

大型平面水槽における波群に拘束された 長周期波の造波制御システムの導入

WAVE CONTROL SYSTEM ON BOUNDED LONG WAVE IN LABORATORY

加島寛章¹・平山克也²
Hiroaki KASHIMA, Katsuya HIRAYAMA

¹正会員 修(工) (独) 港湾空港技術研究所 海洋・水工部 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

²正会員 博(工) (独) 港湾空港技術研究所 海洋・水工部 (同上)

During the generation of wave train in a laboratory, two kinds of long waves are generated by a wave paddle. One is a bounded long wave belonging to the wave train and the other is a free long wave to comply the second-order water particle motion. It is very difficult to estimate the bounded long wave as approximately distinguished from the free long wave induced by the piston-type wave paddle motion.

In this study, first, the numerical simulations are conducted to clarify the applicability of the theory to control the free long wave induced by the wave paddle motion. Second, the bounded long waves in a regular or an irregular wave train are generated in large size basin with controlling the free long waves. Their validities are verified with comparing the measured wave profiles to the theoretical them.

Key Words : Bounded long wave, free long wave, Boussinesq model, wave control system

1. はじめに

2008年2月に富山県入善漁港海岸で発生した越波浸水災害では, 岸沖断面勾配が沿岸方向に急変する地形特性を有する海岸において, 波群を有する周期の長いうねりとこれに付随する長周期変動成分が重畳したことが, ある特定の海岸への波の集中を助長させ, 被害をより甚大化させた可能性があることが指摘されている¹⁾.

一方, 入善漁港海岸のような実地形を対象とした模型実験によってこれらを検証するためには, 少なくとも水深100m程度となる沖合までの地形を模型縮尺1/100程度で再現可能な大規模な平面水槽の活用が不可欠となる. しかしながら, 水槽実験において, 通常の造波方法で波群を造波する場合には, 造波板で再現できない水粒子運動の鉛直分布の誤差を補うように, 周期の長い自由波(以下では, 自由長波と表記する.)が発生するため, 波群に拘束された長周期波(以下では, 拘束長周期波と表記する.)を正確に再現することが困難となっている.

造波板の運動により発生するこのような自由長波を制御する取組みは, 国内では1990年代を中心として, 既に精力的に実施されている. このうち, ピストン型やフラップ型造波装置に対しては, 池野・田中²⁾, 筧田・水口³⁾などの研究がある. さらに, 非

線形領域の不規則波に対しても実用上十分な反射波吸収効果が期待できる, 鉛直振動流方式の造波装置(合田⁴⁾)に対しては, 大山他⁵⁾の研究がある. しかし, これらは造波水路を対象としたものであるため, 実海域における拘束長周期波の影響を考慮した模型実験を実施するためには, 自由長波に対するこれらの制御手法を平面水槽に導入する必要がある.

そこで本研究では, 多方向波に対しSand⁶⁾により提案された造波板運動により生じる自由長波の制御法の妥当性を数値計算により確認するとともに, 大型平面水槽内のサーペント型造波装置にこれを導入し, この制御法の性能について検討を行った. ただし, 装置で造波可能な成分波数等の制約により, 本報告においては, 一方向波の造波に限って検討した.

2. 造波板運動により生じる自由長波の制御

以下では, Sand⁶⁾による自由長波の発生理論について概説するとともに, 本研究における自由長波の制御の考え方, および自由長波と波群に伴う拘束長周期波の関係について述べる.

(1) 自由長波の発生理論とその制御

ピストン型造波装置で波群を造波したとき, 造波すべき目標波(=波群を有する基本波)とそれに伴

う拘束長周期波のみでは造波板での境界条件を満足できないため、これを補うように、2 次オーダーの自由長波が発生する。このとき、これに寄与する造波板変位は式 (1) ～ (5) のように与えられる。

$$X^{(2)}(t) = \sum_{n=m=1}^{\infty} \sum_{m=m^*}^{\infty} X_{nm}^{(2)}(t) \quad (1)$$

$$X_{nm}^{(2)}(t) = [(a_n b_m - a_m b_n)F_1 + (a_n a_m + b_n b_m)F_{23}] \cos \Delta \omega_{nm} t \\ + [(a_n a_m + b_n b_m)F_1 + (a_m b_n - a_n b_m)F_{23}] \sin \Delta \omega_{nm} t \quad (2)$$

