

防波堤の安定性能照査と性能設計 — 海域施設の新しい耐波設計 —

A PERFORMANCE DESIGN AS A FUTURE DESIGN METHOD OF MARITIME STRUCTURES

高橋重雄¹・下迫健一郎²・半沢 稔³・杉浦 淳³

¹正会員 工博 運輸省港湾技術研究所 特別研究官 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

²正会員 運輸省港湾技術研究所 水工部耐波研究室長 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

³正会員 工修 (株) テトラ 環境事業本部技術部 課長 (〒300-0006 茨城県土浦市東中貫町2-7)

Stability performances of composite breakwaters such as deformation against wave actions are investigated considering their probabilistic nature. The mean and 5% exceedance values of the damage rate of concrete blocks of horizontally composite breakwater against design wave are twice and ten times the design value of $N_0=0.3$, respectively. The mean value of cumulative damage during 50-year lifetime is 8 times the design value. The mean and 5% exceedance values of the sliding distance against the design wave are 7 cm and 1m, respectively when a vertical wall of a composite breakwater is designed so that the mean value of the cumulative sliding distance over 50-year lifetime is 30 cm. The performance design methods of the breakwaters against wave actions are introduced based on their stability performances.

Key Words : *Designing of maritime structures, damage rate, sliding distance, reliability design, composite breakwaters, performance design, lifetime*

1. まえがき

性能設計とは、基本的には従来の設計法の延長線上で、従来陰に陽に構造物に要求してきた必要な性能とこれに対する照査方法を明確に体系化して規定する設計法といわれている¹⁾。したがって、設計外力に対して抵抗力の安全率1.2をもつという従来の設計も、一応は性能設計といえる。しかしながら、新しい設計概念としての性能設計は、より具体的に性能を示した設計、特に変形量を含めて性能を示した設計である。著者らは、港湾や海岸など海域施設の21世紀に向けた新しい設計法、特に耐波設計法として、この性能設計の導入を考えている。

一般に設計とは、求められる機能を満足し、安定性を確保することであるが、海域施設の設計の場合、基本的には一つの設計条件（例えば50年確率波など）に対する設計であった。しかしながら、設計波を上回る異常波浪の発生の確率は常にあるわけであり、そうしたときに何が起こるかを知っておくことは、二次災害の発生、あるいは復旧等を考えるときに重要である。特に、防波護岸の被災など人命に関わるような場合には、このような検討が不可欠である。こうした設計波を上回るような場合を含め、性能を具体的に把握した性能設計は今後ますます重要となっている。

本報告は、海域施設の新しい耐波設計として性能設計を進める立場から、性能設計の適用の考え方をとりまとめたものであり、主として防波堤の直立部と消波ブロックの耐波安定性について述べる。ただし、被災とは具体的には変形量であり、それを明らかにすることが性能照査である。特に、その発生する確率を明らかにすることが重要である。本報告の第2章では、消波ブロック被覆堤の消波ブロックの変形量（被災度）について、また、第3章では、防波堤直立部の変形量の一つである滑動量について性能照査の例を示す。

性能設計とはこうした照査される性能に基づく設計法であり、第4章ではその枠組みについて述べる。ここでの性能設計とは、変形を考慮した信頼性設計であり、いくつかの段階の性能設計についてまとめている。

2. 消波ブロックの耐波安定性能の照査

(1) 消波ブロックの変形（散乱）と所要質量

傾斜堤の被覆材の所要質量については、多くの研究が行われており、最近では変形量（被害率）を考慮した算定法が提案されている²⁾。また、消波ブロック被覆堤の消波ブロックについても、著者ら³⁾が変形量（被災度）を考慮した算定法を示している。

例えば、水深20m、海底勾配1/50、沖波設計波高9.2m（堤体位置9.01m）、周期14sの場合の消波ブロックは、被災度 N_0 の許容値を0.3（被害率で1%程度）とすると74.5トンの質量が必要である。

