕ' ：有効応力に基づく見かけのせん断抵抗角 (度)、 u_s ：斜面外側の水位に相当する静水圧を超過した分の間隙水圧 (tf/m^2) である。

ビショップ法による場合の安全率は、波圧時 1.0 以上である。なお、この方法では、捨石マウンドおよび基礎地盤の強度定数（粘着力 c 、せん断抵抗角 ϕ ）を試験などで決めることが望ましいが、標準的な値として、一般的な捨石に対して、粘着力（見かけの） $c = 2\text{tf}/\text{m}^2$ 、せん断抵抗角 $\phi = 35$ 度、 N 値 10 以下の砂地盤に対して $\phi = 40$ 度、 N 値 10 以上の砂地盤に対して $\phi = 45$ 度が用いられる。

(3) 全体のすべりに対する検討

全体の円形すべりに対する安全率は、チエボタリオ法と呼ばれる算定式により算定される。この際の安全率は、常時 1.3 を標準としている。この方法は、ビショップ法に比較して斜面破壊の実情をよく説明するとされ、港湾では広く用いられている。ただし、砂層厚の大きい地盤を切る円形すべりに対しては安全側すぎる値を与えることが指摘されており、過去の実績では、砂地盤を主

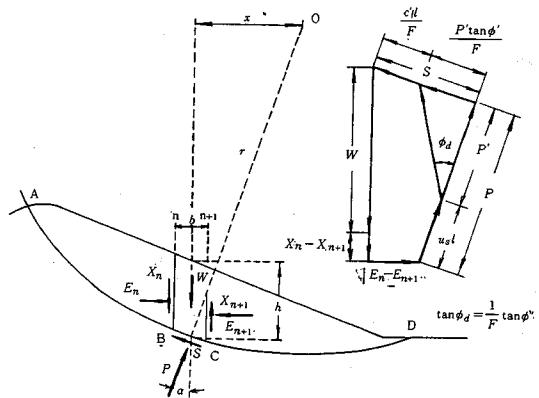


図-1 ビショップ法による斜面の安定計算

体とする安定計算の場合には、チエボタリオ法で計算した安全率を 1.1 から 1.2 と小さめにとる例が多い。安定計算法の基本的考え方からみれば、このような場合に対しては、ビショップ法の方がより実情にあってると見られる。特に、マウンドの支持力の際に問題となるような偏心傾斜荷重が加わる場合は、チエボタリオ法では現象が全く説明できないことが明らかにされている。そのような問題に対しては前節で述べたビショップ法を用いた方がよい。

ケーソン式混成堤の場合、円形滑りに対する安全率は、波圧を受けないときは 1.3、波圧を受けるときは 1.0 以上を標準とするが、波圧を受ける時の円形滑りについては、偏心傾斜荷重に対する安全性をビショップ法で確認した場合には検討しなくてよい。このほか、堤全体の沈下について検討を行い安全性が不足する場合には、地盤改良などの対策を講じる。

(4) ノルウェー船級協会規則^③

沖合いに建設される大型土木構造物に対する設計技術基準の 1 つとして、ノルウェー船級協会 (DNV, Det Norske Veritas) が定める北海石油掘削用プラットフォームを対象とした「海洋構造物の設計・施工および検査に関する規則 (Rules for the Design, Construction and Inspection of Offshore Structures)」^③がある。当規則は早くから設計思想に確率・統計論的な考え方を導入した規則として注目されている。防波堤を対象とした規則ではないが参考とすべき点もあるので、以下に当規則「9 節 基礎 9.3 設計で考慮すべき事項」に記述されている「繰り返し荷重」に対する考え方について紹介する。

- ・繰り返し荷重の地盤の特性値に対する影響を、関連するすべての設計計算に考慮しなければならないと規定し、繰り返し荷重として、波力と地震力の 2 種類を挙

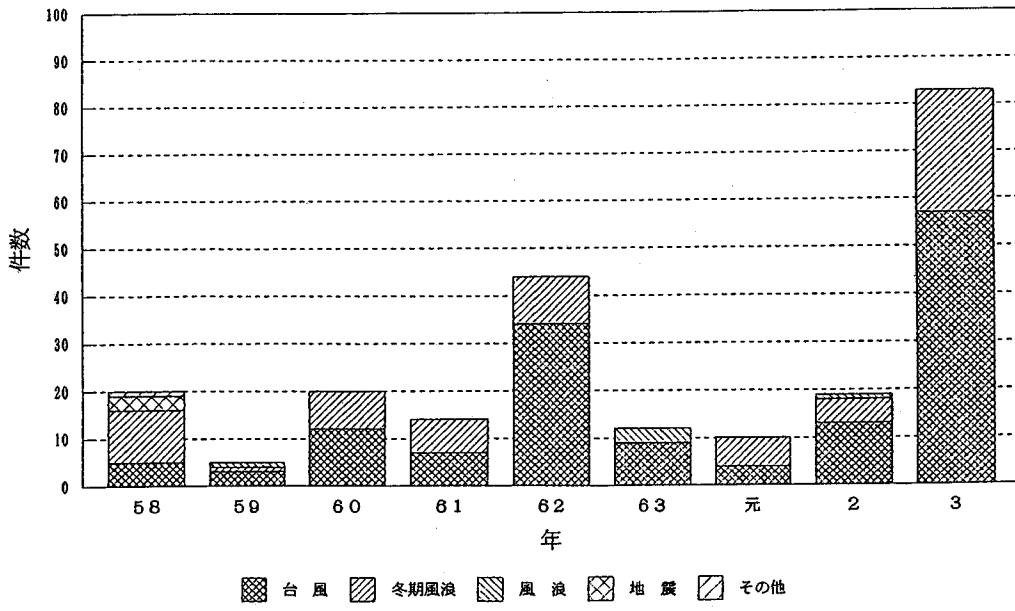


図-2 年・原因別被災数

げている。このうち波力については、次の条件下について検討するよう規定している。

- ・(プラットフォーム) 設置時および圧密期間中の設計暴浪時の影響
- ・100年確率暴浪時の影響(短期的影響)
- ・100年確率を含むいくつかの暴浪により累積した影響(長期的影響)
- (以上、同規則9.3.3.1から9.3.3.3)
- ・繰り返し荷重により、地盤中に発生する繰り返せん断応力の作用は、間隙水圧の増加を引き起こすこともあり、この間隙水圧の増加並びにそれと同時に起こるせん断ひずみの周期的・永久的な増加は、土のせん断強度を減少させるおそれがある。従って、終局限界状態の照査では、繰り返し荷重の土のせん断強度に対する影響を
- ・破壊面に沿ったすべり
- ・過大な周期的変形による「周期的荷重による破壊(failure in cyclic loading)」
- に関連する解析で考慮すべきであると規定している。
- 一方、使用限界状態の照査では、繰り返せん断応力の作用による土のせん断弾性係数に対する影響を
- ・動的な挙動
- ・沈下や水平変位
- の評価に考慮すべきであると規定している。
- (以上、同規則9.3.3.4から9.3.3.6)

