

# 受海嘯影響之海岸工程設計探討

蔡 瑤 堂

台灣省水利技師公會會員、水利技師

## 摘 要

本文先就與海岸工程有關之海嘯特性予以說明，其特性包括海嘯之形成、海嘯之傳遞速度、海嘯波高，海嘯週期及波長，海嘯之變形，海嘯水流速度、海嘯溯升等。然後就受海嘯影響之海岸結構物設計加以探討，不同於抗颱風波浪之海岸結構物，因地震會比海嘯先到達，承受海嘯之海岸結構物亦須考量地震，以確保海嘯到達前，結構物是完整的。而強勁水流、越波及衝擊波力是設計抗海嘯海岸結構物必須詳加考量的。本文根據 2004 南亞及 2011 日本大海嘯對海岸結構物之破壞調查結果，對海堤之設計須考量堤前水位升高對堤身穩定性之影響，而海嘯向海側退下時須注意堤前保護工可能遭到破壞，堤背保護工必須能承受大量越波的衝擊。合成式防坡堤同樣會遭到急速水流影響拋石基礎的穩定及承載力，大量越波則易造成港側拋石基礎的破壞。最後則就設計時，對受海嘯影響部分提出改善對策建議。

## 一、 前言

在台灣建造海堤及防波堤以抗颱風波浪的技術已相當成熟，但若要建造海堤來抗海嘯，以保護海岸之陸上設施、生命、及財產等，或港灣工程需要建抗海嘯防波堤來保護港內設施及船隻等，雖然可把建造抗颱風波浪之海堤及防波堤得技術加以發揮，但必須先就海嘯對工程的影響有深入瞭解才能建造適當的抗海嘯海堤及防波堤。

本文即針對設計及建造抗海嘯相關之海岸工程加以探討。

## 二、 海嘯之基本性質

海嘯波與一般風浪相同，可用波高、波長及週期來描述。

### (一) 海嘯之形成[2]

海嘯一般由海底地震，海底火山爆發、大規模邊坡滑落、及大型隕石衝入海洋

等引發。在此僅針對海底地震引發之海嘯。

海嘯產生過程:1)海床瞬間斷裂上昇,同時向上推移大量海水。2)被推移之海水在水面形成波峰,如圖1所示。3)重力把波峰往下拉(故海嘯屬重力波),恢復水面至其平衡位置,使能量以水平方向傳遞,並以同心圓向四周傳遞。

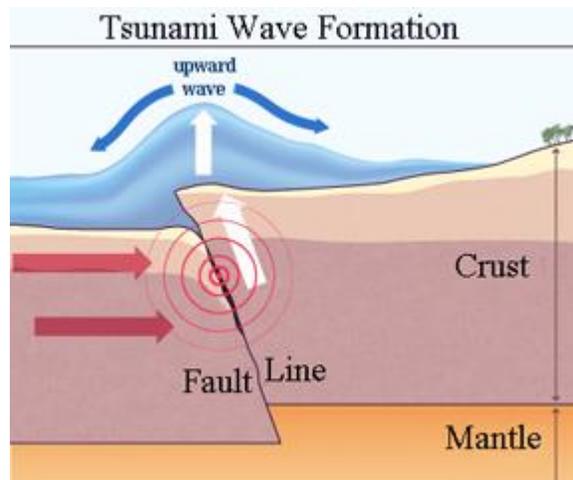


圖1. 海嘯形成瞬間

(<http://msnickellecearthsci.blogspot.tw/2013/09/faults-folds-earthquakes-and-volcanoes.html>)

## (二) 海嘯之傳遞速度[4]

因海嘯屬長波,如後述,水深與波長比甚小,故屬淺水波,因此其傳遞速度(tsunami wave celerity)僅與水深有關,如式(1)所示。

$$C=\sqrt{gh} \quad (1)$$

式中

C:波速(m/s)

g:重力加速度( $m/s^2$ )

h:水深(m)

日本2011年3月11日地震,震央水深約3,000公尺,其海嘯波速約617公里/時。在太平洋平均水深約4,000公尺,海嘯速度約713公里/時。台灣高鐵最高營運速度為300公里/時,不到上述水深海嘯速度的一半,可見海嘯速度之快。圖2.為海嘯之傳遞示意圖,到達岸邊水深約20公尺處,其速度則減至50公里/時。

