

津波の造波に関する研究

豊橋技術科学大学建設工学課程 学生会員 ○Dinh Van Vinh
豊橋技術科学大学建築・都市システム学系 正会員 青木 伸一

1. はじめに

2011年3月11日に東北地方太平洋沖地震に伴う巨大津波は、沿岸の広い範囲に襲来し、堤防が多く破壊された。堤防の破壊は、壊滅的な被害をもたらしており、設計津波に対して、安定であるだけでなく、想定を越える津波に対しても軽減機能を発揮するような堤防の設計法を確立することが必要である。そのためには、より詳細な模型実験を行い、津波による堤防に作用する波力、堤防の壊れ方等を研究する必要がある。

本研究では、様々なパターンの津波を発生させ、堤防にどのような力が作用するのかを実験できるように、任意波形の津波を起こすことができる手法を確立することを目的としている。線形造波理論を用い、任意波形の波を発生させるための造波信号を作成し、その実験水路での検証を実施した。

2. 造波理論

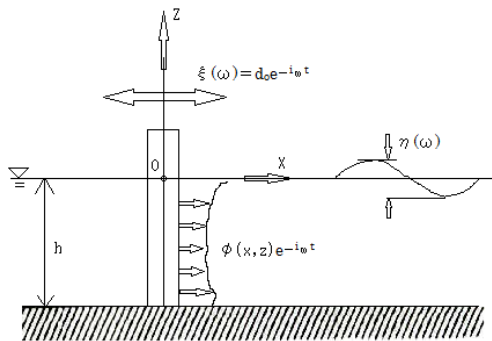


図 1：線形造波理論

図 1 に示すように、造波板はピストンタイプで上から下まで一様に $\xi(\omega) = d_0 e^{-i\omega t}$ で表されるような往復運動を行うものとする。

流体は、静止の状態からこの造波板の運動によって波を発生する。この流体の運動は、速度ポテンシャル Φ を持つ。

$$\Phi = \phi(x, z) e^{-i\omega t} \quad (1)$$

$$\phi(x, z) = A \cosh[k(z+h)] e^{ikx} e^{-i\omega t} \quad (2)$$

$$\omega^2 = gk \tanh(kh) \quad (3)$$

$$A = \frac{-4\omega}{\sinh(2kh) + 2kh} \int_{-h}^0 d_0 \cosh[k(z+x)] dz \quad (4)$$

ここでは、造波境界値問題を線形問題として取り扱う。進行波の水位変動 $\eta(\omega)$ は、次式で与えられる。

$$\eta(\omega) = -\frac{1}{g} \left. \frac{\partial [\phi(x, z) e^{-i\omega t}]}{\partial t} \right|_{z=0} \quad (5)$$

上記の各式から、水位変動の造波板変位に対する周波数応答関数 $H(\omega)$ を導くことができる。

$$H(\omega) = \frac{-4i \sinh^2(kh)}{\sinh(2kh) + 2kh} e^{ikx} \quad (6)$$

周波数応答関数 $H(\omega)$ を逆フーリエ変換すれば、インパルス応答関数 $h(t)$ になる。

$$h(t) = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty \{f(k) \sin(kx - \omega t)\} d\omega \quad (7)$$

$$\text{ここに、} f(k) = \frac{4 \sinh^2(kh)}{\sinh(2kh) + 2kh} \text{である。} \quad (8)$$

造波板の運動を $\xi(t)$ とすると、 $\xi(t)$ に対する出力である波運動 $\eta(t)$ は、インパルス応答関数 $h(t)$ により畳み込み積分で次式のように決定できる。

$$\eta(t) = \int_{-\infty}^\infty h(\tau) \xi(t - \tau) d\tau \quad (9)$$

両辺をフーリエ変換すると、

$$E(\omega) = G(\omega) H(\omega) \Rightarrow G(\omega) = \frac{E(\omega)}{H(\omega)}$$

ここに、 $E(\omega)$ ：波運動 $\eta(t)$ のフーリエ変換

$G(\omega)$ ：造波板の運動 $\xi(t)$ のフーリエ変換

$H(\omega)$ ：周波数応答関数

上式より、 $G(\omega)$ を逆フーリエ変換すれば、造波板の運動 $\xi(t)$ になる。

$$\xi(t) = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty \left\{ \frac{\text{Er}(\omega)}{f(k)} \sin(kx + \omega t) + \frac{\text{Ei}(\omega)}{f(k)} \cos(kx + \omega t) \right\} d\omega \quad \dots \quad (10)$$

ここに、 $\text{Er}(\omega)$ 、 $\text{Ei}(\omega)$ ： $E(\omega)$ の実部、虚部である。

3. 実験方法

上述した「線形造波理論」を用いて実験水槽内の任意の点で任意の波形を起こせるような波信号を

作成した。作成したデジタル信号は、NF 社の「Wave Factory マルチファンクションジェネレータ WF1973」に転送し、波形を入力した。この波形よりアナログ信号を出力し、造波機に転送することにより、波を発生させる。

