

吸收式造波機開發

徐仕昇¹ 高家俊²

摘要

本文結合造波機理論與水位即時回授控制技術，完成吸收式造波控制系統研發與實驗室測試。本文以試驗證實本系統可以在水槽中控制造波機產生使用者設定條件的目標前進波，同時吸收從水槽末端反射回傳的反射波能量，避免波浪產生多次反射波造成水槽中波高不穩定的放大或縮小，並使水槽水面在造波完成後迅速回歸平靜，提高實驗的精度與效率。

Development of Absorbing Wave Maker System

Shih-Sheng Hsu Chia-Chuen Kao

ABSTRACT

To eliminate the unwanted reflected waves, an automatic feed back system has been setup on the wave maker, so that it can absorb reflected waves at the meanwhile generate the target incident wave train. Series of laboratory tests have been carried out to examine the effectiveness of the system. For each wave condition, wave trains both with and without absorbing system is generated for comparison. For the regular wave tests, the wave train without absorbing reflective energy, the wave height is unstable during the wave generation. For the wave train with absorbing system, the wave height is very stable. For the irregular wave tests without absorbing system, the spectral shape of both incident wave and reflective wave distort from the target spectrum significant. On the contrary, the measured spectra for the test with absorbing system concerted with the target spectrum quilt well

一、前言

產生穩定的波列是波浪實驗研究最重要的需求之一。為了消除反射波，通常可利用裝在水槽末端的消波裝置來消除實驗不要的反射波。但是對於許多波浪與結構物交互作用等實驗研究，上述方法並不適用。為了解決反射波在造波板上產生二次反射現象，而造成水槽波浪失控而不穩定的問題，以往學者提出許多方法，例如在造波板前裝置多孔陣列或修正造波板運動來消除反射波能量。修正造波板運動來消除反射波能量研究方面，Milgram (1970) 在水槽末端建立波能吸收運動邊界；Shimada et al.

(1991) 發展出推拉式 (Piston Type) 吸收式造波系統，然而該系統忽略了造波板反射係數影響，對於造波機系統尤其是直擺式 (flap type) 造波機系統，該項因素是不可忽視的，本文考慮這項因素加以改善，發展一套吸收式造波機系統，並完成一系列測試實驗，證實本文所發展的吸收式造波機系統效率結果相當令人滿意。

二、理論基礎

規則波造波時，造波板以固定振幅及固定週期做簡諧運動，其運動位移函數 X 可以表示成(1)式如下：

$$X = a_p \sin(\omega t) \quad (1)$$

1. 財團法人工業技術研究院能源與資源研究所研究員
2. 國立成功大學水利及海洋工程學系教授

其中 X 表示靜水面上造波板相對於其運動中心之位移， a_p 為造波板運動之振幅， ω 為週率 ($= 2\pi/T$; T 為週期)， t 為時間。

根據線性造波理論假設水槽中的水為不可壓縮、非黏滯性流體，波浪流場為非旋流。配合自由水面、底床邊界、造波板邊界以及輻射邊界等條件，可以導出靜水面造波板運動中心位置的水位函數 η 如下：

$$\eta = \eta_p + \eta_{pd} = C_0 a_p \cos(\omega t) + \sum_{n=1}^{\infty} C_n a_p \sin(k_n x) \quad (2)$$

其中 η_p 為前進波 (progression wave)， η_{pd} 為震盪波 (standing wave)。 C_0 和 C_n 分別為前進波振幅和震盪波振幅分量與造波板運動之振幅比值。當造波板運動為推拉式 (piston type) 時可以表示成下列 (3) 和 (4) 式，當造波板運動為直擺式 (flap type) 時可以表示成下列 (5) 和 (6) 式，如下：

$$C_0 = \frac{4 \sinh 2kh}{2kh + \sinh 2kh} \quad (3)$$

$$C_n = \frac{4 \sin 2k_n h}{2k_n h + \sin 2k_n h} \quad (4)$$

$$C_0 = 4 \left(\frac{\sinh kh}{kh} \right) \frac{kh \sinh kh - \cosh kh + 1}{\sinh 2kh + 2kh} \quad (5)$$

$$C_n = 4 \left(\frac{\sin k_n h}{k_n h} \right) \frac{k_n h \sin k_n h - \cos k_n h + 1}{\sin 2k_n h + 2k_n h} \quad (6)$$