以上のように当規則では、「繰り返し荷重」の効果を

考慮するように明確に規定している。しかしながら、安定解析手法については、全応力解析あるいは有効応力解析を用いることが明示されているが、「繰り返し荷重」の効果の具体的な評価方法については言及されていない。

3. わが国におけるケーソン式混成堤の被災例

(1) 最近の被災概況

防波堤は、台風や冬期風浪などにより過去に多くの被災を受けている。これらの被災状況は、「被災防波堤集覧」として、これまで3巻の資料がとりまとめられている^{4),5),6)}。最新のものは、昭和58年から平成3年(1983年から1991年)までの9年間の防波堤の被災状況がまとめられている⁷⁾。被災額3,000万円以上の被害の発生件数を年・原因別に見ると、平成3年の被災件数が最も多く、昭和62年がそれに次いで多いが、他の年は比較的少なくなっている(図-2)。この原因是、平成3年は、2月の冬期風浪、9月の台風19号、昭和62年は、10月の台風12号によるところが大きいと報告されている。各年の内訳を見ると、台風によるものがほぼ半分以上となっており、猛烈に発達した低気圧と強い冬型気圧配置による冬期風浪が次となっている。地震による防波の被害は、昨年の阪神淡路大震災を含めていないので当然であるが、極めて少ないのが特徴的である。

原因・状況別の被災数に関しては、台風による被害では、堤体の滑動・転倒と消波工の被害がほぼ同程度であ

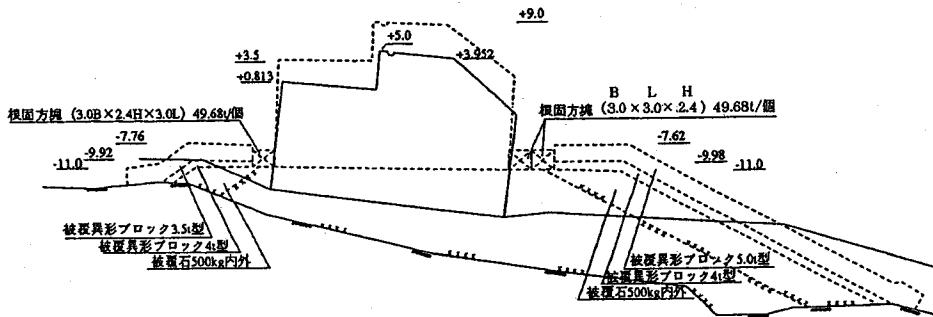


図-3 被災状況例（傾斜、滑動、消波ブロックの散乱・流出）

No.	被 灾 原 因
1.	設計波が小さい（沖波、スペクトル法に対し推算のTが小さい）ことによる
2.	波圧算定式の妥当性（広井式、サンフルー、合田式）
3.	異常潮位（偏差ふきよせ）による
4.	波浪変形係数の求め方（屈折、回折、浅水）の不備による
5.	衝撃碎波の発生による
6.	洗掘（越波含む）及び吸い出しによる
7.	水深及び地形の変化（周辺防波堤の新設による反射波）による
8.	隅角部の波高増大（堤頭部）による
9.	堤体重量不足（コンクリート単体、中詰材）による
10.	基礎部の被災による本体への影響
11.	施工途中（手戻り）
12.	老朽化
13.	その他考えられること

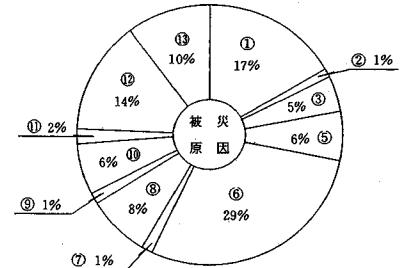


図-4 考えられる被災原因（アンケート調査結果）

るのに対して、冬期風浪による被害では、消波工の被害が圧倒的に多くなっているのが特徴的である。全体として見ると、消波工の被害が最も多く34.8%，堤体の被害が21.7%，捨石マウンドなどの基礎工の被害が17.1%となっており、以下根固め工の被害8.4%，被覆工の被害3.8%，その他14.2%となっている。

昭和40年（1965年）から平成3年（1991年）までの年度別被災数に関しては、昭和40年、45年に年200例の被災が生じた後は、被災数でこれらに匹敵する年はないが、平成3年に21年ぶりに200例を越えている。これらの3年は個別の台風による被災が100例を上回っており、被災数は台風の来襲する頻度よりは、個々の台風の規模に依存している。

（2）被災形態

ケーソン式混成堤の被災形態については、1.上部工の移動、傾斜、破壊、2.ケーソンの滑動、傾斜、転倒、破壊、沈下、3.基礎捨石マウンドの変形、沈下、散乱、4.被覆工の散乱・流出、5.消波ブロックの散乱・流出、沈

下、破損、6.基礎地盤のすべり破壊、支持力破壊、沈下、7.捨石マウンド法先地盤の洗掘や吸い出し、などがある。

図-3は、消波ブロック被覆堤の被災例で破線が被災前、実線が被災後の状況である。ケーソンが滑動、傾斜、破壊し、50t型の消波ブロックが散乱・流出している例である。基礎捨石マウンド前面法先部も洗掘されている。このように、ケーソンの移動が見られる場合には、基礎捨石マウンドにもなんらかの被害が発生しているのが普通である。

図-4には、平成3年に発生したある地域の被害について、担当者に被災原因に関するアンケート調査を行った結果が示されている。被災原因についての厳密な解析が行われた訳ではないが、興味深いので挙げておく。この結果によると、洗掘および吸い出しが最も多く、次に設計波が小さい、老朽化となっている。

4. ケーソン防波堤のマウンドおよび基礎地盤の変形・破壊の機構

3. で述べたように、残念ながらこれまで我が国で建設されたケーソン式防波堤で被災した場合が少なからずある。その原因、状況として、堤体の滑動や転倒および消波工の被害の他に、基礎工、根固め工および被覆工の被害も少なからずあり、また被災原因の調査の結果として、洗掘および吸い出しが最も多かったという結果が出ている。このことは、何らかの意味で基礎捨石（マウンド）および基礎地盤が被災の機構に関係している可能性を示唆するものである。ここでは、マウンドおよび基礎地盤の変形、破壊機構に関して、捨石式傾斜堤とケーソン防波堤についての既存の研究の紹介と、新たな考察を行う。