この被災度 N_0 は、50年確率波に対するものであり、本章では設計波以上の波を含めた耐波安定性能について照査する。照査において、作用波と変形量の関係や変動性考慮の具体的な方法については、合田⁴⁾、高山・藤井⁵⁾を参考にした著者ら³⁾の手法を用いている。ただし、各種パラメーターの変動性の値については、下迫・高橋⁶⁾と同じとした。

なお、実際の設計では、使用できる質量が段階的に設定されており、必要な質量より大きなものを用いていることや、断面の経済性からさらに割り増した質量を用いることもあり、質量の違いによる耐波安定性能の変化についても検討している。

(2) 確率波と変形量（被災度）の関係

図-1は、横軸に沖波の波高をとり被災度を示したもので、横軸にはその沖波の確率年も示している。図中の□印は、沖波が決まったときの被災度を通常の確定論的な計算法で計算したもので、これによって、どのような波高（確率波）のときにどのような被災が発生するのかがわかり、そのブロックの耐波安定性能が具体的にイメージできる。例えば、50年確率波では、被災度が0.3であるが、500年確率波でも1.0と約3倍であり、確率年が高くなっても意外と被災度の増加が小さいことがわかる。

図中のもう一つの曲線（◇）は、それぞれの沖波に対して、波浪変形の変動などを考慮して計算した被災度の期待値（平均値）であり、同時に超過確率5%の被災度までの範囲（△）も示している。例えば、50年確率波が来襲したときは、平均的には0.7であり、変動性を考慮すると約2倍の被災度となる。

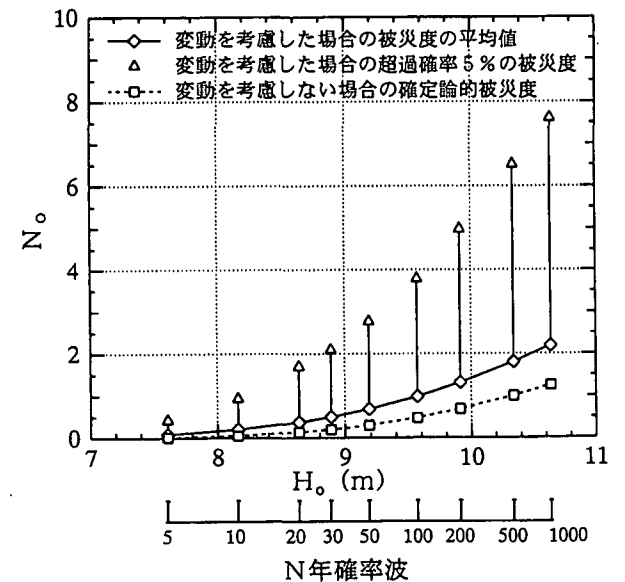


図-1 確率波高とそれによる被災度

5%超過確率は2.8となり、平均値の約4倍となる。また、500年確率波が来襲したときは平均値と5%超過確率の値は1.8と6.5となり、50年の場合の2.5倍程度となっている。

(3) 耐用年数間の累積被災度とその確率分布

図-2は、耐用年数50年間における累積被災度の確率分布で、横軸を被災度にとって超過確率を示している。こうした確率分布は、このブロックの耐用年数間の具体的な耐波性能を示している。なお、図には、後述する質量を割り増したケースについての計算結果も示している。

割り増しがない場合には、50年間の累積被災度の期待値（期待被災度）は2.24とやや大きく、5%の超過確率の被災度も6.46となっている。この値は50年間の累積値であり、図-1で示したように1回の被災ではそれほど大きくなく、ある程度の被災となった時点で修復を考えれば、実際上の問題は少ないと思われる。

