

常陸那珂港北ふ頭東護岸の設計と施工

佐藤潤一*・今井澄雄**・矢口真光***

1. はじめに

常陸那珂港北ふ頭は、運輸省、茨城県及び東京電力(株)、電源開発(株)の共同事業として、公共ふ頭を運輸省と茨城県が、ふ頭北側を火力発電所として電力2社が分担し、それぞれの事業者が協調して平成5年5月から平成8年9月までの間でふ頭の概成を行うこととしている(高辻他, 1993)。

東京電力(株)は、北ふ頭の最深部(D.L. -18.5 m)となる東護岸の内750 m及び発電所の冷却水の取水口となる南護岸250 mを担当した。両護岸の構造形式は、経済性等を考慮してケーソン式混成堤とした。

東護岸はふ頭の概成工程から沖合の東防波堤より先行して建設することから、外洋波浪に対して安定を確保できる断面として設計する必要があった。このため、幅が20 mを越えるケーソンが必要であり、東防波堤完成後の護岸として地震時の安定に必要な幅15.5 mに比べ大きくなる。そこで、護岸の安定に必要な抵抗力を合理的に増大させることが可能であればケーソン断面を縮小させることができるため、防波堤完成後の護岸断面に近づけるべく、護岸を構成する各要素の機能を再検討し、設計・施工上の工夫点の抽出を行った。

東護岸の設計・施工にあたって取り入れたものは以下のとおりである。

- ・東護岸が防波堤として機能する期間が約3年と短いことから、その期間の安定計算に用いる設計波浪の再現期間を遭遇確率及び初期建設費とそれ後の補修費を踏えて評価した。
- ・埋込土の土圧軽減等の目的でケーソン背面に投入される裏込石は、従来は全てのケーソン掘付完了後に一括して投入しているが、これをケーソン掘付毎に投入できれば、裏込石の滑動抵抗力を期待できる。しかし、裏込石を先行投入しても、波浪により裏込石が飛散しては滑動抵抗力が期待できない。そこで水理模型実験を実施し、裏込石が飛散せずケーソンと一体となって

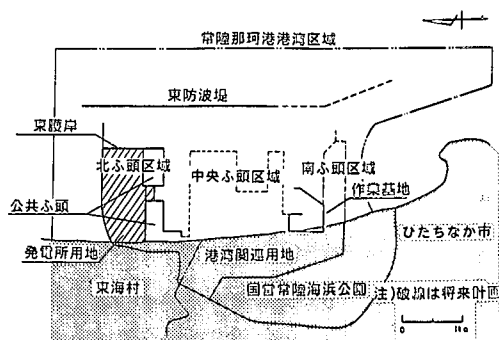


図-1 常陸那珂港計画図

滑動抵抗力を発揮する裏込高、裏込天端幅並びにその時の滑動抵抗力の定量的評価を行った。

- ・ケーソン底面に摩擦増大マットを取り付けることによる摩擦力を適正に評価できれば、滑動抵抗力の増加が期待できる。そこで、摩擦増大マットの摩擦特性を把握するため、設計作用荷重を再現した水中での摩擦実験により滑動抵抗力の定量的評価を行った。
- ・ケーソン根固部は、入・反射による流れにより基礎マウンド材の洗掘、吸出しが起りやすい。この対策として1個当たり30 tf (294 kN)以上のコンクリートブロックを用いるのが標準とされているが、直接外洋の波浪を受ける期間が3年と短いことから、安価となる石かごを用いることとし、その安定重量の評価を行った。
- ・ケーソン掘付直後から設計断面完成(2次裏込投入完了)までの施工日数のデータを取りまとめ、各施工状態における被災確率の評価を行った。

2. 設 計 波

(1) 防波堤状態の期間

設計波の設定に当たり、まず防波堤状態の期間について検討した結果、東護岸の施工は、東防波堤の遮蔽前に実施するため、3年間は東防波堤の遮蔽は考慮できない。従って、東護岸の防波堤状態を3年間と見なすこととした。

