

沖合人工島外郭施設の設計の考え方について

鹿島 遼一*・高階 實雄**・島田 真行*
今泉 正次***・植田 和哉***

1. はじめに

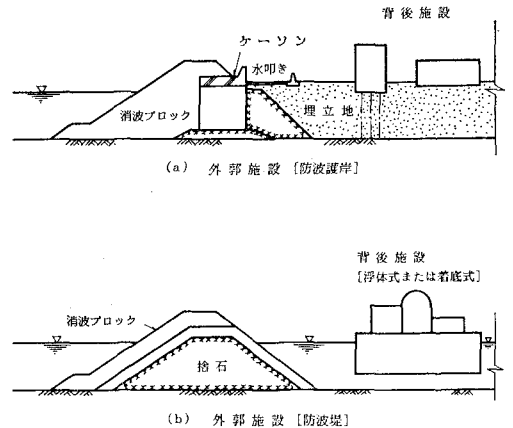
一般に、防波堤や防波護岸などの外郭施設は、設計波を多少上回るような高波浪が来襲しても直ちに壊滅的な損傷をうけることなく、相当な防波機能を保持できる構造であることが望ましいと考えられている。特に、陸地から離れた海域に建設される沖合人工島の外郭施設としては、苛酷な波浪により多少の被災が生じても急には大きな破壊に至らず、しかも修復可能な構造の採択が重要となる。こうした視点にたち、高波浪や大地震による堤体変形の評価も取り込んだ外郭施設設計法を提案し、その基本的な考え方を述べる。また、そのような設計法確立の見通しについて検討する。

2. 沖合人工島外郭施設の特徴

ここで対象とする沖合人工島とは、水深が20~50m程度でかつ陸地から比較的離れた海域に建設される人工島を指し、それ以外の立地条件は幅をもたせて考えている。すなわち、対象の中には外洋に面し波の条件の厳しい海域、あるいは大地震発生が考えられる地域に建設されるものも含まれる。また、人工島内には住宅、生産、エネルギー、レジャーなどの施設が設けられ、これに関与する人々が島内に滞在していることを想定している。

沖合人工島には外郭施設で囲った海域を埋め立て、そこに各施設を設置する方式(図一1(a))と、外郭施設により静穏な海域を確保し、そこに着底式または浮体式の施設を設ける方式(図一1(b))が考えられる。前者の外郭施設は防波護岸、後者は防波堤である。図一1にこれらの構造の一例を示す。

従来から沿岸部に設けられている工場や発電所などの外郭施設は、陸続きあるいは陸地近傍の水深の浅い海域に設置されている。このため、たとえ外郭施設に被害があっても、外海波浪が陸上の重要施設に影響を及ぼすまでの間に一時的な防護工を施すなどの対策が可能である。また、従業者や住民が安全な区域に避難することは



図一1 沖合人工島外郭施設の概要

比較的容易である。これに対し、沖合人工島の外郭施設が大きく被災すれば、有効な対策や陸地への安全な避難手段が確保できないケースも考えられる。すなわち、最悪の場合、経済的な損失ばかりでなく人工島内の人命の危機を招く恐れもある。

したがって、沖合人工島の外郭施設は、極めてまれにしか生じない大波浪や大地震に対しても、背後に致命的な損害を生じるような壊滅的な変形へと発展しない粘り強い構造であることが望ましい。安定限界を越える外力に対し、構造物が発揮するような粘りあるいは耐力をここでは構造耐力と呼ぶ。そして構造耐力に優れた構造とすることを沖合人工島外郭施設設計の目標とする。

3. 設計法の考え方

3.1 基本的考え方

前述のような沖合人工島外郭施設の特徴を踏まえた設計法の流れを図一2のフロー図のように提案する。この設計法は次の考え方に基いている。

- ① 外郭施設の基本断面は現行設計法に準じて定める。すなわち、従来設計レベルの波力や地震力に対しては安定な断面とする。これにより、外郭施設を頻繁に補修する必要のないようにする。
- ② 設計条件を越えるような極めてまれな外力に対し