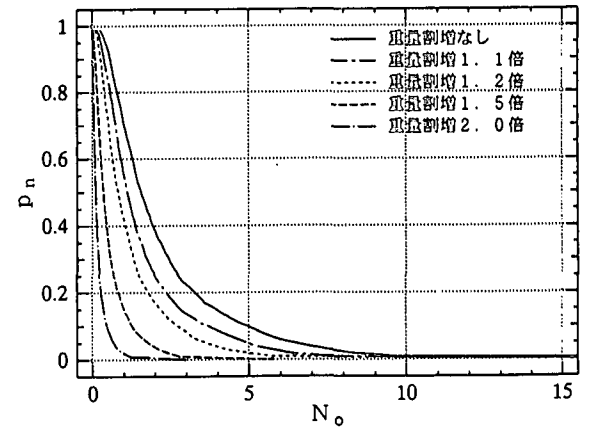


図-2 50年間の耐用年数間における累積被災度

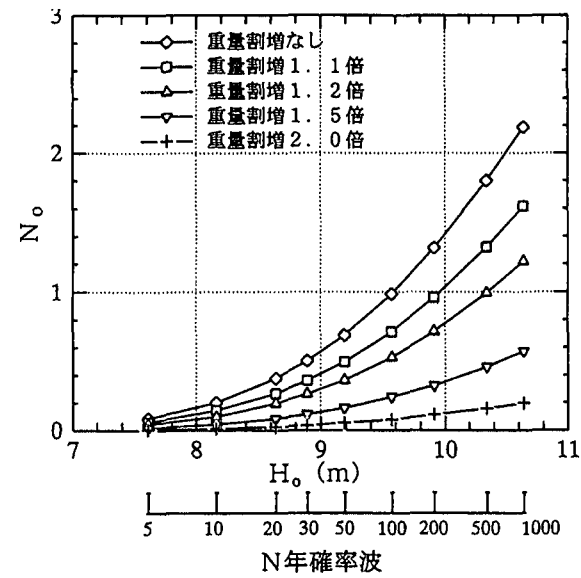
(4) 質量の割り増しの影響

図-3は、図-1と同様に横軸に沖波の波高をとって被災度の期待値を示したものであり、質量の割り増しによる変化を表している。例えば、2割増しの場合、50年確率波では0.362、500年確率波では0.993、1000年確率波では1.219であり、5割増しの場合、1000年確率波でも0.572とかなり低くおさえられる。

表-1は、質量の割り増しの影響をとりまとめたもので、最上段は50年確率波に対するその質量での被災度の値である。1.0倍の質量では0.3であるが、1.2倍で0.137、1.5倍では0.047と非常に小さくなる。二段目は、50年確率波に対する被災度で、変動性を考慮した場合の平均値であり、これは一段目の変動性を考慮しない値の約2倍となっている。

三段目は、耐用年数50年間の累積被災度の平均値（期待被災度）であり、これは、最上段の8倍程度の値となっている。例えば、2割増しであれば、期

待被災度は1.218とかなり小さくできる。実際のブロックでは割り増しがある場合が多く、これが、現状の被災度を小さくしている。ただし、50年間の期待被災度を小さくする必要があるときには、設計時にあらかじめ質量の割り増しをする必要がある。



図－3 確率波高と被災度（質量の割り増し）

表－1 質量の割り増しの影響

質量の割り増し	1.0	1.1	1.2	1.5	2.0
50年確率波に対する 確定論的被災度	0.300	0.201	0.137	0.047	0.009
50年確率波に対する変動を 考慮した場合の被災度の平均値	0.689	0.496	0.362	0.163	0.055
耐用年数50年間の累積被災度 (期待被災度)	2.236	1.636	1.218	0.548	0.185
確定論的被災度 0.300に対する確率年	50	87	157	1340	*
被災度の平均値 0.689に対する確率年	50	92	190	2100	*
期待(累積)被災度 2.24に対する確率年	50	77	125	410	2200

