

捨石護岸の断面的・平面的安定性と水理特性

柳 青魯*・金 憲泰*・孫 炳奎**・李 泰煥***

1. 序 論

親環境・耐災性を強調する護岸の水理特性に関する再検討は勿論, 新しい水理環境制御技術の開発と導入が必要に成りつつある(例えば, 鈴木・高橋, 1998; 神山・鹿島, 1998 等). 本研究では 2 km 程の長さを持ち, 法線の変化がある現場の護岸の破壊特性と水理環境に関する調査結果を基に 2 次元・3 次元水理実験を計画し, 越波量を中心とした水理特性と安定性の平面的分布と断面的機構を詳細に論議しようとしたものである. その為に, 次のような現象に注目する. (i) 安定性に対する破壊原因別に定義した破壊モードの区間(平面)的分布特性と断面特性に関する現地調査結果と実験結果による破壊の原因究明, (ii) 波力による捨石の移動(破壊)と基部洗掘による破壊および構造的破壊の空間的分布特性の整理, (iii) 多機能型(水産親和型等)による越波および波浪の制御と安定性の向上対策に関する実験的検討.

以上の目的を達成する為に不規則波による断面的, 平面的安定性問題, 越波量の空間的分布特性, 海底地形と水理特性と絡んだ安定性との関係に関して検討する.

2. 現地調査と実験方法

2.1 護岸の安定性と越波災害調査

図一1に示したように 1988 年, 韓国の釜山, 水營灣に建設されたヨート港周辺の大規模埋立地の護岸におけるブロック被覆工の破壊と越波による災害の特性を調べ, 初期設計時に考えていなかった災害の特徴を整理し, 水理実験の基礎資料として使うことにした. 破壊状況および区域別越波特性は図一1の各々の区間番号にて行われ, 安定性に対しては潜水撮影および陸上測量により行われ, 越波量に対しては主に高波浪時のビデオ撮影および聞き取りによるものである.

2.2 安定性に関する移動床実験

a) 2 次元実験

2 次元実験は図一2に示した現地構造物断面を中心に

1/100 縮尺模型による実験と, 1:1.5 の一様断面の越波を許容しない構造での安定性に関する実験を行った. 安定性実験は大きく基部洗掘によるブロックの移動と斜面上の波力による破壊(移動)を分けて各々の破壊モードに対する限界を求めるようにした. 護岸の基部洗掘に関する実験に用いた実験砂は $d_{50}=0.18$ mm, 0.32 mm の 2 種類にした. 被覆工は 20 g の TTP 模型を用い 2 層積みにし, filter 層と core 部は碎石と小石を用い縮尺効果が出ないような透水係数を保つようにした(Ryu・Kim, 1994). 後述する基本型不規則波に波高を段階的に増大させながら, ピーク周波数を 1.2 から 0.75 まで変化させ, 各々のケースに対して洗掘の進み具合とブロックの移動具合に合わせて十分な波数を与えた. 洗掘深の変化は自動読み取りかた斜面計を用い, 毎 10 分おきに洗掘深とブロックの移動状況を測定し, 平衡断面(洗掘深)を確認してから次のケースの実験に進んだ.

b) 3 次元実験

3 次元実験は図一1に示したように CASE I と CASE II に分けて 1/100 縮尺模型によって安定性と越波量の空間的分布特性を調べることにした. 2 次元と 3 次元実験条件は基本的に同じもので, 波と構造物と砂の縮尺率を同じ条件になるようにし, 断面的変化と 3 次元平面変化の特徴を関連付けて論議できるように試みた. 特に, 3 次元実験では幅 10 m, 長さ 25 m, 水深 0.8 m の平面水槽に 10 個の造波板から作られる基本的に多方向不規則波造波機による方向性不規則波を実験対象にした($S_{max}=40\sim70$). ここで用いた周波数スペクトルは Bretschneider-Mitsuyasu 型と JONSWAP 型を基本とした. また, 3 次元的な越波の制御と洗掘および波力による被災(破壊)を防ぎ, 安定性を向上させるための対策として水産親和型潜堤を想定し, 天端幅を $L/8.7$ から $L/4.3$ までに変化させ, 長さは図一1のようにして配置し, 天端深さは周辺水深の 1/3 にした実験を行った. ここで L は代表波長である. 全体的に不規則波実験は波の種類を 2 つの基本型に周波数と波高を段階的に変化させ, また, 方向集中度を換えながら各々の地盤条件と構造形式に対して 50 ケースずつ, 150 余りのケースの実験を行った.