* 正会員 工修 (財)電力中央研究所 我孫子研究所

** 正会員 五洋建設(株)土木本部

*** 正会員 工修 五洋建設(株)土木設計部

ては、堤体の多少の変形を許容する。ただし、その変形による防波機能、耐波機能の変化や修復性を検討し、安全性など人工島に要求される最小限の機能が損なわれないようにする；構造耐力の評価。

このような設計法を採用することにより、安全性と経済性を兼ね備えた外郭施設構造とすることが可能になると考える。なお、提案した設計法と同様な考え方は建築構造物の耐震設計の中にすでに取り入れられている¹⁾。

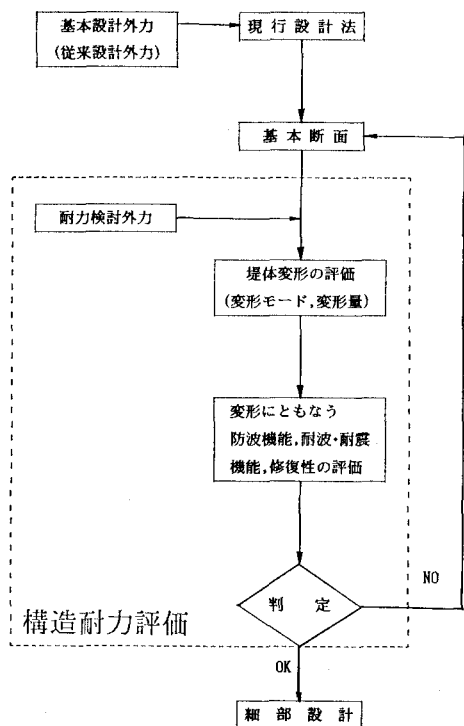


図-2 設計法の基本的な流れ

3.2 設計法の要点

a) 外力

図-2 に示した設計法の要点の1つは、現行設計法の条件に相当する基本設計外力を上回るような外力を考慮にいたることである。なお、基本設計外力とは構造物の安定性を要求する外力条件である。これは従来の設計外力に相当する条件である。耐力検討外力とは構造物の耐力を照査する外力であり、この条件のもとで機能の大幅な低下をもたらすような大規模な損傷が生じないことを確認するための外力条件のことである。

現行設計法における設計波は、波浪実測値を統計処理し、発生確率を検討して決定することが原則である。しかし、長期間の波の実測資料が少ないため、気象資料からの推算値や仮想台風による推算値を併用して設計沖波を決定することが多い²⁾。沖合人工島で想定するような水深域では、沿岸土地と比べて沖波設定値の影響が大き

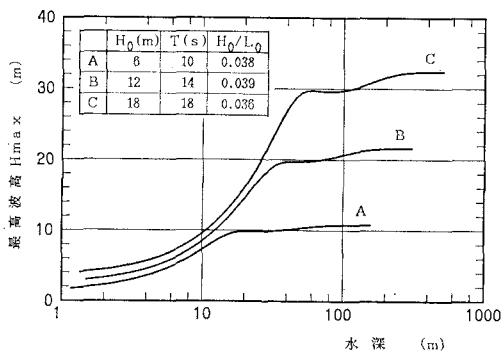


図-3 沖波波高別の水深と最高波高の関係

いと考えられる。たとえば図-3 は沖合での波高が大きく異なる $H_0=6\sim 8$ m の波について、水深と波高（最高波高）の関係を示したものである。図に見られるように、沖合での波高は異なるものの、水深が 20 m 以浅の水域では碎波変形の影響を受け三種の波の波高差は 1 m 程度である。一方、20～50 m の水域では各々の波高差は大きい。すなわち、水深が深くなるほど沖波の設定値の差が現れやすくなる。

地震については碎波変形のような水深に関連した現象はないものの、ある再現期間（通常は75年程度）に応じたレベルの外力（たとえば設計震度）が基本とされる点では波の場合と同様である。

これらを踏まえ、構造耐力評価にあたっての外力レベルは、人工島の用途、島内施設の重要性、重要施設と外郭施設の配置関係などに基づく外郭施設の重要度を基本に設定すべきである。その際に統計的推定にともなう誤差も考慮すべきであろう。