注)*印は10,000年以上

四段目は被災度 N_0 を0.3と固定した場合の対応する波の確率年数を示したものである。割り増しがない場合にはもちろん50年であるが、1.2倍で157年、1.5倍で1340年と急激に大きくなることがわかる。また五段目は変動性を考慮した場合の被災度に対応する確率年を、割り増しの無いときを基準として示したもので、変動性を考慮しない場合（四段目）とほぼ同じような年数となっている。

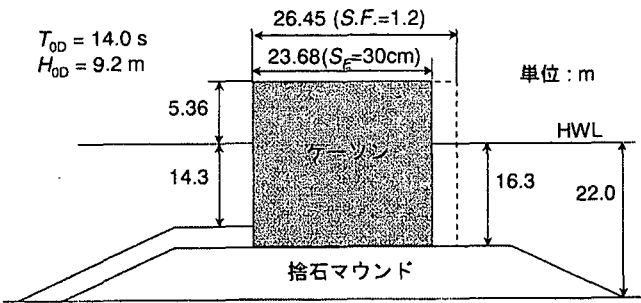
最下段には、期待（累積）被災度が2.24となる耐用年数を示している。割り増しが無いときには、2.24となる耐用年数はもちろん50年であるが、1.2倍で125年、1.5倍では410年となる。なお、図－2には質量の割り増しをした場合の50年間累積被災度の超過確率分布を示しているが、割り増しがないときの期待値と5%超過確率が2.24と6.46であったのが、5割増しにすると、0.55と1.78とかなり小さく

なることがわかる。
このように、現状においては曖昧な形で行われている質量の割り増しについても、その意味を耐波性能として示すことができる。また、重要な施設である場合には、質量の割り増しを行うことによって、耐波性能がどのように向上するかも明確に示すことができる。

3. 防波堤直立部の耐波安定性能の照査

(1)設計断面例

図－4は、防波堤直立部（混成堤、非消波タイプ）の設計例を示すものであり、従来の設計法、すなわち、波力に対する抵抗力の安全率（滑動安全率）を1.2とした断面と、安全率を1.07とした断面を比較している。後者は後述する50年間の滑動量の期待値（期待滑動量）を30cmとして設計した断面であり、断面が1割ほど小さくなっている。本章では、この期待滑動量を30cmとした断面についてその耐波安定性能を照査する。照査において重要となる滑動量の算定については、伊藤ら⁷⁾、堀川ら⁸⁾の研究を踏まえた著者らの方法を用いており、変動性の考慮については、下迫・高橋⁶⁾と同じである。



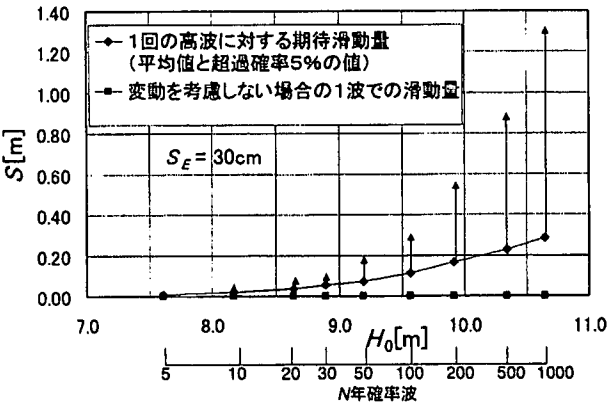
図－4 防波堤直立部の設計断面の例

(2)確率波と変形量の関係

図－5は、横軸に沖波の波高をとり滑動量を示したもので、図－1と同様に、横軸にはその沖波の確率年も示している。図中の■印は、沖波が決まったときの滑動量を通常の確定論的な計算法で求めたもので、これによって、どのような波高（確率波）のときにどの程度の滑動が発生するのかのかわかり、そのケーソンの性能が具体的にイメージできる。ただし、この例の場合には設計波高が碎波で頭打ちになるため、滑動量はほとんど0となっている。