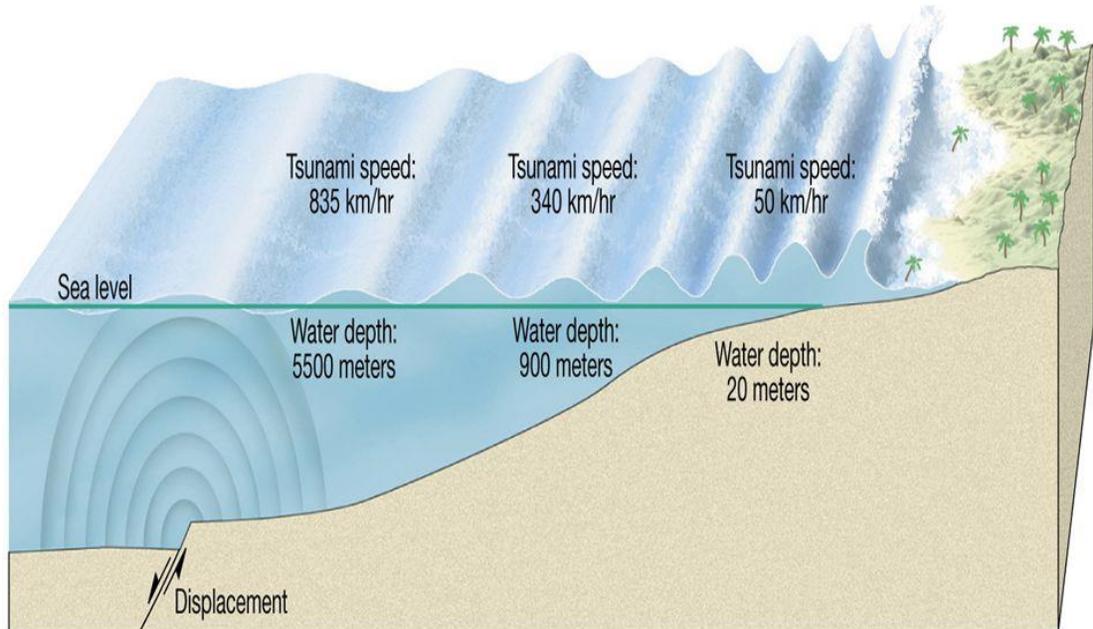


圖2. 海嘯之傳遞

(<http://slideplayer.com/slide/4148814/>)

### (三) 海嘯波高(tsunami height)

與一般風浪一樣，海嘯波高定義為波峰及波谷高差之絕對值。海嘯波高度視海床斷層最大垂直位移，波高約等於海水被推高之垂直位移，例如一8級海底地震，海床最大可能產生15公尺之垂直位移，在震央亦可能產生15公尺高之海嘯。平均海嘯波長約360公里，因此波峰兩側坡度非常緩，故海嘯一般亦被視為孤立波。另外，因海嘯到達岸邊或溯升至陸上之高度因地而異，故亦常以海嘯痕跡高度(tsunami trace height)[4]來定義為海嘯高度，即海嘯留在陸上痕跡之高度。

### (四) 海嘯週期及波長

海嘯之週期視地震時海底下擾動之規模及形狀而定，即海床位移大小及方向，海嘯之週期一般界於10分鐘至2小時，而一般風浪之週期則介於5~20秒。

海嘯波亦屬不規則波，其主導週期(predominant period)則視海嘯表面積大小、至震央之距離、及海灣共振特性等而定。除了主導週期，要特別注意的是若其成分週期(component period)與海灣或港域相同，將引起共振現象。

波長等於波速乘上週期，如上例波速617公里/時，假設週期為30分鐘，則其波長為309公里，若到達岸邊水深20公尺處，其波長則縮短至25公里。

### (五) 海嘯之變形(tsunami transformation)

海嘯波與風浪一樣在其前進過程中，會因淺化、折射、及繞射等現象而變形。

#### 1. 淺化:

海嘯因波長甚長，穿透力強，即使傳遞很長的距離，其能量損失有限，經淺化後，速度降低，能量堆疊，波長變短，但能量幾乎維持不變，故波高急速增高，可高達20~30公尺。因海嘯屬淺水波，若不考慮折射現象，則其波高隨著水深變淺而增大。如圖3所示2004年南亞大海嘯到達岸邊其波高劇增。