設計で用いる耐力検討外力の決定方法としては、次のような方法が考えられる。

- ① 基本設計外力より長期の再現期間の外力を用いる（例、200年確率波、300年確率波）。
- ② 基本設計外力を割増した外力を用いる。
- ③ 物理的な限界値を考慮した外力を用いる。

①の方法では、限られた期間のデータから長期確率波を予測する手法の開発が必要となる。たとえば、光田らの長期確率風速の推定方法³⁾などが手法としては参考になるであろう。②の方法における外力の割増しでは推定精度なども考慮する。③の物理的な限界値としては、ある水深までなら碎波限界波高を参考とすることが考えられる。

b) 構造耐力の評価

設計法の第二の要点は、上記したような耐力検討外力に対しては、機能上支障のない範囲で多少の変形を許容することである。これは多少変形しても直ちに壊滅的な被災になるわけではないという前提（この点については

次節で述べる)と経済性上の理由による。すなわち、大波浪や大地震に対して安定な構造は計算上は可能であっても実現性に乏しい。たとえば、水深の大きな海域では波高 15m 程度の波は十分予想されるが、これを設計波高とした場合、現行の設計式から求まるブロックの重量は 300t 以上となる。このようなブロックの運搬・据付け方法やブロックの強度を考えるとブロック被覆型の外郭施設は現状では極めて実現性に乏しいといえる。

許容しうる堤体変形量は次の三点から評価するのが適切と考えられる。

- ① 堤体変形による防波機能の低下
- ② 堤体変形による耐波・耐震機能の低下
- ③ 修復性

①の防波機能とは防波護岸の越波低減効果や防波堤の波高減殺効果をさす。防波機能の低下は背後埋立地の吸出しや洗掘あるいは静穏度の低下をもたらし、その影響を検討しておく必要がある。②の耐波・耐震機能とは堤体の構造強度をさす。変形後の波や地震によって堤体破壊が急激に進行するような強度低下がないようにする必要がある。③の修復性については、補修資材、補修方法も考慮して短期間で補修可能かどうか検討しておく必要がある。①～③のいずれも人工島の重要度や外郭施設の構造を十分検討して決定すべき要素である。

たとえば、図-1(b)に例示した防波堤内に浮体式プラントが計画される場合、堤体変形の許容値は図-4に示すような要素に関連するものと考えられる。

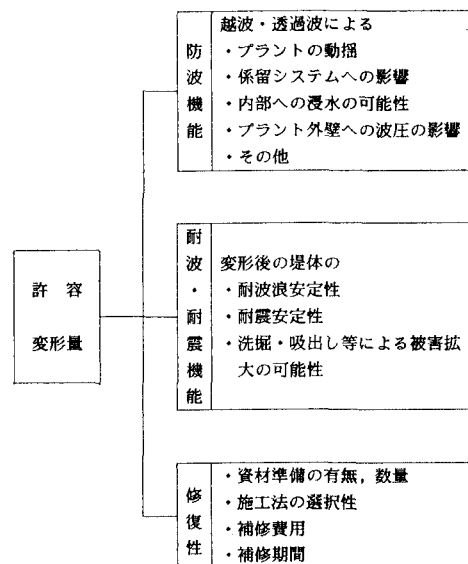


図-4 外郭施設の許容変形量の関連要素 (浮体式プラントを想定)

4. 構造耐力評価の技術的見通し

前節で提案した設計法は設計条件を多少上回る外力が作用しても壊滅的な被災に至らない構造を前提としている。また、そのような外力による変形の評価を設計法の中に含んでいる。こうした設計法の可能性を被災例調査や既往の研究から検討する。なお構造としては、補修が比較的容易で防波構造物としての実績も多い消波ブロック被覆型の傾斜堤や混成堤に注目した。