（1） CIAD プロジェクトグループ報告書¹⁾

CIAD (Computer Aided Evaluation of the Reliability of a Breakwater Design) プロジェクトは、「コンピュータモデルを用いて、いかにして防波堤の設計を評価、最適化するか」ということを目的としたプロジェクトで、捨石式傾斜堤の設計をリスクアナリシスの観点から行うための方法について論じている。その中には、防波堤の安定性を地盤工学の側面から検討する項目が設けられており、堤体や基礎地盤の変形・破壊の評価が防波堤の安定性に重要な位置を占めていることが推察される。

ここでは、捨石式傾斜堤を対象として取りまとめられた CIAD プロジェクトの報告書の中で、堤体と基礎地盤の変形・破壊機構に関する部分の安定性評価の考え方を取り上げて概説する。

a) 捨石式傾斜堤の堤体や基礎地盤の変形・破壊のモード

捨石式傾斜堤は一般に、基礎地盤、フィルター層、コア部、法面部、法先部、上部工といった要素で構成されている。これらの要素からなる捨石式傾斜堤の変形・破壊の代表的なモードを概念的に示したのが図-5である。

また、CIAD プロジェクト報告書では、捨石式傾斜堤の機能に影響を及ぼす堤体や基礎地盤の変形・破壊のメカニズムを大きく分けて、堤体や基礎地盤のすべり破壊、基礎地盤が圧縮性である場合の沈下および空洞が存在する場合の空洞の崩壊の 3 つに分類している。

特に、過度の波力や地震力といった外力の作用による堤体や基礎地盤のすべり破壊については、次の 2 つの破壊モードに特に着目する必要がある。

・堤体の安定性（全体安定性）

堤体の安定性とは、構造全体の安定性を指し、防

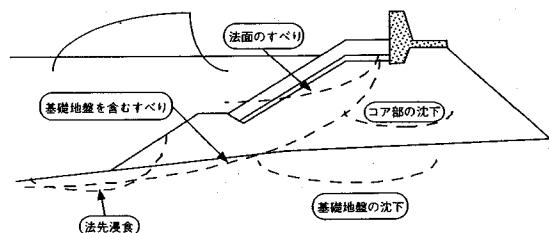


図-5 捨石式傾斜堤の変形、破壊モードの概念図¹⁾

波堤の機能維持に対して直接的に影響を及ぼす。

・堤体の法先部の安定性（局所安定性）

堤体の法先部などは部分的に不安定現象が生じても、直ちに防波堤の機能を損なうものではないが、最終的には全体安定性にかかわる可能性があることから、防波堤の機能維持に対して間接的に影響を及ぼす。また、このようなすべり破壊が発生する要因として以下の項目が挙げられる。

- ・捨石や基礎地盤の限界せん断強度
- ・傾斜部斜面の限界勾配
- ・海底砂地盤の液状化やサイクリックモビリティ
- ・波や地震による過剰間隙水圧の上昇
- ・地震による加速度

安定性評価において考慮すべき荷重条件としては、波浪荷重、地震荷重、重力、建設中の荷重の 4 つが挙げられるが、報告書では主に最初の 3 つを対象として検討を行っている。

b) 安定性評価

すべり破壊に対する安定性評価は、波浪荷重ならびに地震荷重に対して行われるが、ここでは波浪荷重についてのみ紹介する。

・波浪荷重に対するすべり安定性評価

CIAD レポートでは、波浪荷重によるすべり破壊に対して、波浪によって堤体内に生じる自由水面や間隙水圧の変動が重要な役割を果たすことが指摘されている。これは、捨石式傾斜堤の法面安定の評価において堤体の浸透流場の評価が重要であることを示しているが、この問題はシネス港西防波堤の被災原因の研究以来、脚光を集めようになってきた。この点について、CIAD レポート¹⁾にはその詳細が述べられていないが、最近「土と基礎」の講座（海洋構造物の支持力特性 2. 大水深捨石防波堤の安定性（1）～（3））に掲載された Barends 教授の報告（訳者：関口秀雄）^{8), 9), 10)}においてより詳しい解説がなされている。

この論文の中に記載されている内容の中で、CIAD レポートに関連した主要な部分を紹介すると以下のようにになる。

波浪や潮汐の作用によって水面が変動すると、捨石

式傾斜堤内の浸透流場も変化する。ここで重要なのは、波の影響範囲、堤体内での平均自由水面の上昇（セットアップ現象）、法面内外での自由水面差、堤体内での浸透流場の変化である。このような堤体内での自由水面の変化や浸透流場の変化は堤体中に生じる間隙圧の変化をもたらし、ひいては捨石など粒状体のせん断強度を左右する有効応力の変化につながるため、法面のすべり安定性評価において重大な影響を及ぼすことになる。従って法面内外の波浪による流体運動と堤体内の浸透流場の連成解析が必要となるが、CIAD レポートではデルフト地盤工学研究所で開発された解析コード「HADDEER」を適用している。

一方、堤体法先部の局所安定性評価においては、特に海底地盤がゆるい砂地盤の場合に重要となる。波浪によってゆるい砂地盤に液状化現象が発生すると、防波堤の先端が崩壊する。被覆層が滑落すると、非防護のコアが直接波にさらされることになり、ひいては堤体の安定性を脅かすことにつながりかねない。この評価に当たっては、波の繰り返し作用による砂層内の過剰間隙水圧の変化を予測する必要がある。厳密には、できるだけ搅乱の少ない試料を原位置からサンプリングし、室内試験を行って、解析に用いる土質パラメータを決定した上で、間隙水圧の発生・消散を考慮しうる解析を行って、波による地盤のせん断強度の減少を有効応力の観点から評価するべきである（4.(3) 参照）。

以上の検討の後、全体安定性および局所安定性の両者について、ビショップ法に基づく円弧すべり解析が行われる。CIAD レポートでは、この解析に解析コード「STAGROM」を用いている。コードの詳細は不明であるが、上記の間隙水圧を考慮している点と、捨石のような特殊材料の摩擦挙動の評価に特徴があると述べられている。

・波の衝撃力に対する安定性評価

地震地帯では、地震後の津波の問題も考慮する必要があろうし、地形的条件や諸法律上の問題で、場合によつては碎波帶付近に構造物を建設せざるを得ない場合も考えられる。この場合には、通常考える波浪に加えて碎波や越波による衝撃荷重に対する検討も重要な可能性がある。CIAD レポートでは、この点に関する記述はほとんどなされていないが、前記「土と基礎」の講座において多少詳細な解説がなされているので簡単に紹介する^{9),10)}。