其中 k 為前進波週波數 ($= 2\pi/L$; L : 波長)， k_n 為震盪波週波數， h 為水深。 ω 、 k 和 k_n 滿足下列分散關係式 (dispersion relationship)：

$$\omega^2 = kg \tanh kh = -k_n g \tan k_n h \quad (7)$$

其中 g 為重力加速度
為消除反射波，須控制造波板運動之位移函數 X 如下式：

$$X = X_p + X_i = a_p \sin(\omega t) + a_i \sin(\omega t + \delta_r) \quad (8)$$

其中 $X_p = a_p \sin(\omega t)$ 表示為產生目標前進波造波板運動之位移分量， $X_i = a_i \sin(\omega t + \delta_r)$ 則表示為消除反射波造波板運動之位移分量， a_i 為 X_i 之振幅， δ_r 為反射波與前進波之位相差。

靜水面造波板運動中心位置量測的水位函數應如下式：

$$\eta_m = \eta_p + \eta_{pd} + \eta_i + \eta_{id} + \eta_r + \eta_{rr} \quad (9)$$

其中各分量水位函數如下：

$\eta_i (= C_0 a_i \cos(\omega t + \delta_i))$ 是由 X_i 產生之前進波

$\eta_{id} (= \sum_{n=1}^{\infty} C_n a_i \cos(\omega t + \delta_i))$ 是由 X_i 產生之震盪波

$\eta_r (= C_0 a_r \cos(\omega t + \delta_r))$ 是由水槽末端或試驗結構物回傳之反射波

$\eta_{rr} (= C_0 a_{rr} \cos(\omega t + \delta_{rr}))$ 是 η_r 在造波板再反射之二次反射波

為了消除反射波，式(9)之各水位分量必須滿足下式：

$$\eta_i = -\eta_{rr} = -k_{rr} \eta_r \quad (10)$$

其中 k_{rr} 為造波板再反射之二次反射係數

因此造波板運動速度函數 $u(t)$ 可以表示成下式：

$$u(t) = \frac{dX}{dt} = a_p \omega \cos(\omega t) + a_i \omega \cos(\omega t + \delta_i) \quad (11)$$

從式(9)、(10)及(11)可以導出造波板運動另一種形式的速度函數，如下：

$$u(t) = \frac{\omega}{C_0} \left\{ \eta_p(t) - k_{rr} \left[\eta_m(t) - \eta_p(t) - \sum_{n=1}^{\infty} C_n X(t) \right] \right\} \quad (12)$$

式(12)就是吸收式造波機核心的控制式，當水深、週期、波高等造波條件已決定，配合造波板位移和造波板運動中點之水位資料即時回饋及適當的二次反射係數估計值，便可以以式(12)得出造波板運動之速度控制訊號。實務上本文將式(12)修正成式(13)形式，應用在實際造波控制上。

$$u(t) = G_p \eta_p(t) + G_m \eta_m(t) + G_X X(t) \quad (13)$$

其中 G_p 、 G_m 和 G_X 分別為目標前進波、實測水位與造波板位移的增益函數，他們可以表示成下列型式函數：

$$G_p = \frac{\omega}{C_0}(1+k_{rr}) \quad (14)$$

$$G_m = \frac{-\omega \cdot k_{rr}}{C_0} \quad (15)$$

$$G_X = \frac{\omega}{C_0}(k_{rr} \sum_{n=1}^{\infty} C_n) \quad (16)$$

式(13)可直接應用於規則波造波控制上，然而對於不規則波造波應用上仍有一些問題待克服，就是不規則波可視為由無窮多組規則波線性疊加而成，對於各成分波都有其振幅、週期與相位，即使在水深固定的條件下，式(13)中的 G_p 、 G_m 和 G_X 並非常數而是各成分波週率 ω 的函數，因此很難直接使用來做不規則波之造波控制。為了使不規則波之造波控制實際可行，本文將目標前進波分割成有限個規則成分波，其個別水位以 η_{pm} ($m=0, 1, 2, \dots$)表示，其個別週率以 ω_m ($m=0, 1, 2, \dots$)表示，其個別前進波振幅和震盪波振幅分量與造波板運動之振幅比值以 C_{0m} 、 C_{nm} ($m=0, 1, 2, \dots$)表示。再以下列式(17)~(19)來將式(13)中的 G_p 、 G_m 和 G_X 估計為常數。

$$G_p = [(1+k_{rr}) \sum_{m=0}^{\infty} \eta_{pm} \frac{\omega_m}{C_{0m}}] / \sum_{m=0}^{\infty} \eta_{pm} \quad (17)$$

$$G_m = [k_{rr} \sum_{m=0}^{\infty} \eta_{pm} \frac{\omega_m}{C_{0m}}] / \sum_{m=0}^{\infty} \eta_{pm} \quad (18)$$

$$G_X = [k_{rr} \sum_{m=0}^{\infty} \eta_{pm} \frac{\omega_m}{C_{0m}} \sum_{n=1}^{\infty} C_{nm}] / \sum_{m=0}^{\infty} \eta_{pm} \quad (19)$$