4.1 被災例調査

著者らは防波堤・防波護岸の波浪および地震による被災例調査を行い全般的な被災特性についてはすでに報告した^{4)~6)}。ここでは構造物の変形特性という観点から調査結果を考察する。

a) 波浪被災特性

波浪による防波堤の被災は構造や被災時の条件により異なる。しかし、全体的に見れば傾斜堤の被災では消波工、被覆層などが散乱し、天端が低くなるとともに天端幅が広がる場合が多い。また、ブロック被覆混成堤の被災では、被覆ブロックが散乱し天端が低くなるとともにケーソンが陸側に滑動する場合が多い。一例として図-5に尻屋岬港防波堤の被災断面⁷⁾を示す。

波浪による被災例では機能を損うような大きな変形に至っているものは被災例全体の15%程度と少ない。この15%の内訳は、被災時波高が設計波高を上回ったもの、海底地盤の洗掘が原因と考えられるもの、堤頭部・隅角部など局所的に被災したもの、さらには施工中に被災したものなどである。

したがって、設計波高を越える異常な波浪にも留意し、かつ洗掘防止対策、堤頭部・隅角部の補強および裏込めなどによる堤体背後の補強などを十分に行うことにより大規模な被災はほぼ防止できると考えられる。

b) 地震被災特性

地震による護岸および防波堤の被災が構造や被災時の条件により異なることは波の場合と同様である。地震動による防波堤の主な被災形態は直立部・消波工等の沈下であるが直立部沈下の被災規模は小さい。なお、防波堤

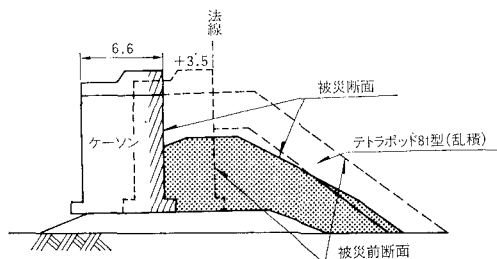


図-5 尻屋岬港防波堤の被災断面図⁷⁾

の地震による被災例は極めて少ない。

護岸の被災では、直立部が海側に滑動・前傾するとともに護岸背後のエプロンが沈下する場合が多い。一例として図-6に清水港鉄道岸壁の1930年北伊豆地震による被災断面⁸⁾を示す。

護岸の直立部の水平移動量または沈下量が多いのは1944年以前の構造物あるいは基礎地盤が液状化した事例である。これらを除いた事例の水平移動量の最大値は57 cm、沈下量の最大値は32 cmであり、この程度であれば護岸としての機能はかなり保持されていると考えられる。

地震による堤体変形に関して被災例からの知見をまとめると次のとおりである。

① 耐震上安定な地盤に築造される防波堤や護岸は、

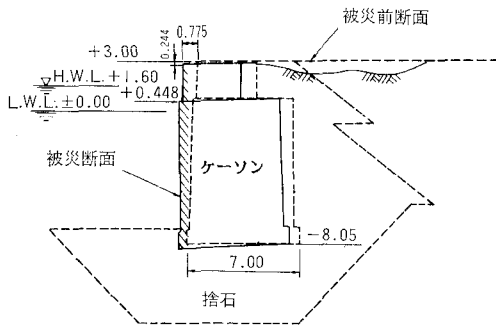


図-6 清水港鉄道岸壁の被災断面図⁸⁾

たとえ地震により被災したとしても大規模に被災することは少ないと推定される。

② 被災形態からみて堤体前後に根固めを施工するなど構造を改良することにより、構造物の地震に対する安定性を高めることが可能と考えられる。

4.2 既往の実験的研究

防波堤・護岸の被災の進行過程をより詳細に把握するためには、堤体が変形を生じるような不安定領域での構造物の挙動実験が不可欠である。海岸構造物に関してはこのような挙動実験の実施例は少ないが、それらの実験からも堤体の変形特性がおおよそ把握できる。

a) 波浪による堤体挙動

ケーソン式混成堤の不安定領域での実験はすでに伊藤らにより行われている⁹⁾。この結果によると、ケーソンの滑動は作用波数の増加につれて徐々に進行し、その進行度合は堤体重量が大きいほど緩慢である。