碎波や越波による荷重は、構造物に対して衝撃的な力となって作用することから、これらの荷重に対する堤体の応答や安定性は、上述のすべり面解析のような静的安定解析では十分とは言えず、動的検討を行うのが正當なやり方といえる。また、堤体の変形や破壊の

評価においては、間隙水圧の変化、換言すれば、有効応力の変化の把握が重要となることから、堤体材料の透水性、すなわち浸透流場も考慮しうる動的二相系解析が適用されるべきであると言える。

弾性係数に拘束圧依存性を考慮し、破壊条件にモール・クーロンの基準を適用した非線形弾性解析を用いて、上部工に碎波や越波による衝撃力に相当する荷重を作用させた解析をシネス港西防波堤を例に実施した結果によると、透水係数が大きくなると間隙流体と構造骨格の相対運動が著しくなり、間隙圧と有効応力の変化に位相差が生じること、上部工が内法面側に浅いすべり破壊の傾向を示すこと、が指摘され、諸検討の結果、復旧断面については内法面勾配も緩やかなものに修正されたことが示されている。

なお、このような動的二相系の解析は、防波堤の耐震性評価に関連した検討にも適用することが可能である。

ここでは、ケーソン防波堤の基礎地盤の変形・破壊機構の前段として、捨石式傾斜堤を対象とした CIAD レポートを取り上げ、詳細部分については「土と基礎」に掲載された関連講座を参考しながら、地盤工学上の安定性評価の考え方について概説した。その多くは、シネス港西防波堤の被災を契機として進展してきたものであり、安定性評価も従来の静的な検討から、現象をより正確に評価しようとする動的検討に移りつつあるようである。ただし、捨石といった粗粒の材料の諸力学特性の解明など、今後に残された課題も多いと言えよう。

(2) Oumeraci の vertical breakwater に関する論文¹¹⁾

海岸工学に関する雑誌 Coastal Engineering の 1994 年の第 22 巻の特集号は、vertical breakwater と題して、ドイツのハノーバー大学の Oumeraci 他の編集したケーソン防波堤に関するもので、その最初に Oumeraci が過去のケーソン防波堤の被災例を検討してそこから得られる教訓という形でその問題点を示している。

著者は、論文のまえがきで、この時点でケーソン防波堤を取り上げた背景を述べている。防波堤に関しては、1930 年代と 80 年代に 2 つの大きな被害があった。30 年代のそれはケーソン防波堤が世界各地で被害を受けたものであり、80 年代のそれは大水深の捨石防波堤が被害を受けたものである。30 年代の被災の後は日本を含めたいいくつかの国を除いてケーソン防波堤が作られなくなり、80 年代の被災の後は古い berm breakwater の考えが再検討されつつある。一方、最近の船舶の大型化によって防波堤の設置水深も増加し、欧米ではその経済性その他の理由でケーソン防波堤が再び注目を浴びている。ただし再びケーソン防波堤を採用する前に、その過去の被

災例を包括的に検討することが重要であるというのが、著者の基本的姿勢である。

まず、これまでのケーソン防波堤の被災例を可能な限りにおいて世界各国から収集し、その被災原因として考えられることを表示している。被災原因を、構造物、水理条件および荷重、基礎と地盤および海底地形に関するこの3つに分類している。3.で示した日本におけるケーソン式混成堤の被災例と重複している可能性があるが、改めて表-1に示している。表ではケーソン前面に消波工のないものをvertical breakwater、あるものをarmoured vertical breakwaterとして分けて示している。また、原論文ではマウンドの侵食はerosion of RMF、海底の洗掘はseabed scourとなっている。

表から分かるように、マウンドの侵食が最も多く、ついで沈下、さらに海底の洗掘となっている。3.の最後に紹介した平成3年のわが国のある地域での被害についてのアンケートの結果と類似していることは興味深い。なお個々の防波堤の被害原因是、構造物に関する原因や水理条件および荷重に関係する原因と併記されている場合が多いが、上述の3つのマウンドと基礎地盤に関係する原因が挙げられている防波堤は、全22例中18にのぼる。

地盤および海底地形に関する被災原因について、著者は「海底洗掘およびマウンドの侵食」と「純粹に地盤工学的破壊」に分けて述べている。前者については、破壊の機構として「マウンドの上層部の侵食」、「マウンドの斜面の前面の海底洗掘孔への滑り」、「ケーソンの前後端から発生するせん断破壊」の3つを挙げている。

一方、ケーソン防波堤の被災原因のうち純粹に地盤工学的なものに関しては、1976年のPIANCの報告書では全く触れられていないこと、実際現実の設計でも地盤に関しては静的の設計をしていることを明記した後、基礎及び地盤の破壊モードをよりよく理解するには、以下の事を念頭に置くべきだと述べている。

- ・波による衝撃荷重および繰り返し荷重は、ケーソンのロッキングによってマウンドと地盤に伝達される。
- ・繰り返し荷重は、波動運動により直接的にもマウンドと地盤に伝達される。
- ・衝撃荷重と繰り返し荷重のもとで、地盤は以下の2つの可能な機構によって、許容以上の永久的な変位を起こす：

 - (1) 繰り返し荷重の1サイクル毎に間隙水圧が上昇し、その強度を失って大きな永久的変形に至る(液状化)。
 - (2) 発生した応力のピークが許容強度を超える短い時間の間小さな永久変位が生じ、これが暴浪の間繰り返されて間隙水圧の上昇なしで大きな永久変形に至る。

表-1 ケーソン防波堤の被災例¹¹⁾

防波堤	マウンドの侵食	海底の洗掘	沈下
(vertical breakwater)			
Madras (1881)	x	x	
Bizerta (1915)	x		
Valencia (1926)		x	
Antofa-Gasta (1928-29)			
Catania (1930-33)			x
Genoa (1955)			
Algiers (1930, 34)	x	x	x
Niigata (1976)			x
Bari (1974)	x		
Palermo (1973)	x		
Naples (1987)			
Mashike			
Fukaura	x		
Sakata			x
Onahama	x		
Niigata-West J.	x		
Niigata-West B.			x
(armoured vertical breakwater)			
Ventotene (1966)	x		
Rumoi	x		
Ishikari-New Port	x	x	
Oshidomari	x		x
Miyako	x		

ただし著者は、自らの大型水路での実験の結果¹²⁾から、波の周波数が低いことおよび通常の砂地盤の排水条件を考えると(1)の機構(液状化)は可能性が低いと述べている。