$$a_n = A_n \cos \omega_n t, \quad b_n = A_n \sin \omega_n t \quad (3)$$

$$\eta_n = A_n \cos(\omega_n t + \varepsilon_n) \quad (4)$$

$$m^* = f^* / f_0 \quad (5)$$

ここで、 a_n 、 b_n 、 ε_n 、 $\Delta \omega_{nm}$ はそれぞれ第 n 成分波の振幅 A_n の cosine 成分と sine 成分、初期位相、各成分波の角周波数の差 ($= 2\pi(f_n - f_m)$) であり、 f_0 は基本周波数 ($= 1/T$ 、 T は解析時間)、 f^* は造波すべき目標波の低周波数側の限界周波数である。また、 F_1 および F_{23} は、造波水深、基本周波数および振幅に依存する関数であり、ともに、造波板運動により発生する自由長波の応答関数を含んでいる。紙面の都合上、これらの記述は割愛するが、その内容は Sand⁶⁾ や Barthel et al.⁷⁾ に詳しい。

したがって、ピストン型造波装置で波群を造波する際に、造波板の運動による自由長波の発生を抑制するためには、波群を造波するための造波板変位に、式 (1) と逆位相の造波板変位を重ね合わせればよい。

(2) 自由長波制御の精度検証の方法

上述した自由長波は波群の造波時に発生するが、造波された波群には拘束長周期波が含まれるため、例えば、実験水槽内で計測される水面波形のうち長周期波成分には、これらが混在して観察されることになる。一方、式 (1) と逆位相の造波板変位を用いて自由長波が適切に制御された場合には、波群に伴う拘束長周期波のみが観察されるはずである。

そこで本研究では、波群造波に伴う「造波板変位により発生する自由長波を適切に制御する問題」を、「拘束長周期波を実験水槽内に精度よく再現する問題」に置き換え、自由長波制御の精度検証を実施した。すなわち、波群を造波して得られる水位変動の長周期変動成分と、理論的に推定される拘束長周期波とを比較することにより、自由長波の制御が正しく行われているかを確認する。なお、波群に伴う拘束長周期波の波形 $\xi(x, y, t)$ は、式 (6) ～ (13) のように与えられる⁸⁾。ここで、 h は水深、 g は重力加速度、 f_n 、 k_n 、 θ_n は第 n 成分波の周波数、波数、波向角度であり、矢印はベクトル量であることを示す。

$$\xi(x, y, t) = \sum_{n=m=1}^{\infty} \sum_{m=m^*}^{\infty} \xi_{nm}(x, y, t) \quad (6)$$

$$\xi_{nm}(x, y, t) = a_n a_m G_{\eta\xi} \cos[\Delta \omega_{nm} t - \Delta \vec{k}_{nm} \cdot (x, y)] \\ + b_n b_m G_{\eta\xi} \cos[\Delta \omega_{nm} t - \Delta \vec{k}_{nm} \cdot (x, y)] \\ + a_n b_n G_{\eta\xi} \sin[\Delta \omega_{nm} t - \Delta \vec{k}_{nm} \cdot (x, y)] \\ - a_n b_m G_{\eta\xi} \sin[\Delta \omega_{nm} t - \Delta \vec{k}_{nm} \cdot (x, y)] \quad (7)$$

$$G_{\eta\xi} = \frac{1}{2h} \left[\frac{G' h^2 - k_n k_m h^2 \cos \Delta \theta_{nm} - 16\pi^4 D_m^2 D_n^2}{4\pi^2 D_n D_m} \right. \\ \left. + 4\pi^2 (D_n^2 + D_m^2) \right] \quad (8)$$

$$G' h^2 = \{(D_n - D_m) \\ \times [D_m (k_n^2 h^2 - 16\pi^4 D_n^4) - D_n (k_m^2 h^2 - 16\pi^4 D_m^4)] \\ + 2(D_n - D_m)^2 [k_n k_m h^2 \cos \Delta \theta_{nm} + 16\pi^4 D_n^2 D_m^2]\} \\ / \{(D_n - D_m)^2 - K^- h / 4\pi^2\} \quad (9)$$

$$K^- h = |\vec{k}_n - \vec{k}_m| h \tanh(|\vec{k}_n - \vec{k}_m| h) \quad (10)$$

$$D_n = \sqrt{h/g} f_n \quad (11)$$

$$\Delta \vec{k}_{nm} = \vec{k}_n - \vec{k}_m \quad (12)$$

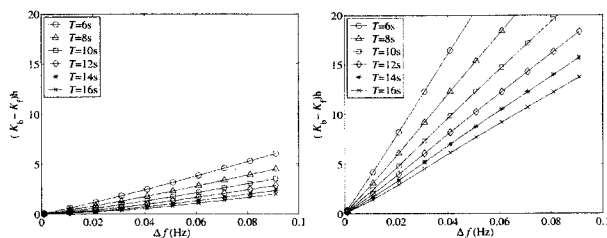
$$\Delta \theta_{nm} = \theta_n - \theta_m \quad (13)$$