* 正会員 工修 東京電力(株)常陸那珂火力建設所

** 正会員 東京電力(株)原子力技術部

*** 正会員 東京電力(株)常陸那珂火力建設所

(2) 遭遇確率と再現期間

港湾の施設の技術上の基準・同解説（日本港湾協会編，1989）によれば，「設計の対象とすべき自然条件の再現期間は，施設の供用予定期間，その期間内に設計波を上回る条件に遭遇する確率，施設の安全性に対する要請の度合，施設の設計・施工技術の信頼等を勘案して定めるのが望ましく，これらを総合的に評価する必要がある。」とされている。

我が国のこれまでの港湾施設（完成時）においては，設計波の再現期間として50年程度を考慮し，暫定的（施工時）な断面に対しては，適当な再現期間を設定し設計を行っているケースもある。

外洋における施工中の護岸及び完成後の防波堤における設計波の再現期間と耐用期間からそれぞれの遭遇確率を求めると表-1に示すようになる。

これらの事例では，遭遇確率として35%前後を考慮している。東護岸の設計波の再現期間設定にあたっては防波堤状態の期間を3年間とし，既往の事例と同程度の遭遇確率を考慮するとともに初期建設費とその後の補修費を踏えて，設計波の再現期間を8年（遭遇確率33%）とした。

(3) 設計波浪

設計沖波については，過去30年間の気象データからの波浪推算結果並びに，常陸那珂港において1981～1990年に観測された波浪データの中から波向別に有義波高3m以上の上位30波を抽出し各波向別に極値統計解析を行い，再現期間を8年として設定した。また，有義波高と最大波高の比率及び周期については，水深30mの現地観測値より $H_{1/3}/H_{1/10}=1.8$ ， $T_{1/3}=14$ sを採用して，東護岸位置での設計波浪を算出した。それらの波浪条件の

表-1 各地点の再現期間及び遭遇確率

	地 点	防波堤の状態の期間(L)	再現期間(T)	遭遇確率(E)
施工中の護岸の設計事例	A 人工島護岸	2年間	5年	36%
	B 発電所護岸	4年間	10年	34%
防波堤の設計事例	C 発電所防波堤	50年間(耐用年数)	100年	30%

$$※ E = 1 - (1 - 1/T)^L$$

表-2 東護岸設計波浪

有義波高	$H_{1/3}=6.4$ m
最大波高	$H_{max}=11.4$ m
入射角	$\beta=0$
周期	$T_{1/3}=14$ s
潮位	H.W.L.=D.L. +1.5 m
設置水深	$h=D.L. -18.5$ m

うち，波向別に波力が最大となるのは，波向E（東護岸法線に直角），潮位H.W.L.のケースとなった。

表-2に東護岸の設計波浪を示す。

3. 堤体の設計

(1) 防波堤状態の安定

堤体の安定検討は，合田式（日本港湾協会編，1989；合田，1990）で求めた波力が作用する場合のケーソン堤体の滑動，転倒に対する安定ならびにビショッブ法によるマウンドの安定について行った。ケーソン幅を縮小すると滑動，マウンドのすべりに対し条件が厳しくなる。これを緩和するための方策として，将来護岸としてケーソン背面に施工される裏込を先行実施する合理的な断面を追求して，防波堤状態におけるケーソン背面に投入する裏込材（先行裏込石）の滑動抵抗力と越波安定性並びに滑動抵抗力を増大させる摩擦増大マットについて水理実験を実施した。

a) 先行裏込石の滑動抵抗実験及び安定実験

越波に対する裏込石の安定性と滑動抵抗力について水理模型実験を実施した。

水槽は，全長60m，高さ2m，幅1mの二次元水槽を用い，基礎捨石上にケーソン模型及び裏込石を配置した。縮尺はフルードの相似則（1/45）とした。

まず，裏込石の滑動抵抗力に関する実験では，図-2に示すように裏込形状を裏込高，天端幅をパラメーターに4ケース（表-3）について，現地換算した波浪で周期14s，波高を10mから段階的に高くし，ケーソン底面の摩擦抵抗を除く滑動抵抗力を求めた。