図中のもう一つの曲線（◆）は、それぞれの沖波に対して、波浪変形の変動や一波一波の変動、さらには摩擦係数などの変動を考慮して計算した滑動量の期待値であり、同時に超過確率5%の滑動量までの範囲を矢印で示している。例えば、50年確率波が来襲したときには、平均的に7cmの滑動量となり、5%超過確率では19cmとなること、あるいは、500年確率波が来襲したときにも22cm程度の平均滑動量で収まることがわかる。なお、この場合は碎波帯で

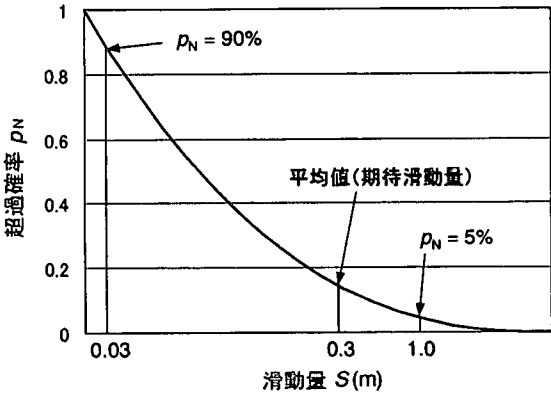
あるため、沖波が大きくなっても滑動量はそれほど大きくならないことがわかる。すなわち、この構造のねばり強さ（robustness）という性能もこうした図によって具体的に評価できる。



図－5 確率波高とそれによる被災（変形）

(3) 耐用年数間の累積変形量とその確率分布

図－6は、耐用年数50年間における直立部の累積滑動量の確率分布で、横軸を滑動量にとって超過確率を示しており、こうした確率分布は、このケーソンの50年間の具体的な耐波性能を示している。先に述べたようにこのケーソンはこの確率分布の期待値 S_E が30cmとなるように設計されているが、例えば、1 mの滑動量の超過確率は5％、また0.03mの滑動量の超過確率は90％となっている。また、ケーソンがマウンドから転落するような大きな滑動量（10m）の超過確率は、0.5％程度である。



図－6 50年間の耐用年数間の累積滑動量

4. 耐波安定性に関する性能設計

(1) 変形を考慮した設計法

耐波安定性の性能を照査することができれば、そうした性能（変形量）に基づく設計も可能である。ただし、その設計法には、対象とする性能を何にするかによっていくつかのレベルが考えられる。すなわち、

① 確率波とそれによる確定論的な変形量による設計

例えば、図－5（あるいは図－1）において、50年確率波高に対してその変形量を計算し、その値が許容変形量の設計値を下回るように設計する方法が考えられる。これは、従来の設計法に最も近い方法であるが、変形量を用いた設計法の一つである。また、例えば500年確率波高を後述する耐震設計におけるレベルⅡに相当する設計波と考えると、これに対する許容変形量を検討することも考えられる。

② 確率波とそれによる変形量の確率分布による設計

図－5の計算においては、変形量の確率分布も求めており、その平均値や5％超過確率なども得られている。①の確定論的な変形量の代わりに、その期待値や5％超過確率の変形量に基づいて設計することも考えられる。これは変形とその確率を考慮した信頼性設計の第一段階と考えられる。

③ 耐用年数間の累積変形量の確率分布による設計

図－6（あるいは図－2）の計算においては、耐用年数間の累積変形量の確率分布が求められている。この図に基づく性能設計も可能であり、これは変形を考慮した信頼性設計の第二段階と考えられる。例えば、図－3において1 mの滑動量の超過確率を10％とれば、堤体を小さくでき、そうした設計ももちろん可能である。また、ケーソンが10m以上滑動して、マウンドから落ちてしまうような時を、究極の限界として、その確率を1％以下にするというような設計も可能である。

④ 累積変形量の期待値による設計

図－3の確率分布からはその期待値も求められる。期待値は統計的にも比較的安定した値であり、現状ではまず期待被災度や期待滑動量になどの変形量の期待値に基づく設計を推し進めるのが現実的と思われる。ただし、設計に用いる変形量の期待値を決定する際には、図－2や図－3で示した性能を把握しておく必要がある。