式(17)~(19)就是基於目標水位頻譜主頻附近波浪特性最能代表不規則波整體特性，和兼顧其他高、低頻成分波特性兩個因素下，利用目標水位頻譜的形狀函數(shape function)作為估計參數的權重函數(weighting function)，將原來是各成分波週率函數的 G_p 、 G_m 和 G_X 估計成常數，以實現吸收式不規則波造波控制。

三、試驗結果及討論

本文在國立成功大學水利系風洞水槽完成了一系列的試驗，來驗證所開發的吸收式造波系統的效率，同時比較相同造波條件下，傳統無吸收功能造波方式與本文發展的吸收式造波方式產生的波

列。試驗水槽佈置方式如圖 1 所示，造波機為伺服油壓驅動的直擺式系統，驅動器內建位置回授 PID 自動控制器，可接受位置訊號控制，並且可以輸出位置訊號給造波機控制系統。造波板上安裝一支容量式波高計，量測造波板上的水位變化，以回授造波機控制系統水位資料。在水槽中造波板運動中心前方 14 公尺處裝置垂直反射面，來產生最顯著的反射波。在水槽中造波板運動中心前方 9.00、9.13 和 9.50 公尺處分別安裝容量式波高計，以量測水槽中的波浪。造波機控制系統硬體是由一部個人電腦配合類數位轉換器組成，可以接受造波機驅動器回授的造波板位置訊號及造波板上的水位變化資料，並且可以依據設定的造波參數配合上述兩項即時資料，即時運算出造波板位移控制訊號來控制造波板運動。水槽中間的三支波高計資料也可由此系統蒐集後以 Mansard & Funke (1980) 提出之三波高計法來分離入、反射波能量。

以 75 公分水深產生 100 個設定波高為 7 公分週期 1.5 秒的規則波比較試驗結果為例(如圖 2 和圖 3 所示)，圖 2 展現的是無吸收功能造波方式所產生的波列，在造波期間(前 150 秒)其波高因為重複反射效應使得波高產生不穩定現象，造波完成後造波板靜止，水槽中的水位因為保留許多反射波能量，回復平靜所需的時間很長，經過 100 秒之後水位仍然相當不穩定。圖 3 展現的則是吸收功能造波方式所產生的波列，從造波機開始造波開始，波浪經過兩倍水槽長度傳遞後，由於水位包括前進波與反射波能量，實測資料顯示的波高與設定的目標波高不一致。在造波期間一面產生目標前進波一方面即時修正造波板運動來消除反射波，其波高因為消除重複反射效應使得波高穩定，造波完成後造波板以靜止目標水位持續運動，來吸收水槽中保留的反射波能量，結果顯示經過 25 秒之後水位即回復平靜。

不規則造波試驗實例如圖 4~圖 8 所示，圖 4 為目標波譜，不規則造波的目標水位時序列是將此目標波譜經過快速傅利葉轉換法(FFT Method)得到。本試驗例水深為 75 公分，造波時間為 102.4 秒，針對相同不規則造波條件，分別使用無吸收式及本文之吸收式造波方法產生波浪，同時接收水槽中央三支波高計的同步訊號，分離入射波以及反射波譜做比較。結果顯示無吸收式造波方法產生的波

浪，由於受多重反射波干擾，其入、反射波譜都明顯地偏離目標波譜，波譜尖峰頻率附近部分呈現分散雜亂且總能量大於目標波譜許多的現象(如圖 5、圖 6 所示)；而吸收式造波方法產生的波浪，由於不受多重反射波干擾，其入射波譜相當吻合目標波譜，尤其波譜尖峰頻率附近部分呈現集中而無分散雜亂的現象(如圖 7 所示)。反射波譜形狀與入射波譜很接近。此現象證實水槽中水位變化單純受到來自於水槽末端反射係數接近 1 之直立壁產生的反射波影響，而無其他多重反射波的影響，因此入、反射波譜之形狀非常接近目標波譜(如圖 8 所示)。

四、結論

本文利用水位即時回授法，完成吸收式造波機控制系統，來消除實驗不需要的造波板反射波，避免多重反射波影響實驗精度，經過一系列的效率試驗測試，結果顯示本系統可以提高實驗的效率與精度。

在不規則吸收式造波應用方面，目標波譜的形狀函數可以用來作為參數估計的權函數，將原需要在頻域計算的控制參數化作常數，以應用在時域實現即時控制的目的。

參考文獻

1. J. H. Milgram (1970) "Active water-wave absorbers," *J. Fluid Mech.*, Vol. 42, Part, pp. 845 - 859.
2. E. P. D. Mansard and E. R. Funke (1980) "The measurement of incident and reflected spectra using a least squares method," *Proc. 17th Coastal Engineering Conf.* pp. 154 - 172.
3. H. Shimada, K. Muko, K. Muko and M. Inoue (1991) "Development and test of new absorbing wave generator system," *Technics of Engineering*, Vol. 10, No.1, pp. 67 - 75.