(3) 自由長波と拘束長周期波の関係

このように、造波板運動により生じる自由長波や波群の伝播に伴う拘束長周期波は、いずれも造波すべき目標波を構成する各成分波の 2 次干渉により生成され、その周波数は各成分波間の周波数の差に等しい。しかしながら、自由長波の波数は分散関係式に従うのに対し、拘束長周期波のそれは各成分波に依存するため、目標波の代表周波数や各成分波間の周波数差および造波水深により、これらの長周期波の振幅や伝播特性が異なる。そこで、ここでは、これらの関係について、最も基本的な波群特性を有する 2 成分合成波を対象に述べ、自由長波が水面の長周期変動に与える影響について考察する。

図-1 に示すのは、2 成分合成波を構成する 2 つの成分波の周波数差 Δf (=自由長波および拘束長周期波の周波数) と、自由長波と拘束長周期波の波数差の関係である。ここで、図の縦軸は自由長波の波数 K_f と拘束長周期波の波数 K_b の差を造波水深で無次元化した値であり、これは自由長波と拘束長周期波の空間的な位相のずれの程度を表わしている。また、図の凡例は、2 成分合成波の代表周期である。

図より、造波水深が 50m の場合では、2 成分合成波の成分波間の周波数差が大きくなるほど、あるいは、伝播する波浪の代表周期が短くなるほど、自由長波と拘束長周期波の位相のずれが大きくなることわかる。さらに、造波水深が 300m の場合では、この傾向がより顕著に表れており、造波水深が深いほど、両者の位相のずれが大きい。つまり、これらとは逆に、浅い水深で造波された、周期が長くスペクトル尖鋭度の高い波群性うねりでは、伝播に伴い生じる両者の位相のずれは小さいことになる。したがって、このような波浪を対象とした数値計算や模



(a) 造波水深：50m (b) 造波水深：300m

図-1 自由長波および拘束長周期波における周波数（＝各成分波の周波数差）の波数差の関係

型実験で算定または計測される水位変動の長周期変動成分について、その見かけ上の振幅は、伝播に伴い、自由長波と拘束長周期波との位相関係の変化に応じて、空間的にゆっくり変動すると考えられる。

3. ブシネスクモデルを用いた自由長波の制御法の検証

造波板運動により生じる自由長波の制御法の妥当性について、平山⁹⁾による弱非線形・弱分散性ブシネスク方程式を基礎式とする数値計算により検証を行った。この計算手法では、2次オーダーまでの非線形干渉を考慮できることに加え、代表水深における水平方向流速を用いた造波方法を採用しているため、波群を造波した際には、ピストン型造波板を有する造波装置と同様に、水面の不連続を補填するような自由長波が合わせて造波されると考えられる。

(1) 計算概要

ここでは、非常に長い一様水路（水深 0.6m）を伝播する波群を数値的に造波し、各算定地点で得られた短周期波の水位変動（＝波群）から推定される拘束長周期波の造波精度を検証した。

検証計算で用いた入射波は、2成分合成波と一方向不規則波の2種類とした（表-1）。ここで、2成分合成波を構成する各成分波は、周波数 0.35Hz（周期 2.86s）、振幅 2.0cm、初期位相 0deg の第一成分波と、周波数がこれよりも 0.05Hz 高い同振幅・同初期位相の第2成分波（周期 2.50s）とした。また、長周期うねりを想定した一方向不規則波の諸元は、JONSWAP 型スペクトル（尖鋭度： $\gamma=10$ ）に従う有義波周期 2.86s、有義波高 2.0cm とし、これを造波するための成分波数は 30 とした。

計算領域は、波群の伝播・変形過程において拘束長周期波の拘束が解放されないように、波群の伝播方向に十分長く設定するとともに（約 $450\text{m} \approx 68L$ 、

L は第1成分波の周期に対応する波長で約 6.6m）、その沖側および岸側にはエネルギー吸収帯を設定して無反射境界とし、かつ波高を十分小さく設定して非砕波条件とした。また、拘束長周期波の造波精度を確認するため、造波境界を原点にとり、波群の伝播方向に等間隔に設置した合計 21 地点において水位変動を出力した。なお、サンプリング時間間隔は 0.1s、解析データ数は 2048 個（=204.8s）とした。