(2) 今後の設計法

著者らは、上述した④の耐用年数間の累積変形量の期待値による設計法を、今後の設計法として重要と考えている。ただし、来襲波浪と変形量の具体的な関係を把握するためにも、②の確率波に対する変形量の平均値を用いる設計法も必要であると思っている。

表－2は、そうした設計法を具体的に示すために用意した表であり、(a)は消波ブロックの所要質量の算定における被災度の許容値であり、(b)は混成堤直立部の滑動量の許容値である。もちろん、こうした値は、決められたものではなく、責任技術者が決めるものであるが、設計の具体的なイメージを示すために標準的な値も示している。ただし、許容値は施設の重要度によって変えるべきであり、ここでは、通常の施設Bと親水性防波堤や背後に市街地がある場合など重要度が高い施設Aに分けて示している。また、②の確率波とそれによる変形量の確率分布、特に平均値を用いる設計法に対応して、50年確

率波と500年確率波の二つの来襲波（レベルⅠとⅡ）に対して変形量の平均値を示している。こうした重要度と外力による変形の許容値のマトリックスを性能マトリックスと呼んでおり、耐震設計の性能マトリックスが有名である。

さらに、表には④の耐用年数間の累積変形量の期待値による設計法に対応して、50年間の期待変形量（被災度・滑動量）の許容値も示している。

表－2 (a) 被災度の許容値

被災度	レベル	確率年	重要度	
			B	A
N年確率波に対する被災度 (変動を考慮した平均値)	Ⅰ	50	0.9	0.15
	Ⅱ	500	1.8	0.3
耐用年数間の期待被災度 (50年間、累積値)		50	2.4	0.6

表－2 (b) 滑動量の許容値

被災度	レベル	確率年	重要度	
			B	A
N年確率波に対する滑動量 (変動を考慮した平均値)	Ⅰ	50	10cm	1cm
	Ⅱ	500	30cm	5cm
耐用年数間の期待滑動量 (50年間、累積値)		50	30cm	5cm

表中の変形量の許容値については、先にも述べたように責任技術者によって決められるべきものであり、ここでは設定の考え方の例と目安としての値を示すものである。例えば、ブロックの被災度の許容値については、通常の構造物（重要度B）の場合、現行の設計法（50年確率波に対する確定論的被災度を0.3以下とする設計法）で設計すれば、通常は表中の許容値を満たせるように値を設定している。変動を考慮したときの50年および500年確率波に対する被災度はそれぞれ0.9、1.8以下であり、また50年間累積の期待被災度は2.4以下で、500年確率波に対する被災度とそれほど変わらない。ただし、水深や波高の条件によっては、たとえば、500年確率波による被災度の許容値でブロック質量が決まることもある。

一方、重要な構造物（重要度A）については、500年確率波に対する被災度を0.3と小さくすることを基準に考えている。ただし、50年間累積の期待被災度は500年確率波に対する被災度の2倍としており、重要度Bの場合に比べて相対的に許容値がやや大きい。これは、消波ブロックの場合、重要な構造物であれば、途中で多少ブロックの移動（被災）が生じたとき、そのまま放置せず修復されるのが普通であることを考慮して許容値を設定したためである。

滑動量の許容値については、通常の構造物（B）の場合、50年間累積の期待滑動量を30cm程度とすることを基準に考えている。この値は、1 函だけ滑動が生じた場合にケーソン側壁の破壊を防ぐことや、現行の被災基準が30cm程度であることなどを考慮して決めたものである。通常の条件では、50年間累積の期待滑動量が30cmで設計すれば、50年および500