* 正会員 工博 韓国 釜慶大学校教授 海洋工学科
** 工修 韓国 釜慶大学校大学院 海洋工学科
*** 工博 韓国 (株) 大宇建設・大宇 Eng. 理事

3. 頻度外力と破壊特性

3.1 現地護岸の被災レベル

図-3は図-1に示した各区間断面での被災レベルを調査して整理したものである。図中のA, B, Cは被災レベルを分けたもので、Cレベルは補修が要求される程の破壊率を示す場合である。また、その破壊と被災の主な原因と現状を記してある。即ち、現場では区間13~18で、法先基部の洗堀によるブロックの移動・埋没が発見され、また、斜面での波力による移動と見られる断面の変動とブロックの散らばりが著しく発見できる領域である。基部の局所洗堀は20トンTTPを殆ど埋めるまで沈下させた場所があり、それが図-3に記されている。また、そのブロックの周辺はフィルタ層の砕石が吸い出され移動した被覆工と一緒に散らばっている。一方、越波による車の事故などがこの区域で頻発することも報告されている。また、周辺海域は初期建設当時より浚渫および海域への流入土砂の低減による侵食がここ10年間続いてきた深淺測量結果も得られ、被災対策が総合的に行わなければならない状態になっているといえる。また、現在は土地は利用せず、道路の利用も頻繁ではないが、台風時にはTTPが道路に飛んで落ちる例がある所である。この調査は最近の大規模開発計画と絡んだ安定性の検討が必要で釜山市と(株)大字と専門家グループが総合調査に取り組むことになった現場である。

3.2 頻度外力と破壊

図-4は釜山、水營灣の外力特性を釜山港周辺の7年間の波浪観測資料をもとに整理し、また、従来の台風からの波浪推算手法による推算値を加え頻度外力図を作ったものである。それぞれの頻度別に発生波高・周期の分布形態を表しており、各々の周期に対する高波浪95%信頼区間を示した一例である。この図には2次元模型実験から求められた破壊率変動とこれらの外力との関係をも示しているが、砕波帯に置かれた護岸の安定性は空間的に複雑になる水理特性および地形に影響され、設計波のような高波浪時に安定であるのに対し、それより小さい波により破壊される例が多く、20~30年頻度の外力に対して破壊される特徴を発見した。これは砕波帯に置かれた構造物の安定性を検討する際に、外力の区間分布が安定性に及ぼす影響をより詳細に検討する必要があることを意味する。このような換算深海設計波 ($H_{1/3}=10\text{m}$, $T_{1/3}=15\text{s}$)を対象に、埋め立て護岸の前面での波高分布を実験的に区間別に求めて、示したものが図-5である。図-5において、護岸における波浪の平面的分布特性を概略的に判り、F地点での高波浪特性は後述する安定性、越波量分布および護岸前面での洗堀の平面分布とも関係してくると思われる。