その結果を図-3に示す。実験結果と計算結果（赤塚他，1975）では，いずれも実験結果の方が大きな抵抗を示した（宮原他，1993）。また，同図に示すように裏込石の滑動抵抗力は裏込石の天端幅が長いほど大きくなるこ

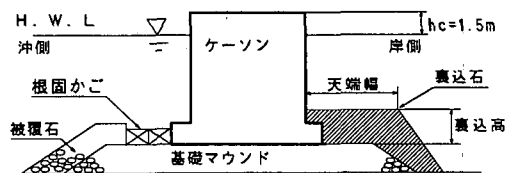


図-2 検討断面

表-3 実験断面の裏込形状

	裏込高	天端幅
ケース 1	3.00 m	18.9 m
2	3.00 m	3.0 m
3	2.00 m	20.1 m
4	2.00 m	3.0 m

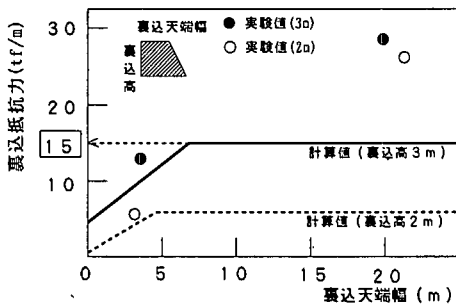


図-3 裏込石の滑動抵抗力

表-4 裏込高と飛散率

	飛散率
裏込高 2m	0%
〃 3m	0%
〃 6m	5%

と、裏込高さが低いときは裏込石全体が抵抗力として働いていることから、裏込石の滑動抵抗力としての効果はクーロンの受働土圧以上が期待できるとの結論を得た。

また、裏込石の安定に関する実験においても、同様の水槽を用いて実験を行った。ただし、裏込石の縮尺に關しては、フルードの相似則と沈降速度の相似則の両者を用いて検討した。

その結果、表-4に示すように越波による裏込石の飛散は、実験結果より求めたクーロンの受働土圧を最小にするすべり線（宮原他，1993）の外側の石の飛散のみであることを確認した。

従って、先行裏込石は基礎マウンドから D.L. -8.5 m（裏込高 6 m）まで高くし、若干の飛散を考慮に入れつつも、滑動抵抗力として設計に取り入れ、早期に高い安定性を得ることにした。

b) 摩擦増大マットの材料特性実験（柴田他，1994）

ケーソンと捨石の摩擦係数は 0.6 が採用されることが多いが、摩擦係数を大きくするためアスファルトマット及びゴムマットをケーソン底面に設置する例が増えてきた。しかし、港湾の施設の技術上の基準・同解説（日本港湾協会編，1989）にはマット材と捨石の摩擦係数についての設定はない。

そこで、東証岸ケーソンにマットを用いて摩擦係数を大きくしケーソン幅の縮小を目的に、材料特性実験を行った。なお、マット材としては、設置面積の変化が可能なゴムマットを用いた。

東証岸ケーソンは裏込及び摩擦係数を大きくしてケーソン幅を決定したときの設計波力を受けると、約 75 tf/m² (735 kPa) の端趾圧を受けることになる。また、鉛直

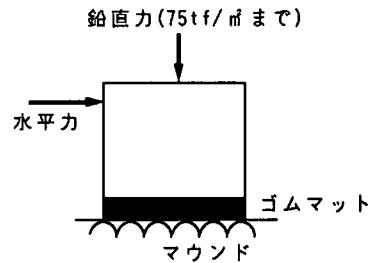


図-4 概念図

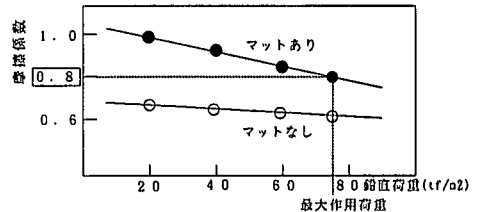


図-5 摩擦増大マットと捨石の摩擦係数

力の変化によって摩擦抵抗も変化することが考えられることから、図-4のような実験方法（概念図）により摩擦係数を測定した。

その結果、従来まで解明されていなかった高端趾圧下での摩擦係数ならびにマットの配置等を変えた材料特性実験の結果、図-5に示すように設計の端趾圧下による摩擦係数の変化及び高端趾圧下（75 tf/m² (735 kPa)）において摩擦係数 0.8 を確保できることを確認した。