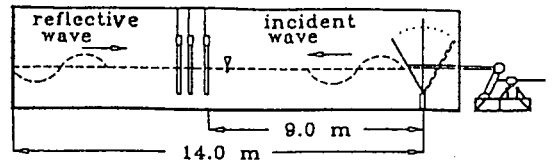


圖 1 試驗佈置

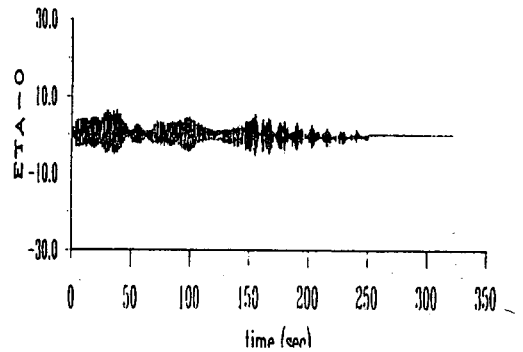


圖 2 無吸收式規則造波之波列

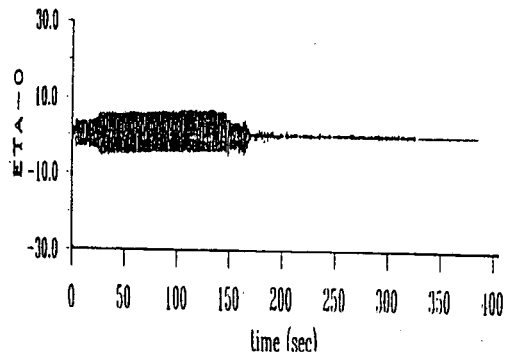


圖 3 吸收式規則造波之波列

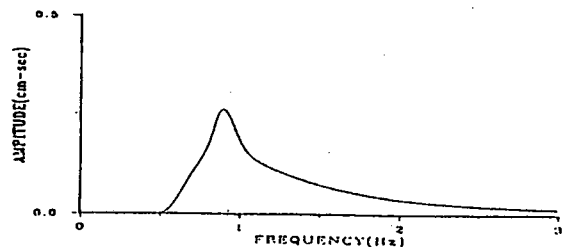


圖 4 目標入射波譜

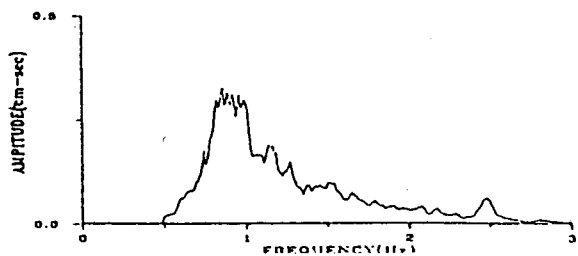


圖 5 無吸收式造波入射波譜

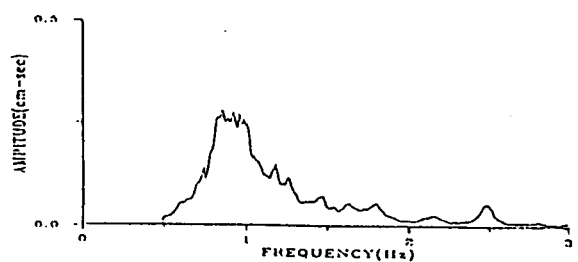


圖 6 無吸收式造波反射波譜

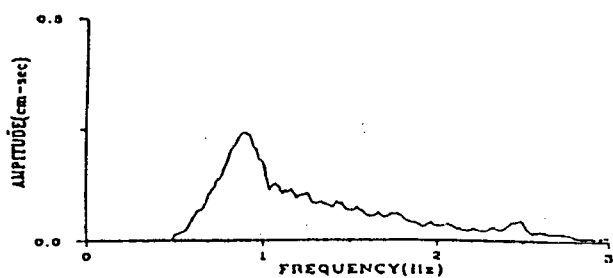


圖 7 吸收式造波入射波譜

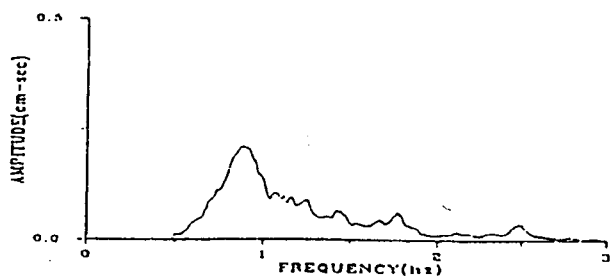


圖 8 吸收式造波反射波譜