#### 2. 折射:

海嘯屬淺水波，故受海底地形影響甚為明顯，幾乎在海嘯形成時就受地形影響，因著折射現象，產生能量集中或分散並改變波向。

#### 3. 繞射:

海嘯同樣有繞射現象，在防波堤或島嶼遮避處亦會遭受破壞。



圖3. 2014南亞大海嘯到達岸邊波高劇增  
(<http://www.spiegel.de/pics/49/0,1020,1349149,00.jpg>)

### (六) 海嘯在灣內之變形

海嘯進入海灣後高度增加，流速加快，此乃因灣內水深變淺，波向幅射線變窄所致。

若在深海灣內，波高水深比小時，則波高可由式(2)Green定律計得。

$$\frac{H_2}{H_1} = \left\{ \frac{b_1}{b_2} \right\}^{1/2} \left\{ \frac{h_1}{h_2} \right\}^{1/4} \quad (2)$$

式中

H1: 在斷面寬度b1及水深h1之海嘯高度

H2: 在斷面寬度b2及水深h2之海嘯高度

式(2)僅適用於寬度及水深漸變處，且無反射波之情況。

### (七) 海嘯水流速度

因波長甚長，海嘯之水粒子流速由水面至海床非常均勻，水深越淺流速越快。海嘯因淺化或進入灣內後，波高急速增大，且波長甚長，海嘯在離岸甚遠處即嚴重觸底，拖曳在海床，而形成一道水牆，如圖4所示。當其超越大陸礁接近陸地時，就像湍急的洪水向前衝。其水流像水壩潰決，急速而下。其流速如下[4]:

$$U = \frac{C\eta}{h} = \eta\sqrt{g/h} \quad (3)$$

式中

$\eta$ : 海平面之偏離量(m)

C: 波速(m/s)

h: 水深(m)

g: 重力加速度( $m/s^2$ )

例如，假設其海平面偏離量為20公尺，水深10公尺，則流速為20公尺/秒(72公里/時)，而波速為9.9公尺/秒，故波形已不存在，而是一道湍急洪流。



圖4. 海嘯進入淺水區

(<http://environment-clean-generations.blogspot.tw/2011/11/tsunami-warnings.html>)

### (八) 海嘯溯升

海嘯之溯升係以其溯上高度(runup height)定義，即海嘯溯升至陸上或構造物上之高程。

學術天地-工程技術新知  
受海嘯影響之海岸工程設計探討

海嘯到達岸邊即開始溯升，如圖5、圖6、及圖7所示，因嚴重觸底，往陸上溯升之海水夾帶大量泥沙、礫石、廢棄物等，對岸邊植物或結構物造成極大衝擊破壞。溯升之海嘯像一道洪流，退下後又向下刷，繼續造成破壞。

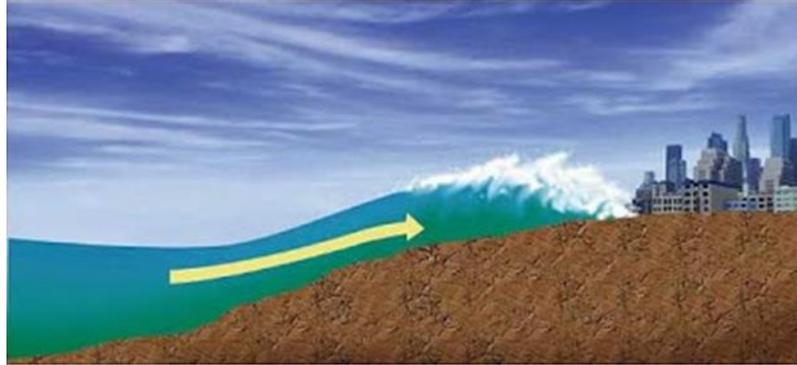


圖5. 海嘯之溯升

(<http://rj3sp.blogspot.tw/2012/03/killer-waves.html>)



圖6. 2004南亞海嘯溯升前(上圖)後(下圖)

(<http://naturaldisastershamane.wikispaces.com/Week+5+-+Tsunami>)



圖7. 2011日本海嘯夾帶大量沿途沖毀的東西  
(<http://extremepianet.me/2014/02/04/detailed-imagery-of-the-2011-japan-tsunami/>)

### 三、受海嘯影響之海岸工程設計考量

#### (一) 一般設計概念

一般承受颱風波浪的海岸結構物往往不考慮地震，但若是海嘯則要考慮地震[5]，因在近海發生的海嘯，結構物會先受到地震的作用，可能會發生倒塌下陷、液化等降低結構物高度，或失去抗海嘯的能力，因此後續之海嘯到達時，海岸結構物可能降低保護其背後設施的能力。