消波ブロックで被覆した防波堤や防波護岸の不安定領域の挙動については、大型造波水路による実験例¹⁰⁾がある。防波堤（傾斜堤）に関する実験では、沖波波高を6.0 m から 13.0 m まで順次 1 m ずつ増加・作用させながら堤体の変形状況と防波特性の観測を行っている（図-7 参照）。模型縮尺はスケール効果を考慮して 1/13.4 としている。各波高の継続時間は現地換算で最大 7 時間である。

図-7 には作用波高の概要、安定限界波高に対する入

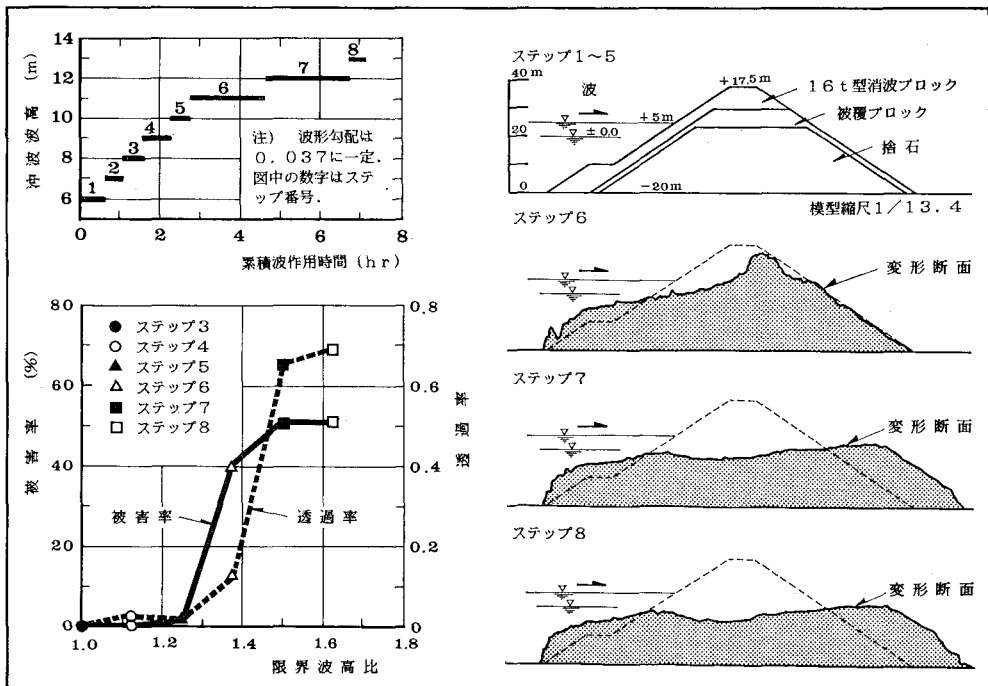


図-7 波浪による傾斜堤の不安定領域での挙動の概要¹⁰⁾

射波高の比と被害率および透過率の関係、さらには波浪変化に対するそれぞれのステップでの堤体断面の変形状態を示す。断面の変形が生じ始めるのは沖波波高が 8 m (ステップ3) に達してからであり、波高の増加および波作用時間の経過に伴って被害率は徐々に増加する。波高 10 m 程度 (ステップ5) までは被害率は 2%, 透過率は 0.02 であり堤体変形は防波機能上ほとんど無視しうる。波高が 11 m に達する (ステップ6) と被害率は急激に上昇し 40% になる。この時点では、前面斜面上の消波ブロックが法先方向に転落し、堤頂部付近にわずかに消波ブロックが残る程度である。それでも透過率は 0.13 と小さい。波高が 12 m になると (ステップ7)、静水面上のほとんどの消波ブロックは堤体の前後部分に転落して断面は台形状を呈し、被害率は 50% に達する。堤体変形にともない透過率は 0.13 から 0.65 へと大きく変化し、もはや防波堤としての機能は期待できなくなる。