実験は、幅 0.6m の 2 次水路で行った。水深は 0.5m であり、波形の計測は、造波板から 6m の地点で行った。

4. 数値計算値と実験値の比較

波形として (i) 双峰型、(ii) 集中型の 2 種類について検討した。

(i) 双峰型：

双峰型の波形として、波運動 $\eta(t)$ を以下の式で与える。

$$\eta(t) = 4\sin(t) + 0.5\sin(2t) + 2\sin(3t) + \sin(4t) \quad (11)$$

図 2 は、造波機への入力信号を、図 3 は水面波形の計算値（目標値）と実験値を比較して示したものである。反射波の影響のない第 1 波目はほぼ目標値が再現されている。

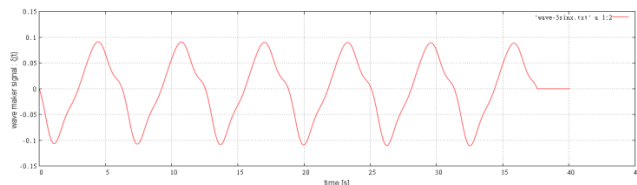


図 2：双峰型波形に対する入力信号

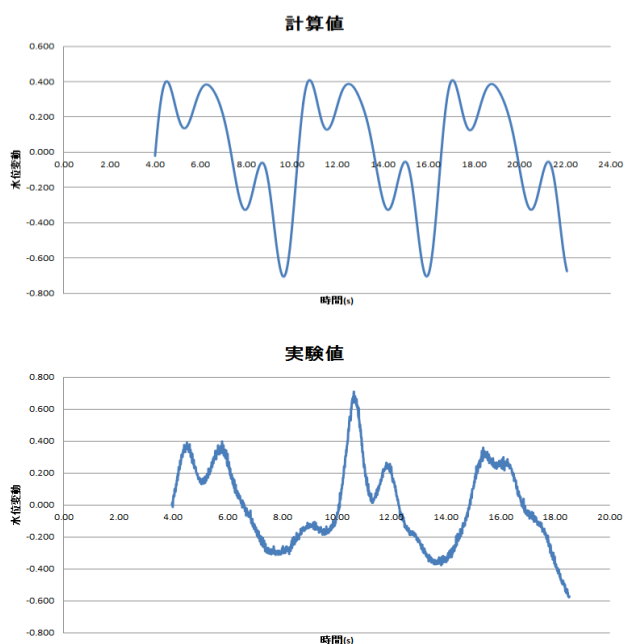


図 3：双峰型波形の計算値と実験値の比較

(ii) 集中形：

次に、波形 $\eta(t)$ をデルタ関数 $\delta(t)$ として与える。図 2, 3 と同様に、図 4, 5 は造波機への入力信号および水面波形の計算値（目標値）と実験値である。これより、水路内任意点で集中波を発生させることができることを確認した。

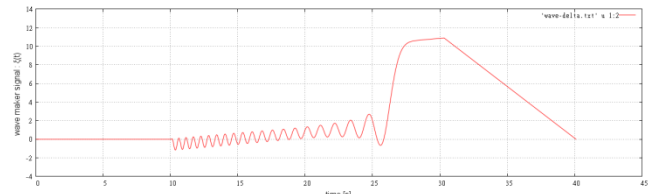


図 4：集中型波形に対する入力信号

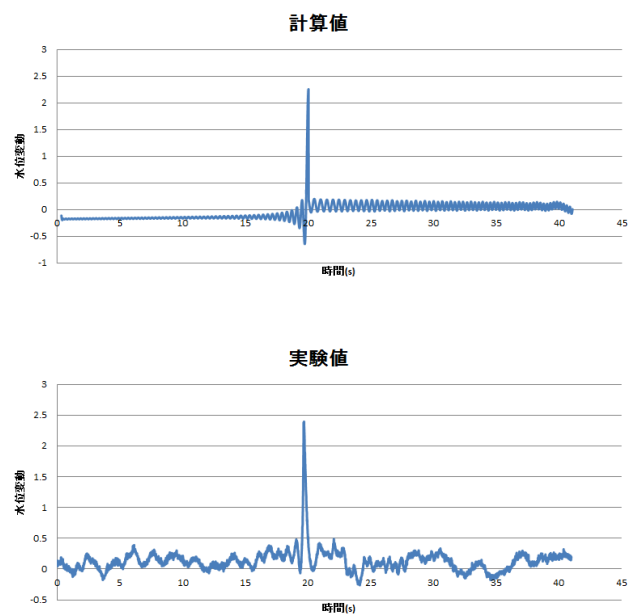


図 5：集中型波形の計算値と実験値の比較

5. 結論

特定の地点で目標とする波形をもつ波を発生させる方法を開発した。問題点としては、次のようなことが挙げられる。

- ・信号を造波機に転送する際若干遅延応答が起きる。
- ・有限長の水路で反射波が生じることにより、水面波形に影響が出る。

【参考文献】

1) Robert George Dean, Robert A. Dalrymple : Water wave mechanics for engineers and scientists, 1991, Chapter 6 : Wavemaker theory, p.170-185.