從經濟觀點，海岸結構物之高度應容許越波，但其強度則以海嘯來決定。日本把設計海嘯分為兩個等級：等級I之海嘯為發生回歸期50-60至150-160年[5]，等級II海嘯之回歸期為幾百年至幾千年。海岸結構物必須能防止等級I海嘯造成之溢淹(inundation)，但對比等級I海嘯大者，不得發生立即性破壞。但國際航海協會(PIANC)則建議加強結構物使其能承受等級II海嘯。

另外海嘯波力雖然已有眾多研究，但因其複雜性，最好還是以水工模型試驗加以驗證。

#### (二) 海堤

根據南亞2004與日本2011大海嘯破壞情形調查，若海嘯不是高過海堤甚大，則海堤對其背後陸上之減災有明顯的功效，但若海嘯高過海堤太大，則顯不出效果。依2004年海嘯在泰國的災情調查[1]，海堤海側面若是垂直或返波面，則有明顯的保

護功能，若是向陸側斜，則斜坡提供海嘯一道溯升坡道，海嘯射流會造成背後更高更遠的破壞。

海嘯產生之作用力大小，基本上與(1)溢淹深度(inundation depth)、(2)流速、(3)流向等有關。海堤一般由海灘與灘線隔離，或堤前水深淺，但海嘯襲擊時，可能有大量越波，甚至整個淹沒在水下(如2011日本大海嘯圖8所示)，故溢淹深度對海嘯作用力會有所貢獻，溢淹時亦可能在海堤堤基產生滲透流，降低基礎承载力，並增加浮力，減輕海堤自重，而越波時，因其水體甚大，往往在堤後造成嚴重沖刷破壞(如2011日本大海嘯圖9所示)，降低海堤之安定性。而另一方面，在海嘯波谷，海水向海側退下(draw-down)時，水位急速降下伴隨之水流亦會對海堤前之保護工造成嚴重破壞。海嘯流如洪流，對海堤會產生沖擊力，而流速與海堤前地形有密切關係，若為縮收地形，則波高及流速均會急速增大。而流向亦受地形及地面地質特性所控制，如前所述，海嘯屬淺水波，嚴重觸底，流速又強，因此會造成嚴重沖刷，改變地形地貌，從而改變流速、流向及作用力之分配。

因此，受海嘯影響之海堤設計，宜作如下考量:為保護其背後陸側設施，海側堤面最好採用垂直面或返波面，堤前保護工塊石或護基方塊或消波塊必須有足夠重量以抗回流作用力，而堤身結構必須足以承受衝擊力，及防止滑動或傾覆之重量或寬度，並假設海嘯時堤身整個淹沒在水下，而堤背側之保護工必須能承受越波之衝擊力，不致破裂或移動。



圖8. 2011日本大海嘯整座海堤淹沒  
(<http://zuly.zulyzami.com/zulyfiles/earthquakes/japan-tsunami.jpg>)



圖9. 2011日本大海嘯海堤破壞情形

(<http://cache4.asset-cache.net/gc/112135903-view-of-the-sea-wall-seriously-damaged-by-gettyimages.jpg?v=1&c=IWSAsset&k=2&d=1GnjDs01ae>)

### (三) 防波堤

根據2011日本大海嘯防波堤破壞調查，與一般承受颱風波浪防波堤最大的差異，還是因海嘯波長極長、高速水流及大量越波，長波導致防波堤海側水位高於港側水位，在此以合成式防波堤為例，水位差會增加堤身作用力。而高速水流會在拋石基礎產生滲透流，降低其承载力，造成堤身下陷甚至傾斜[6]。而大量越波亦會造成港側拋石基礎之沖刷，降低堤身對抗滑動及傾覆之能力。

海嘯作用在直立部堤身之作用壓力分佈示如圖10.