またマウンドおよび地盤は、その沖側と陸側で沈下量が異なることがある、すべり面が両側に生じることがあることを指摘している。これは主に構造物に作用する波力の間欠性による。その結果基礎地盤が基礎の下部から沖側と岸側にすべり面上を押し出されることがよくある。この例が、図-6に示されている。

さらに、ケーソンのロッキング運動によって、ケーソンの沖側と陸側の隅の位置の下のマウンドおよび地盤に繰り返し荷重が伝達され、マウンドの厚さに応じて破壊面がマウンド内にのみ存在する場合と、基礎地盤にまで達する場合とがあることを示している。

このように基礎及び地盤に関する破壊の現象が複雑なことから、構造物-地盤-波浪というシステムの動的な挙動を模擬出来るモデルの必要性を強調している。

表-1から分かるように、ケーソン防波堤の被災原因

表-2 マウンドおよび基礎地盤の破壊機構に対する捨石式傾斜堤¹⁾およびケーソン防波堤¹¹⁾の対応の比較

破壊機構	捨石式傾斜堤	ケーソン防波堤
前面海底面の洗掘	無視（事例研究では）	考慮
すべり破壊	考慮（間隙水圧変化考慮）	考慮（間隙水圧上昇否定）
沈下	考慮	考慮

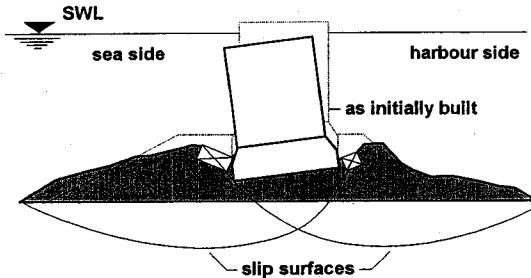


図-6 すべり面が沖側、岸側両方に生じる可能性¹¹⁾

の中で地盤に関係するものとして、マウンドの侵食、海底の洗掘および沈下を挙げている。一方、本文では沈下の他にマウンドおよび基礎地盤のすべり破壊の機構が説明されている。おそらく表でのマウンドの侵食という表現の中にはすべり破壊もその原因として含められているものと思われる。

(1) で述べたように捨石式傾斜堤の場合には、地盤工学的破壊として、堤体と基礎地盤のすべり破壊及び沈下が挙げられている。ケーソン防波堤のマウンドと基礎地盤のすべり破壊も、基本的には捨石式傾斜堤の堤体および基礎地盤のそれと同じと考えられる（表-2 参照）。また沈下も同様である。ただし荷重の伝達過程が構造形態の相違のために異なる、その結果捨石式傾斜堤の場合、その堤体と基礎地盤のすべり破壊の機構において、内部間隙水圧の変化を重要視しているのに対して、ケーソン防波堤では、繰り返し過重による間隙水圧の上昇の可能性を否定している。

一方、ケーソン防波堤では海底の洗掘は破壊原因の主要な1つとされているのに対して、捨石式傾斜堤ではその事例研究において傾斜堤前面の洗掘は無視されている。なお防波堤前面海底面の洗掘の機構において、前述した「波動運動による直接的な地盤への繰り返し荷重の伝達」の機構が無視出来ない可能性がある。すなわち海面に作用する波による水圧変動が海底面下の砂層中の間隙水圧変動を発生させ、それが波動運動によるせん断力による洗掘に影響を与えているかもしれない。

上述したような2つの報告書および論文の相違の理由の1つとして、捨石式傾斜堤に関する報告書が地盤工学

の専門家を中心まとめられ、ケーソン防波堤に関する論文が水工学の専門家によってまとめられたことが考えられる。波浪・海底地盤・構造物相互作用研究小委員会は、水工学、地盤工学、構造工学の3者の境界領域の現象に興味を持っている。その意味で上記2つの文献の相違は興味深いものであるとともに、どちらにも偏らない立場で議論をする必要性を痛感する。

(3) 動的設計への課題

a) 基礎地盤のせん断抵抗

過去の防波堤の被災例を見ると、施工中もしくは建設後数年のうちに被災する防波堤がかなり多い。逆に言えば、ある程度年月を経れば、防波堤は安定化していくことになる。この理由の1つに、設計波高程度の大きな波が来襲する前に小さな波の履歴を受けることによって、基礎捨石や基礎地盤が締め固められせん断抵抗が増加する事が考えられる。ケーソン据えつけ前に捨石マウンドをしばらく放置し安定させるのもこのような考えに基づくと言える。一方、基礎地盤の層構成から排水性が低い場合、(2) で述べたように、波の繰り返し作用によって過剰間隙水圧が上昇せん断抵抗が減少する可能性がある。図-7は、このような過剰間隙水圧の上昇によるせん断抵抗の減少を考慮した場合と考慮しない場合の円形すべりに対する安全率の違いを示したものである。前者は後者に比べ安全率が小さくなってしまっており、基礎地盤の状況によってはせん断抵抗の減少を考える必要がある。

b) 液状化

波浪の作用によって海底の砂地盤が液状化する可能性は、既に理論解析、室内実験、現地観測などで示唆されている。液状化を引き起こす原因には、波によって海底地盤内に生じる繰り返せん断力と浸透力がある。これらの力の違いによって発生する過剰間隙水圧の特性が異なる。液状化が発生すると地盤のせん断抵抗はほぼ0になるので、基礎捨石の沈下や異形ブロックの沈み込み等、地盤に支持された構造物の変状を引き起こすと考えられている。