(2) ケーソン根固材の安定

a) 根固かごの安定性実験

ケーソン根固部は、入・反射波による流れにより基礎マウンド材の洗掘、吸出しが起りやすい。この対策として港湾の施設の技術上の基準・同解説（日本港湾協会編，1989）によれば、「波の荒いところでは（5 m 程度より大きい場合）1 個当たり 30 tf 以上のブロックを用いるのを標準とする。」とある。この他にも、鹿島他（1970）、鴻上他（1972）による研究及び運輸省第一港湾建設局による重量算定式などが提案されている。これらによって算定されたコンクリートブロックの重量は 1 個当たり 8.2 tf (80.4 kN)～44.6 tf (437.1 kN) とまちまちである。東証岸は、直接外洋の波浪を受ける期間が短いことから、コンクリートブロックに代わる安価な石かごを根固材とした時の所要重量を求めるため水理模型実験を行った。

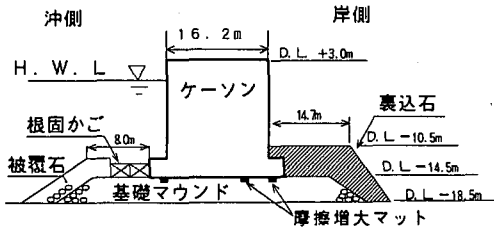
水槽は、全長 50 m、高さ 1.2 m、幅 1 m の二次元水槽を用い、基礎捨石上に根固材とケーソン模型を配置した。縮尺は、フルードの相似則（1/40）とした。

設計条件における根固材の 1 個当たりの所要重量の算定

表一5 設計波浪に対する根固材の所用
安定重量

	所用安定重量 (tf/個)	
	コンクリートブロック	石かご
実験値	22.8	5.03 (1.97)

() は、フーチング有り



図一6 東護岸断面

表一6 防波堤状態の安全率

	滑動	転倒	すべり (ビショップ法)	(参考) 端趾圧
計算値	1.01	1.38	1.00	74.1 tf/m ²
許容値	>1.0	>1.1	>1.0	

結果を表一5に示す。根固材は方塊より空隙のある石かごを用いた方が、安定性は高いことが判明した。その寸法は、据付個数が増加し不経済とならないように、コンクリートブロック 30 tf/個 (294 kN/個) と同程度の寸法 (2m×3m×1m) とし、重量を 10 tf/個 (98 kN/個) とした。

(3) 設計断面

以上の検討により防波堤状態の東護岸は図一6に示す断面とした。設定した設計波浪条件における安定は表一6のとおりとなる。

4. 施 工

(1) 施工計画

今回の設計の場合、裏込石を滑動抵抗として取り入れるため、早期に裏込石を投入する必要がある、表一7に示すような施工計画を策定した。

図一7に示すようにケーソン据付被覆作業にあたっては、沖側では洗掘防止のためのマウンドの被覆 (根固かご④、被覆石⑤) を、岸側には裏込石を段階的 (③～⑥) に投入して⑥の状態を据付から4日目までに、5日目以降2ヶ月以内に⑥の状態とし設計波浪条件に耐