年確率波に対する滑動量は、表中の滑動量以下となる。ただし、水深や波高によっては、例えば500年確率波のときの滑動量で断面が決まることも考えられる。

一方、重要な構造物（A）については、変形をできるだけ小さくおさえるため、50年間累積の期待滑動量を5cmとしている。なお、滑動については、通常の構造物であっても、原則として耐用期間中に修復を必要としないという前提に基づいているため、ブロックの場合に比べて相対的に許容値を小さくしている。

(3) 変形による影響を考慮した設計法

変形量の許容値は、その具体的な影響を把握して決定する必要があるが、さらに進めば、その影響を定量的に把握し、それに基づいた設計も理論的には可能である。本節では、そうした変形による影響を考慮した設計法を述べる。

①機能の低下を考慮する設計

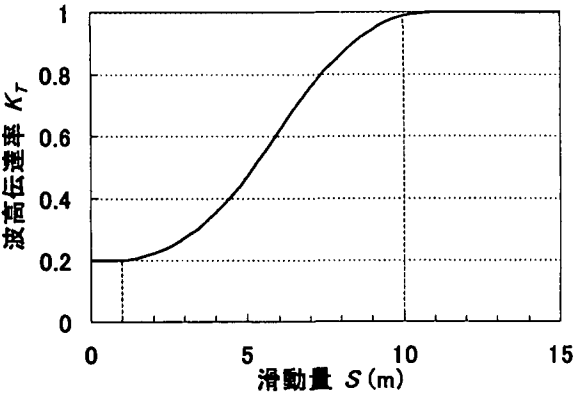
図－7は、横軸に変形量を取り、伝達波高との関係を模式的に示したものである。こうした関係が別途明らかになれば、前掲の図－5や図－6と併せて用いることにより、例えば、伝達波をある程度以下におさえるという機能に基づく設計も可能である。

②二次災害を考慮した設計

被災（変形）に伴って発生する二次災害を把握することができれば、それを判断基準に許容変形量を決めることもできる。

③コストを考慮した設計

機能低下や二次災害にともなうコスト、あるいは復旧費を照査できれば、これに基づいて許容変形量を決定することも可能である。実際、ケーソンの滑動に対する復旧費だけではあるが、コストを計算した例があり、建設費との合計の期待値を最小にする設計も考えられている。しかしながら、実際にはそうした計算はなかなか困難であり、将来の設計法としてさらに検討が必要である。



図－7 変形量と伝達波の関係

(4) その他の海域施設の設計

本報告では、性能設計の適用について検討が進ん

でいる消波ブロック被覆堤の消波ブロックの被害と、混成堤の直立部の滑動について示したが、防波堤については、沈下など別の変形も検討が必要である⁹⁾。また同様な方法は、防波堤以外の海域施設にも適用できると思われ、今後さらに検討を進めていく予定である。

なお、台風9918号の被災でもわかるように、湾内の施設の被災は台風によるものが多く、その場合には同時に高潮の発生が考えられる。したがって、高潮の確率分布が重要であり、できれば高波との結合確率分布も必要である。ただし、高潮の確率分布はその推定が困難であり、さらに研究が必要である。なお、現在の設計においては一つの設計高潮潮位が決められているが、その確率年は不明な場合が多く、非常に長い場合と意外に短い場合が混在している。地震のようにレベルⅠ（50年確率）とレベルⅡ（500年確率）の二つの高潮を決めて、それぞれに対する被災を検討することが合理的と考えられる。すなわち、高潮時についても表-2で示したような外力として2つのレベルを考え、施設の重要度に応じて被災の程度（変形の許容値）を考えていくのが適切と思われる。

5. あとがき

現状の港湾構造物の耐波設計は、波力の算定法をはじめかなり整備されている。もちろん、吸い出しや洗掘等の地盤との相互作用など、十分には解決されていない問題も少なくないが、ある程度設計法が確立されている。一方、現在ではある程度壊れないものを作りさえすればよい時代から、作られる構造物の性能をより明確にし、かつ経済的にすることが求められる時代になりつつある。すなわち、利用者や一般市民の理解を得るためには、作られる構造物の経済性や機能・安定性能を十分説明できるものであること（アカウンタビリティ）が必要である。特に、防災に係わる施設の場合には、通常の設計条件やそれを上回る場合の被災（変形）の程度やそれによる防災機能の低下の程度を設計時に把握しておくことが重要である。