c) 洗掘

(2) で述べたように、洗掘によると思われる防波堤の被害は非常に多い。しかし、そのメカニズムと対策に

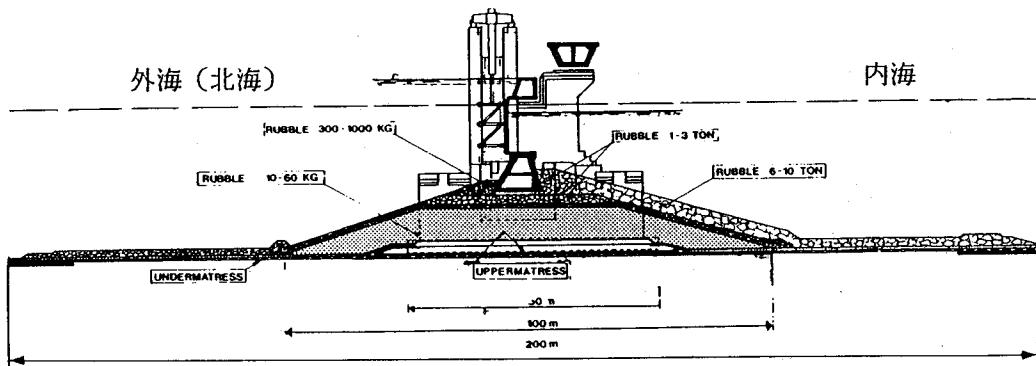


図-8 オランダ Eastern Scheldt 洪水堰

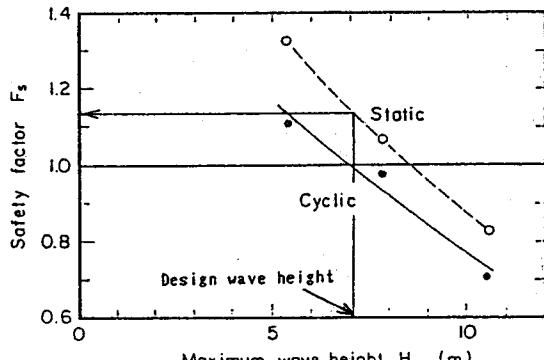


図-7 せん断抵抗の減少を考慮した安全率⁽¹³⁾

については十分解明されているとは言いがたい。従来、洗掘は海底表層部の流れや渦に起因するという考えが支配的であったが、最近では海底地盤中の水圧変動による液状化と密接な関連があるという考え方も出てきた。勿論、洗掘には海底の土を輸送する流れが不可欠であるが、これは、洗掘現象を流れという外力面のみから捉えていることになる。実際には、外力と洗掘に対する抵抗力の両面から現象を捉える必要がある。その意味では、海底地盤が液状化すると洗掘のポテンシャルが著しく増大するという点には留意する必要があろう。かなり安全側の仮定ではあるが、液状化した土がすべて輸送され、跡に土の補給がないとすれば、おおまかな洗掘範囲は計算できるようになっている。

5. 海洋構造物への信頼性設計法の適用例

以上、ケーソン防波堤の基礎地盤の設計の現状、被災例、基礎地盤の変形、破壊機構について述べてきたが、ケーソン防波堤の設計の新たな方向として、CIAD プロジェクトグループの報告書にあるように、信頼性設計が考えられる。基礎地盤の破壊機構が十分に分かっていない

い現状では、その実現は困難であるが、ここで不十分ながらも 1 つの試みとして、特に基礎地盤の破壊を中心にして、そのフォールトツリーを作成してみることは意義のあることと考えられる。ここではその前段階として、信頼性設計法を海洋構造物に適用した例を紹介する。

(1) 北海の重力式プラットフォーム基礎における安全性指標の推算値

Wu ら⁽¹⁴⁾は、北海における重力式プラットフォームの安全性について評価を行った。そこでは、同一の荷重条件、地盤条件であっても地盤強度の評価方法により、安全性指標 β の推算値が異なることを示している。すなわち、地盤強度をより正確に評価すれば、変動係数が小さくなることより、 β が向上することを例示している。

(2) オランダデルタ洪水堰における安全性指標

オランダ Eastern Scheldt 洪水堰（図-8）の建設に際して、信頼性設計に基づき、準確率的に、その安全性評価が行われた⁽¹⁵⁾。

構造物の重要性、すなわち万一破壊したときの人命、社会に及ぼす被災の大きさを考慮し、許容破壊確率は $10^{-7}/year$ 以下と設定された。この許容破壊確率は、オランダにおいて一般の事故により人命が失われる確率（約 $10^{-4}/year \cdot person$ ）と同等とすることにより定められた。つまり、洪水による犠牲者数を約 1,000 人と仮定した場合、年間の許容破壊確率は 10^{-7} ($10^{-4}/1,000$) となる。この破壊確率は、作用力、抵抗力が正規分布と仮定すれば、安全性指標 5.2 に相当するものである。

安全性の評価に用いた作用側および抵抗側の特性値は以下の通りである。

作用側として異常海象条件（主として水位上昇による静水圧）は、発生頻度が $2.5 \times 10^{-4}/year$ とした。つまり、4,000 年に一度生じる極めて希な作用荷重を考慮している。他方、抵抗側の特性値として、95% 信頼度を有す

る値を特性値とした。

ここで考慮した主な不確定要因は、作用水圧、支持地盤の内部摩擦角、根固め材の内部摩擦角、および抵抗力算定モデルである。これらの各要因の不確実性は、実験、経験に基づく標準偏差により表されている。また、洪水堰の安定性に係わる破壊モードとして支持力および滑動の両方について検討された。検討手法の詳細は、CIADプロジェクト報告書¹¹⁾に示されている方法とほぼ同一である。算定結果は、表-3に示す通りであり、前述の要求安全性（破壊確率 $\leq 10^{-7}/\text{year}$ ）を満足させるため、安全性を若干増加することにより対応が図られた。

6. ケーソン防波堤の被災のフォールトツリー

これまで、ケーソン防波堤の基礎地盤の設計の現状、ケーソン防波堤の被災例、ケーソン防波堤の基礎地盤の変形、破壊の機構に関する研究の現状および信頼性設計法の海洋構造物への適用例について述べた。ここでは、ケーソン防波堤を設計する際に問題となる波浪・地盤・構造物の相互作用などの問題点を明らかにすることを目的として、フォールトツリーを作成する。フォールトツリーの作成にあたっては、特に4.で示したケーソン防波堤の基礎地盤の変形、破壊の機構を参考にして、ケーソン防波堤の基礎地盤の変形、破壊メカニズム、およびそれを引き起こすと考えられる波浪・地盤・構造物の相互作用などの要因の関連性を明らかにするよう留意した。