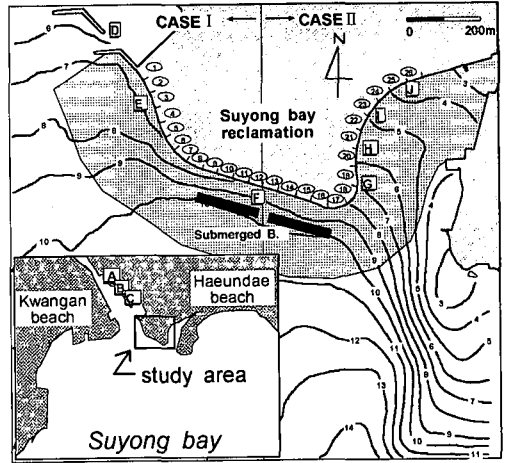


図-1 対象海岸と護岸の調査定点

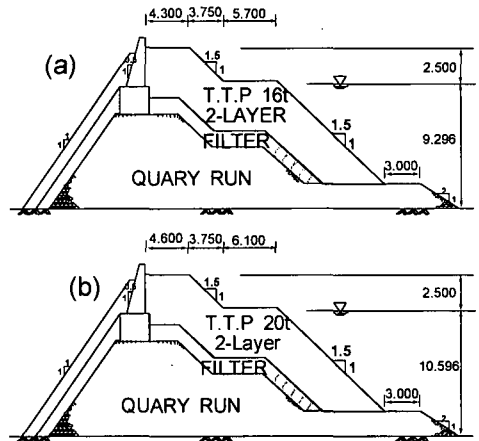


図-2 対象護岸の代表断面と実験断面

Damage level	Causes related				
	●	○	▽	○	▽
	Local scouring	Wave force	Tolerable overtopping		
	Conditions above the S.W.L.				A : Stable B : Transition C : Tolerable
	B	C	C	A	
	Conditions below the S.W.L.				
	A : Stable B : Transition C : Tolerable	B	C	C	A
	1-5	8-12	13-15	16-18	19-21
	Sections				

図-3 現地護岸の被災レベル

3.3 破壊モードの区分

前述したように、捨石構造物の被覆工(ブロック)の移動は、大きく分けて法先基部の局所洗堀による転が

り・沈下モードという破壊と斜面上での波と構造物の相互干渉による即ち、波力の直接作用によるものに区分できる。勿論、この2つの破壊モード以外にも柳・金(1993)による100%被災率以後の構造物上部の滑りによる破壊モード、越波を許容する捨石構造物での背後破壊モード等が考えられるが、ここでは現地の被災調査結果から得られた被災モードのみに着目して論議してみることにする。

図-6は各々の区間断面における法先基部の局所洗堀深さを3次元実験で調べた結果の1例である。水平空間の法先を沿って侵食と堆積が交互に生じるような波らしい水平的洗堀様子が見受けられる。また、当然のことながら潜堤の設置により、全般的には洗堀深が減りますが、17~18番、区間では必ずしもそうでもなく、むしろ増加する異常な場合もあるから潜堤の端付近の急変には注意が必要になる。しかし、このような傾向は現場でも発見できることから、今後の調査ではこのような波の特性を念に入れて再現性を検証して行きたい。

捨石構造物の破壊モードを波の直接作用によるものと基部洗堀によるものに区別して、安定実験の結果を整理すると図-7に示したような典型的な結果が得られた。この結果は2次元実験の結果のみによるものであり、3次元になると前述したような波型洗堀などの水平的機構がさらに究明されなければならないと思われる。この図において、斜面上の波作用による捨石(ブロック)の破壊(移動)はRyu・Kim(1984)のように、碎波帯相似因子(surf-similarity parameter; $\xi_{1/3} = \tan \theta / (H_{1/3} / L_{1/3})^{1/2}$) 変化によって同じ破壊率を示す相対波高 $\{H_{1/3}/h\}$ が変わり、斜面上の共振現象が起こりうる条件で最も危険であることが言える。しかし、基部の洗堀による破壊は、その進行速度が遅く、比較的共振領域から離れた、周期の長い高波浪によるものと考えられる。しかし、このような破壊モードは碎波帯前後により、また、地盤の特性も含んだ構造形式などにより大きく影響されると思われ、今後このような実験的研究の補充と共に、数値モデルの開発にもこのような破壊モードが再現できるように詳細な検討を量ねて行きたい。