最近では、公共施設の整備を民間主体で進める制度であるPFI(Private Finance Initiative)なども考えられており、そうした場合には被災に対する保険が必要となってくる。こうした保険の合理的設定には適切な性能の照査が不可欠である。海域施設の性能設計を推進するためには、被災（変形）量の照査方法の確立が不可欠であり、また対応する変形量の許容値の合理的な設定が重要となる。

本報告で示した性能設計は、異常波浪時を対象にした耐波安定性能に対する性能設計である。ただし、施設の設計においては、安定性だけでなく、機能や市民の利用あるいは景観や環境についても性能照査

が必要となっている。また、期間についても異常波浪時だけでなく施工時から耐用年数の間（あるいはそれ以上）の常時を対象にすべきであり、維持管理等についても設計時に考慮する必要がある。すなわち、これまでの設計は、設計波という50年間に一回程度という時間と、安定性という項目に対する限定的な設計であったが、将来の設計は、施設の一生についてあらゆる角度からその性能をできるだけ明らかにする（照査、シミュレーションする）、包括的な設計にする必要である。もちろん、こうした設計は費用と時間がかかるが、重要な施設であればその必要性は今後ますます高まり、徐々に実施されていくものと思われる。

謝辞

海域施設の性能設計あるいは信頼性設計については、横浜国大の合田良実名誉教授、埼玉大学の谷本勝利教授、京都大学防災研究所の高山知司教授より、多くのご指導・ご助言をいただいている。また、土木学会文献レビュー小委員会（委員長、安田孝志岐阜大学教授）でも海域施設の新しい設計法について議論がなされており、佐藤慎司東京大学助教授ほか設計WGの各位からも多くのご助言・ご指導を得ている。ここに記して深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 運上茂樹：性能設計及び限界状態設計による橋梁の耐震設計体系について、橋梁構造等の耐震設計法に関する講習会－耐震設計の現状と今後の展望－、土木学会地震工学委員会 地震時保有耐力法に基づく耐震設計法の開発に関する研究小委員会, 1999.
- 2) van der Meer, J. W. : Deterministic and probabilistic design of breakwater armor layers, Journal of Waterway Port Coastal and Ocean Engineering, ASCE, pp.66-80, 1988.
- 3) 高橋重雄・半沢 稔・佐藤弘和・五明英智男・下迫健一郎・寺内 潔・高山知司・谷本勝利：期待被災度を考慮した消波ブロックの安定重量, 港研報告, 第37巻, 第1号, pp.3-32, 1998.
- 4) 合田良実：設計波高および設計潮位の決め方, 水工学に関する夏期研修会講義集, Bコース, 土木学会水理委員会, B-4-1～B-4-18, 1997.
- 5) 高山知司・藤井 久：信頼性理論による防波堤の滑動安定性に関する理論的検討, 港研報告, 第30巻, 第4号, pp.35～64, 1991.
- 6) 下迫健一郎・高橋重雄：期待滑動量を用いた混成防波堤直立部の信頼性設計, 港研報告, 第37巻, 第3号, pp.3-30, 1998.
- 7) 伊藤喜行・藤島陸夫・北谷高雄：防波堤の安定性について, 港研報告, 第5巻, 第14号, 134p, 1966.
- 8) 堀川清司・小沢保臣・高橋邦夫：高基混成堤直立部の期待滑動量について, 第19回海岸工学講演会論文集, pp.351-356, 1972.
- 9) 土田 孝・湯 治新：港湾構造物の円弧滑り解析における最適な安全率, 港研報告, 第35巻 第1号, pp.117-145, 1996.