(1) 基本方針

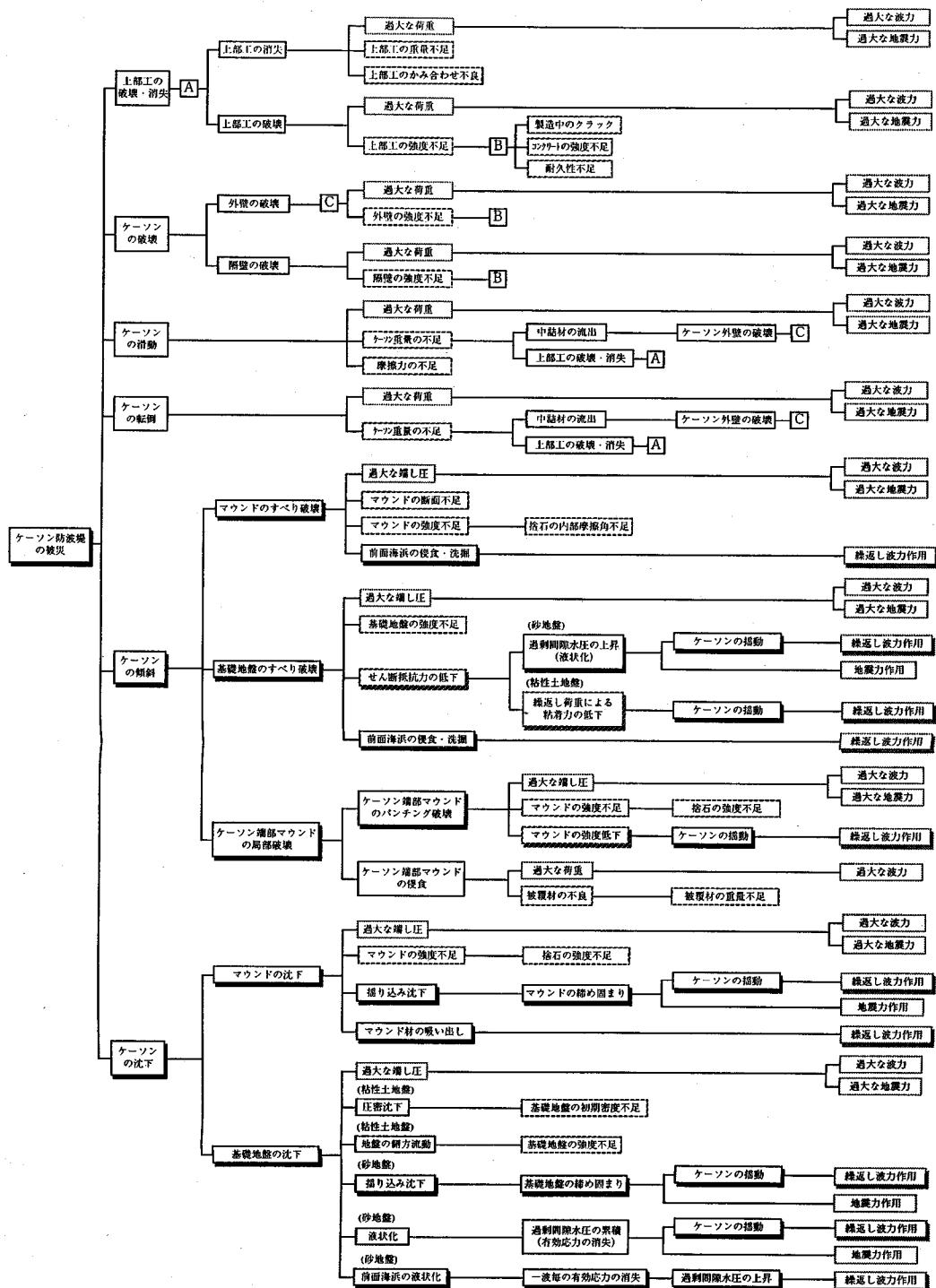
ケーソン防波堤の被災のフォールトツリーを作成する上での基本方針を以下に箇条書きで示す。なお、フォールトツリーの作成に当たっては、CIADプロジェクトグループ報告書¹¹⁾に示されている捨石式傾斜堤のフォールトツリーを参考とした。また、ケーソン防波堤の破壊メカニズムについては、4.で紹介したOumeraciの論文¹¹⁾などに示されている破壊メカニズムを参考とした。

- ・「頂上事象」は、ケーソン防波堤の構造的な破壊のみではなく、ケーソンの傾斜や沈下などによるケーソン防波堤の機能低下全般を想定し、「ケーソン防波堤の被災」とした。
- ・変状や破壊のメカニズムの関連性を明確にするため、その他の要因である「設計ミス」、「施工ミス」などの人為的ミスに起因する要因は除外した。
- ・ケーソン防波堤の基礎地盤の変形・破壊の機構の関連性を主目的としたため、「ケーソンの破壊」、「ケーンの滑動」、「ケーンの転倒」および「上部工の破壊・消失」に関するフォールトツリーの分析は大枠のみを示す簡略なものとした。

表-3 オランダ Eastern Scheldt 洪水堰における安全性¹⁵⁾

破壊モード	支持力	滑動
安全性指標 β	5.7	4.8
破壊確率 P_f	$5 \times 10^{-9}/\text{年}$	$7 \times 10^{-7}/\text{年}$

- ・ケーソン防波堤の全体的な変形、破壊モードに着目し、それに関連する要因を明確にするため、被覆石の不安定性などの局所的な破壊モードは除外した。
- ・ケーソン防波堤の変形、破壊モードの関連性の分析を主目的にしたため、荷重の確率特性などの荷重に関する詳細の分析を省略し、荷重に関連する事象を「末端事象」とした。
- ・抵抗力に関する事象についても、その詳細な分析は省略し、「末端事象」とした。したがって、フォールトツリーの「末端事象」は、「荷重に関する事象」あるいは「抵抗力に関する事象」の2種類である。
- ・フォールトツリーを構成する全ての事象は、「荷重」、「抵抗力」、「破壊メカニズム」に関連する事象の3種類に分類し、各々を明確に表示した。
- ・「ケーソンの転倒」は過大な荷重の作用による力学的な不安定事象のみに限定し、ケーソンの傾斜・沈下などの変形の進行に伴う転倒現象は「ケーソンの傾斜」および「ケーソンの沈下」に含めて考慮した。
- ・繰り返し波力作用に起因する「前面海浜の侵食・洗掘」に伴う「マウンドのすべり破壊」、「基礎地盤のすべり破壊」を考慮する。
- ・繰り返し波力作用に起因する「マウンド材の吸い出し」による「マウンドの沈下」を考慮する。
- ・波浪・地盤・構造物の相互作用としては、繰り返し波力作用下での「ケーソンの揺動」などに起因する以下の7要因を考慮する。
 - ・砂地盤における「過剰間隙水圧の上昇（液状化）」による基礎地盤の「せん断力の低下」
 - ・粘性土地盤における「繰り返し荷重による粘着力の低下」
 - ・「マウンドの強度低下」に伴う「ケーソン端部マウンドのパンチング破壊」
 - ・「マウンドの締め固まり」によるマウンドの「振り込み沈下」
 - ・砂地盤における「基礎地盤の締め固まり」による基礎地盤の「振り込み沈下」
 - ・砂地盤における基礎地盤の「過剰間隙水圧の蓄積」による「液状化」にともなう「基礎地盤の沈下」
 - ・上載圧のない砂地盤に波浪が作用した場合の「一波毎の有効応力の消失」に伴う「前面海浜の液状化」による「基礎地盤の沈下」