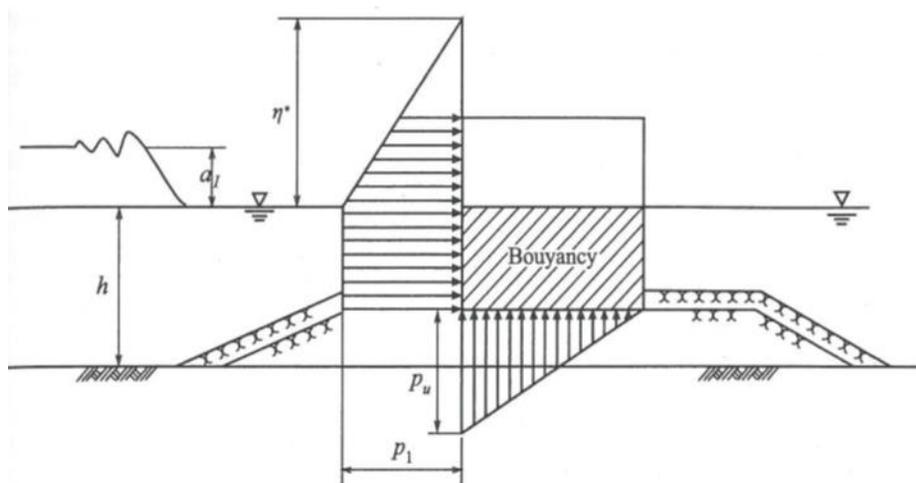


圖10. 作用在垂直面之波力[4]

圖中

$$\eta^* = 3.0a_1 \quad (4)$$

$$P_1 = 2.2 \rho_0 g a_1 \quad [\text{若是怒潮型(bore type)海嘯, 則2.2改為3.0。若近岸坡度平緩, 如1/200, 則會發生怒潮型海嘯}] \quad (5)$$

$$P_u = P_1 \quad (6)$$

式中

$\eta^*$ : 波壓作用在靜水位以上之高度(m)

$a_1$ : 入射海嘯高度(m)

$\rho_0 g$ : 海水單位重量( $\text{kN/m}^3$ )

$P_1$ : 作用在靜水位之波壓強度( $\text{kN/m}^2$ )

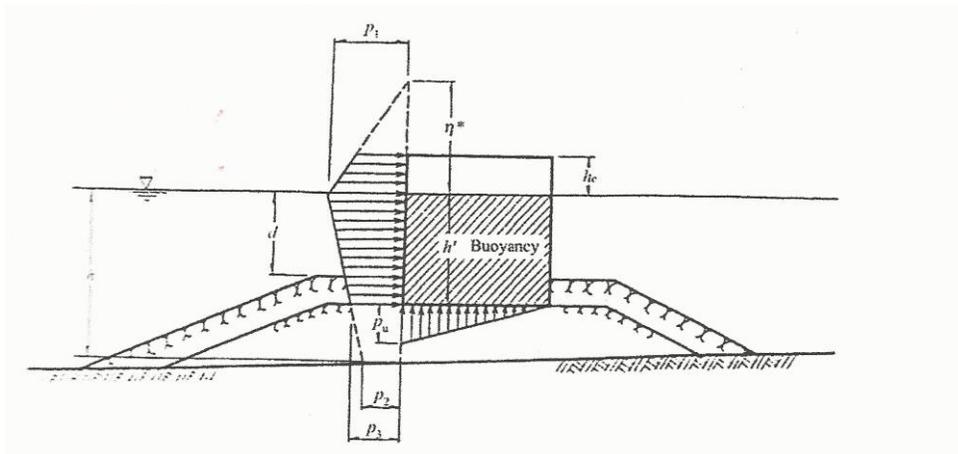
$P_u$ : 前緣腳趾之上揚壓力強度( $\text{kN/m}^2$ )

尚未發生碎波之海嘯波高為入射海嘯高之兩倍, 即

$$H_1 = 2a_1 \quad (7)$$

由圖10可發現海嘯波壓由靜水位至沉箱底為均勻分佈, 此乃因海嘯為長波。

#### 風浪波力與海嘯波力之比較例



如上圖所示, 假設:

合成式沉箱堤位於水深 $h=20\text{m}$ , 波浪週期 $T=20\text{sec}$ , 當量深海波高 $H_0'=16\text{m}$ , 海底坡度 $1/50$ , 波浪正射作用在防波堤。由上述條件可得在堤身位置之設計波高 $H_0=H_{\max}=18\text{m}$ , 而 $H_{1/3}=13.6\text{m}$ 。

沉箱高 $22\text{m}$ ,  $h'=17\text{m}$ ,  $h_c=5\text{m}$ , 拋石基礎上水深 $d=15\text{m}$ , 沉箱寬 $30\text{m}$ 。

按以上條件, 若以合田良實公式計算風浪作用在沉箱之總水平波力 $F_w=2,229\text{kN/m}$ , 上揚力 $F_{1w}=603\text{kN/m}$ 。