混成堤や傾斜堤に関するこれらの実験から、安定限界を多少越える波が作用しても変形の進行は緩慢であり、防波機能の低下もわずかであることが確認できる。

b) 地震動による堤体挙動

ケーソン式混成堤の大地震時の挙動に関しては栗本らが振動実験により検討している¹¹⁾。この実験では、図-9 に示す防波堤堤体に加速度 800 gal, 周期 5 Hz の正弦波を10波入力した。その結果によると、図-8 に示すように、消波ブロックの滑落はほとんど見られず堤体高さの約10%の沈下がみられる程度であった。また、ケーソンは堤体高さの約5%の沈下ならびに堤体幅の約10%の滑動がみられる程度であった。

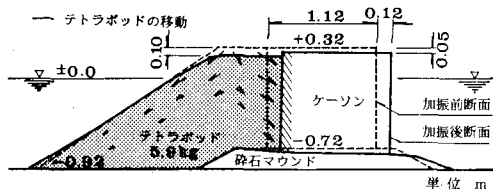


図-8 堤体の振動実験結果
(文献11)に一部加筆)

5. む す び

沖合人工島外郭施設の機能と設計法について検討した結果をまとめると以下ようになる。

(1) 沖合人工島の外郭施設としては、安定限界条件を多少上回る外力に対しても、所要の機能を保持できる構造とすることが望ましい。

(2) 極めてまれな大波浪や大地震に対して、堤体の

変形とそれによる影響を事前に評価する設計法の基本的な考え方を提案した。

(3) 被災例調査結果や既往の不安定領域における実験の考察から、構造の改良も加えることにより、提案した設計法が成立するとの見通しを得た。

外力に対し「ねばり」のある構造の開発は現行設計法でも絶えず追求されてきた課題である。本報告は、変形そのものを事前に予測し構造耐力の評価という形で構造物のねばりを設計に取り込むことを提案するものである。本設計法確立のためには、人工島の用途と施設配置に対応した外郭施設の重要度の評価およびその重要度に応じた耐力検討外力レベルの設定方法、波浪条件の推定精度向上や堤体の変形特性のより一般的な把握など種々の課題が残されており、これらの課題に取り組む意義は大きいと考える。

なお、本報は、当所の海上立地方式検討会における討議により形成された考え方をもとに展開し、とりまとめたものである。メンバー各位 (東京電力(株)、中部電力(株)、関西電力(株)、(株)東芝、(株)日立製作所、三菱原子力工業(株)、(株)奥村組ほか) に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 梅村魁編著: 新しい耐震設計, (財)日本建築センター, 344 p., 1979,
- 2) 運輸省港湾局編: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, (社)日本港湾協会, pp. 2-25~35, 1979.
- 3) 藤井 健・光田 寧: 台風域内の強風と地形との間の統計的關係についての一考察, 京都大学防災研究所年報, 第30号 B-1, pp. 279~285, 1987.
- 4) 鹿島遼一・今泉正次・戸田泰和: 被災事例から見た防波堤・防波護岸の波浪被災特性, 第33回海岸工学講演会論文集, pp. 626~630, 1986.
- 5) Kajima, R., J. Takashina, S. Imaizumi and Y. Toda: Characteristics of hydrolystic damages to breakwaters and seawalls with armored blocks, Coastal Eng. in Japan, Vol. 31, No. 1, pp. 147~165, 1988.
- 6) 鹿島遼一・植田和哉・岡 陸夫: 事例調査に基づく防波堤・護岸の地震被災特性, 第33回海岸工学講演会論文集, pp. 471~475, 1986.
- 7) 武山秀夫・中山種清: 被災防波堤集覧(その2), 港湾技研資料, No. 200, 255 p., 1975.
- 8) 野田節男・上部達生: 重力式岸壁の地震被災事例集, 港湾技研資料, No. 227, 159 p., 1975.
- 9) 伊藤喜行・藤島 陸・北谷高雄: 防波堤の安定性に関する研究, 港湾技術研究所報告, 第5巻14号, 134 p., 1966.
- 10) 島田真行ほか: 電力中央研究所海上立地方式検討会資料, 1987.
- 11) 栗本雅裕・松田敦夫・武田清治: 混成堤の地震時破壊特性に関する大型模型振動実験, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 541~545, 1987.