凡例： 1. [] は、波浪・地盤・構造物の相互作用に関連する事象を示す。

2. [] は、破壊メカニズムに関連する事象を示す。

[] は、荷重に関連する事象を示す。

[] は、抵抗力に関連する事象を示す。

図-9 ケーン防波堤のフォールトツリー

(2) フォールトツリー

前項の基本方針に基づいて作成したフォールトツリーを図-9に示す。なお、単純化のため、AND ゲートおよび OR ゲートの表示は省略した。

7. 文献の収集

文献の収集は、本小委員会の活動に沿って継続的に行った。主な収集対象は、信頼性設計全般、海洋構造物に対する信頼性設計適用事例および被災例等である。それぞれの文献が発表された年代は、1968年から1995年であり、大半は1980年以降のものである。

ケーソン防波堤に対して信頼性設計を適用した事例は極めて少ないため、海洋構造物全般、場合によっては海洋構造物以外にまで収集対象を広げて文献の収集を行った。

文献収集の主な目的を列挙すると以下のようになる。

- ・信頼性設計の現状の把握

現状調査により、信頼性設計の理論的背景、構造工学等への信頼性設計の適用例、および各種設計パラメータの統計的性質などの検討を行った。

- ・海洋構造物に対する信頼性設計適用事例調査

海洋構造物に対する信頼性設計適用事例調査を通じ、適用方法、適用によって生じた利点および適用に際しての問題点の検討を行った。

- ・被災形態の把握

ケーソン防波堤の破壊のフォールトツリーの作成では、ケーソン防波堤の被災モードを把握する必要があった。そこで、破壊メカニズムと相互作用の検討のために、防波堤の被災例を収集した。

- ・その他

波浪による海底地盤の液状化や残留沈下量の予測方法等のシミュレーション技法に関する調査を進め、構造物の安定の検討の参考とした。

収集した文献のリストは報告書に示されている。このリストは、それぞれの文献で対象としている以下のような構造物の種別ごとにまとめてある。

ケーソン防波堤、捨石式傾斜堤、消波ブロック、護岸・桟橋、海洋プラットフォーム、洪水堰、信頼性解析、その他。

それぞれの種別では、日本語文献、外国語文献の順にそれぞれ古いものから整理した。

8. あとがき

平成4年に海洋開発委員会の中に設置された「波浪・海底地盤・構造物相互作用」研究小委員会は、ケーソン防波堤のマウンドと基礎地盤の波浪安定性に関して、そ

の現状と問題点を明らかにするとともに、何らかの提言を行うことを目的として活動を行ってきた。

最初に捨石式傾斜堤に関するオランダの報告書¹⁾を参考としたが、この報告書では防波堤設計の信頼性評価を目的としていたため、小委員会では信頼性設計についても関心を持ち、ケーソン防波堤のマウンドと基礎地盤の波浪による変形、破壊機構と信頼性設計の2つの調査を行ってきた。勿論信頼性設計は考えられる破壊機構が分かって初めて可能であり、現状では変形、破壊機構が十分に分かっていないことから、ケーソン防波堤の信頼性設計にはまだ道は遠い事が分かった。

しかしながら、前述のオランダの捨石式傾斜堤の報告書に示されていたその被災のフォールトツリーに刺激されて、小委員会として不十分なことを覚悟の上で、1つのケーソン防波堤の被災のフォールトツリーを作成した。

本小委員会の報告書が、ケーソン防波堤のマウンドおよび基礎地盤の波浪による変形、破壊機構の解明へ、さらにはその信頼性設計という遠い目標への到達の一助となることを期待する。

なお本小委員会は、いわゆる構造、水、地盤という土木工学における3つの力学分野の横断的な活動を意図して行われたものである。この調査において垣間見られた特に水工学と地盤工学の2つの分野の各々独立したアプローチではなく、このテーマは両者の境界領域の課題として今後推進すべき事を強調したい。

最後に本小委員会の委員名簿を掲げる(50音順、敬称略)。

浅沼丈夫(東亜建設工業)、池尻一仁(大成建設)、奥津一夫(鹿島建設)、金谷守(電力中央研究所)、酒井哲郎(京都大学、小委員長)、善功企(運輸省港湾技術研究所)、増井直樹(大林組)、森信夫(清水建設)

なお、土木学会事務局の林幹博、増永克也の両氏にはお世話になった。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) CIAD Project Group BREAKWATERS : Computer Aided Evaluation of the Reliability of a Breakwater Design, Final Report, CIAD Association, Zoetermeer, The Netherlands, 1985.
- 2) 運輸省港湾局(監修)：港湾の施設の技術上の基準・同解説、日本港湾協会、1989。
- 3) DET NORSKE VERITAS : Rules for the Design, Construction and Inspection of Offshore Structures, 1979.
- 4) 北島昭一他：被災防波堤集覧、港湾技術研究所資料、No. 58, 1968.
- 5) 武山秀夫他：被災防波堤集覧(その2)、港湾技術研究所資料、No. 200, 1975.
- 6) 服部千佳志他：被災防波堤集覧(その3)、港湾技術研究

- 所資料, No. 485, 1984.
- 7) 宮井真一郎：被災防波堤集覽（その4），港湾技術研究所資料, No. 765, 1993.
 - 8) Barends, F. B. J. : 講座 海洋構造物の支持力特性 2. 大水深捨石防波堤の安定性(1), 土と基礎, Vol. 42, No. 6, pp. 79-86, 1994.
 - 9) Barends, F. B. J. : 講座 海洋構造物の支持力特性 2. 大水深捨石防波堤の安定性(2), 土と基礎, Vol. 42, No. 7, pp. 89-95, 1994.
 - 10) Barends, F. B. J. : 講座 海洋構造物の支持力特性 2. 大水深捨石防波堤の安定性(3), 土と基礎, Vol. 42, No. 8, pp. 89-95, 1994.
 - 11) Oumeraci, H. : Review and analysis of vertical breakwater failureslessons learned, Coastal Engineering, Vol.22 pp.3-29, 1994.
 - 12) Oumeraci, H. : Beanspruchung von Betonplattendeckwerken und ihre Berücksichtigung bei der Bemessung. Mitteilungsbl. BAW, Karlsruhe, No.66, 1989.
 - 13) 善功企：海底地盤の波浪による液状化, 港湾技術研究所資料, No. 755, 1993.
 - 14) Wu, T.H. et al. : Reliability analysis of foundation stability for gravity platforms in the North Sea, Canadian Geotechnical Journal, Vol.26, No.3, pp.359-368, 1989.
 - 15) Kooman, D. : Design philosophy, Eastern Scheldt storm surge barrier, Cement, No.12, pp.12-14, 1979.

(1996.2.29受付)