4. 越波量と破壊率の空間分布

図-8は越波量と破壊率の平面空間的分布の特徴を示したものである。各々の結果は護岸のみの場合と、水産親和型潜堤を図-1のように配置した場合、結果を比較して示したものである。平面的な海底地形、破壊レベルと越波量の間には、深い相関を持つことが認められる。特に、同図の(a)に表した、約最高高潮時(HHW)の結果を見ると、平面的に波象の越波量と被災率の変動を見ることが出来る。それがまた約最低低潮面を条件とし

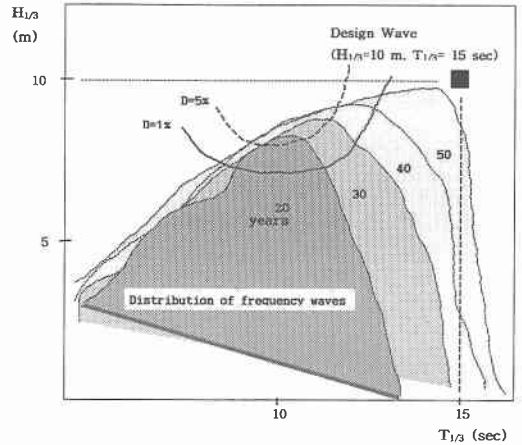


図-4 頻度外力と破壊特性

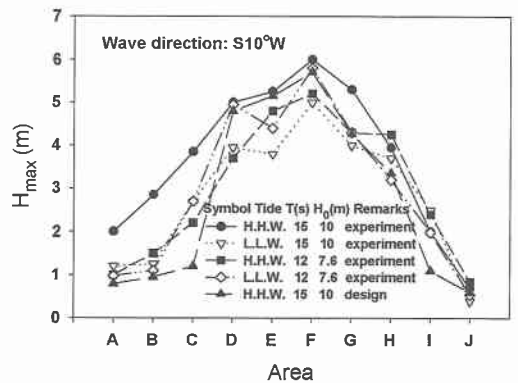


図-5 設計波来襲時の護岸各地点での最大波高分布図

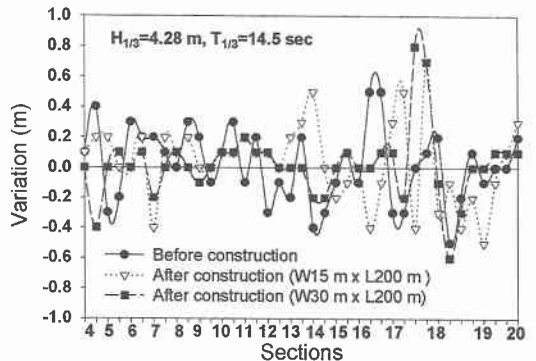


図-6 護岸の区間別断面基部の洗堀深さ

た場合には図の(b)のように水深が浅くなる分、越波も弱くなり、安定性も良くなる傾向が出ている。しかし、11~13番区間では、安定性と越波量共に大きい領域が残っている。いずれも護岸前面水域に置かれた潜堤によ