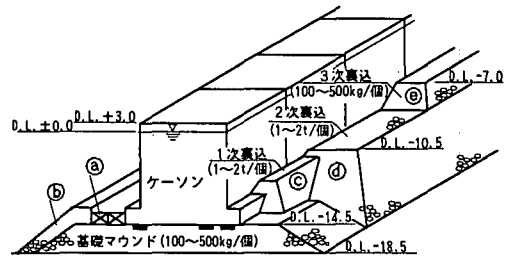
えられる構造とした。

(2) 施工サイクルの検証

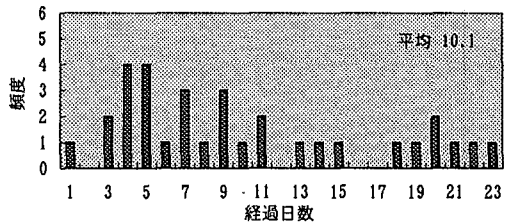
今回の設計では、ケーソン据付直後から2次裏込投入完了 (設計断面) までの施工中の安定に対して、表一8に示すように各施工状態における被災限界波高、各施工状態までの最長経過日数、各施工状態における経過日数、被災限界波高との遭遇確率の評価を行った。

表一7 ケーソン据付一連作業工程

	1日目	2日目	3日目	4日目	備考
ケーソン据付	—	—	—	—	
中詰砂投入	—	—	—	—	
中詰砂均し	—	—	—	—	
蓋ブロック	—	—	—	—	
根固かご	—	—	—	—	
裏込石	—	—	—	③	5日以降⑥状態まで継続



図一7 東護岸施工状況鳥かん図



図一8 -10.5m 裏込投入までの経過日数

表一8 各施工状態における被災遭遇確率

施工状態	被災限界波高 H_{ls}	ケーソン据付後の 経過日数 (最長)	各施工状態にお ける経過日数	施工状態中での被災 限界波高の遭遇確率
中詰砂投入完了	5.8 m	4 日	10 日	0.0110
蓋ブロック設置完了	5.9 m	14 日	16 日	0.0176
1次裏込投入完了	6.3 m	30 日	8 日	0.0029
2次裏込投入完了	6.4 m	38 日	258 日	0.0142
3次裏込投入完了	8.3 m	296 日		

これによれば、裏込を順次増加させることによりケーソン据付直後から裏込石投入完了までの被災遭遇確率は極めて小さい。

また、図-8 には、ケーソン据付から2次裏込投入完了(設計断面)までの施工所用日数を示す。2次裏込投入完了までの経過日数は、長期に静穏が確保できる時期を除いて、最長23日、平均10日間とかなりばらつきがある。しかし、表-8に示すように、いずれの施工状態においても、被災限界波高との遭遇確率は、小さいものであった。

5. おわりに

以上、筆者らのかかわった北ふ頭の東護岸工事の設計と施工の概要について述べた。東護岸は上部工と裏込の一部を残して完了しており、平成8年5月現在、北ふ頭の護岸工事の総合進捗率は約95%である。

今後、平成8年9月に北ふ頭の護岸締め切りを完了し、後背地の丘陵から採取した土砂により3年間で埋立工事

を行い、平成10年の常陸那珂港の開港並びに平成14年の火力発電所の運転開始に向け工事を進めることになる。

参考文献

- 高辻哲他(1993): 常陸那珂火力発電所土地造成工事の計画概要, 電力土木, No. 246.
- 日本港湾協会編(1989): 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 上巻, pp. 119-127.
- 合田良實(1990): 港湾構造物の耐波設計, 鹿島出版, 85 p.
- 赤塚他(1975): 混成堤の堤体背後に設置したコンクリート方塊あるいは割石の滑動抵抗, 第22回海岸工学講演会論文集, pp. 421-425.
- 宮原和仁他(1993): 裏込の滑動抵抗力に関する実験的研究, 土木学会第48回年次学術講演会.
- 柴田 学他(1994): ケーソン摩擦増大マットの滑動安定性寄与に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第41巻.
- 鹿島遼一他(1972): 混成堤基礎マウンドを被覆するコンクリート方塊の所用重量, 第17回海岸工学講演会論文集.
- 鴻上雄三他(1949): ケーソン摩擦増大マットの滑動安定性寄与に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第41巻.