若把上述風浪的最大波高 $H_{\max}=18\text{m}$ 的一半假設為海嘯高出靜水位高度, 即 $a_1=9\text{m}$ , 則以上述式(4)、(5)、及(6)計算海嘯作用在沉箱之總水平

波力 $F_t=4,350\text{kN/m}$ ，上揚力 $F_{1t}=3,030\text{kN/m}$ 。

比較上述作用在沉箱之風浪波力與海嘯波力，可發現海嘯水平波力約風浪水平波力的2倍，上揚力則達5倍，可見海嘯之兇猛。

根據2011日本大海嘯合成式防波堤之破壞情形，以港側拋石基礎因大量越波沖刷導致沉箱滑動傾斜最嚴重[3]，如圖11所示。



圖11. 敦賀港防波堤沉箱滑動傾斜[3]

為防止大量越波沖刷港側之拋石基礎，加厚港側保護工及防止沖刷工，並調整胸牆型狀引開水流避免直接衝擊港側拋石基礎之例子，如圖12所示。

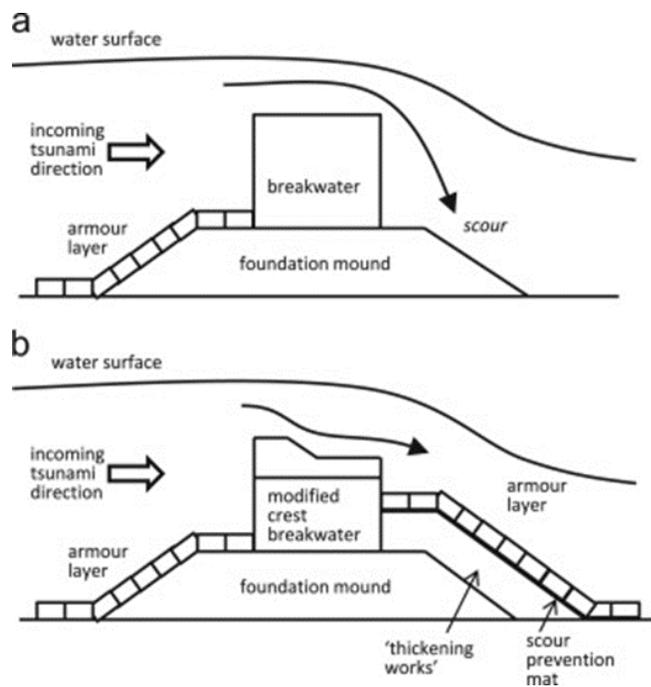


圖12. 沉箱合成堤港側加強保護工[5]

此外，設計時宜作下列考量：沉箱本體結構需能承受波壓作用，其抗滑動及傾斜之重量除按其波力檢核外，需以水工模型試驗驗證，而拋石基礎除上述加強港側保護工外，因沉箱滲透流導致拋石基礎承载力下降亦需作適當檢討。

#### 四、結語

本文先就海嘯與海岸工程有關之一些特性加以說明，然後就2004年南亞及2011年日本大海嘯就海岸結構物受破壞之情形，作一探討，以瞭解受海嘯影響之海岸結構物與抗颱風波浪海岸結構物反應之差異。並提出設計上之考量。

台灣除了核電廠之安全有把海嘯考慮進去，其它海岸及港灣工程則均未考慮，但就水利技師而言，值得從這兩次海嘯大災難中去瞭解海岸結構物受到海嘯影響的反應。

#### 五、參考文獻

1. Dalrymple R A, D. L. Kriebel. ( 2005) “Lessons in engineering from the tsunami in Thailand”, The Bridge, 35(2): pp. 4-13.
2. Hyndman D., Hyndman D., (2011), ”Natural Hazards and Disasters”, 3rd Edition, pp. 571.
3. Matsushita H.” Breakwater Reinforcement Method against Large Tsunami”.
4. .The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan (2009), ”Technical Standards and Commentaries for Port and Harbor Facilities”, pp. 998.
5. Raby A., Macabuag J., Pomonis A., Wilkison S., Rossetto T., (2015), “Implications of the 2011 Great East Japan Tsunami on sea defense design”, International Journal of Disaster Risk Reduction, pp. 332-346.
6. Takahashi H., Sassa S., Monkawa Y., Takano D., Maruyama K. (2014) ”Stability of caisson-type breakwater foundation under tsunami-induced seepage”, Soils and Foundationspp. 789-805.

投稿 105.05.12  
校稿 105.05.23  
定稿 104.05.24