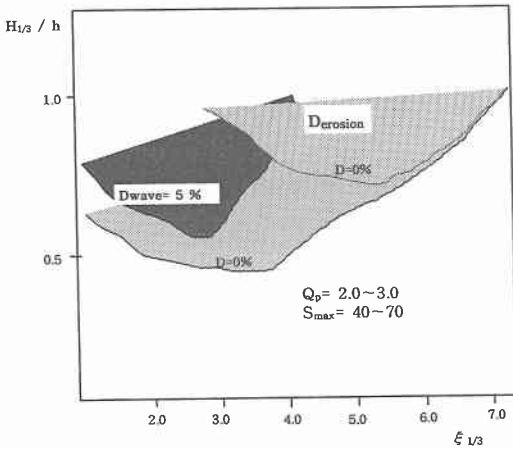


図-7 破壊モードの区分例

る越波の制御と安定性の向上効果が見受けられる。特に、天端幅の広いケース、即ち入射波波長の1/4程の幅を持つ潜堤の効果がいいことがわかる。

このような平面空間での安定性の変動と越波量の変動は碎波帯内の複雑な水理・波浪環境にも影響されるし、特に、不規則波の方向性とピーク周波数およびスペクトルの尖鋭度等との関連を実験的に的または現場での測定による研究を進めていく必要がある。

5. 結 語

以上、本研究では捨石構造物の破壊モードの中で主に波先基部の洗堀による破壊と斜面上の波と構造物の相互作用による波力の直接作用による破壊(ブロックの移動)に対して論議してきた。特に碎波帯内での護岸での越波と関連付けながら現地調査、2次元、3次元の不規則波実験を基にしたもので、特殊な条件での破壊モード別の典型的な限界を求めることができたが、3次元効果による水平的波型洗堀分布、越波分布、被災分布と不規則波の方向性と周期による影響を今後さらに追究して行くための実験的研究は勿論、数値モデルによる再現を目指して行きたい。

また、従来の研究において、問題になってきた外力因子化の問題、例えば、柳ら(1993)またはVan der Meer(1988)等はスペクトルの尖鋭度因子を使い、また、高波の持続時間を外力因子と導入したりした、不規則波を対象とした設計式の持つ意味を見なおし、なおも、これら大部分の設計式は斜面上の波作用による安定性の評価のみに着目しており、捨石堤防の多様な利用の仕方に応じ

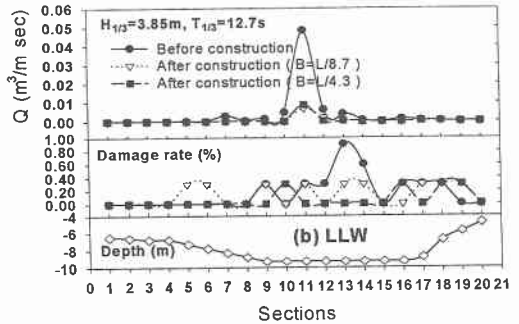
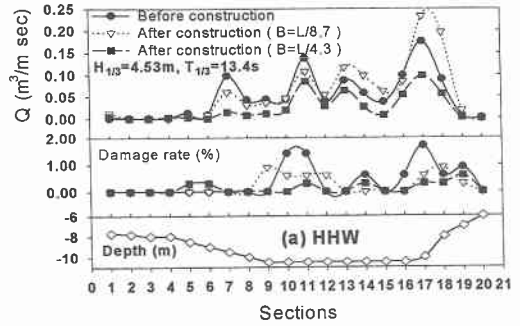


図-8 越波量と破壊率の平面的分布例

られ、多様な破壊モードに対応できる水理特性の解析、設計への応用に取り組める必要がある。

謝辞：本研究は(株)大宇建設・大宇 Eng.と釜山市の合同調査計画による研究費支援によるものであり、記して謝意を表する。

参 考 文 献

楠山 勉・鹿島遼一(1998): 消波ブロック被覆工の法先洗堀と波浪条件に関する研究, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 886-890.
 鈴木高二郎・高橋重雄(1998): 消波ブロック被覆堤のブロック沈下に関する一実験, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 821-825.
 柳 青魯・金 鉉周(1993): 不規則波の諸特性を考慮した捨石構造物の安定性評価, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 806-810.
 Ryu, C. R. and H. J. Kim (1994): Failure of rubble mound structures due to the storm duration and the irregularity of ocean waves, Proc. 24 th ICCE, pp. 1526-1540.
 Van der Meer (1988): Rock slopes and gravel beaches under wave attack, Doctoral Thesis, Delft Univ. of Technology, 152 p.