(2) 自由長波制御の妥当性の検証

結果の一例として、図-2 には、2成分合成波を造波したときに各地点で算定される水面の長周期変動（実線）、水面の短周期変動（＝波群）から推定される拘束長周期波（破線）および自由長波（点線）を比較した結果を示す。ただし自由長波は、算定された水位変動の長周期変動成分から、同じくその地点で算定された波群を用いて理論的に推定された拘束長周期波を差し引いて算出した。なお、図-2 (a) は、造波境界で造波した基本波の波形である。

図-2 (b) より、自由長波を制御しない場合では、長い水路上の各地点で算定された水位変動の長周期変動成分は、それと同一地点で推定された拘束長周期波の波形と大きく異なっていることが確認できる。また、波群が伝播するにつれて水位変動の長周期変動成分の振幅が大きくなり、長周期波が発達しているように見える。これは、拘束長周期波と自由長波の伝播速度の違いから生じる位相のずれによるものである。すなわち、造波直後（ $x/L=0.0$ ）では拘束長周期波と自由長波が逆位相となっているため、見かけ上、水面の長周期変動はほとんど生じていない。しかし、伝播するにつれて両者の位相関係が変化するため、その合成波の振幅が増加したと考えられる。

一方、図-2 (c) に示すように、自由長波の発生を制御した場合では、どの算定地点においても、水位変動の長周期変動成分と拘束長周期波の波形は非常によく一致していることがわかる。また、図は省略するが、一方向不規則波についても、2成分合成波の場合と同様に、自由長波を制御することにより、拘束長周期波のみで構成される長周期変動成分が水路内の各地点において観察されることを確認した。

このように、Sand⁶⁾により導出された自由長波の制御法を適用することにより、少なくとも造波境界において、ピストン型造波板で作り出されるものと同等な水粒子運動を与えるブシネスクモデルでは、目標とした波群とそれに伴う拘束長周期波からなる水位変動を適切に造波できることを確認した。ただし、自由長波の発生に係る造波板の変位の影響については、実際の造波装置を用いた検討が必要である。

(3) 拘束長周期波の造波精度

自由長波の発生を抑制することによる拘束長周期波の造波精度を把握するため、2成分合成波に伴う拘束長周期波に対し、実際に算定された水面の長周期変動の再現性に関する誤差評価を行った（図-3）。

表-1 入射波条件（数値計算の場合）

波の種類		周期 (s)	振幅or波高 (cm)	初期位相 (deg)	波長 (m)
2成分合成波	1	2.86	2.0	0.0	6.60
	2	2.50	2.0	0.0	5.67
一方向不規則波	JONSWAP ($\gamma=10$)	2.86	2.0	0.0	6.60

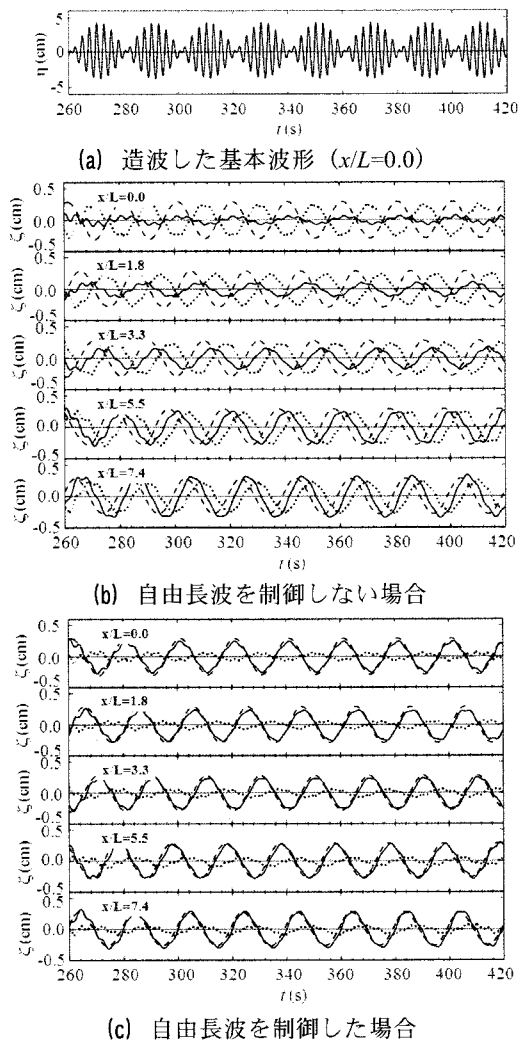


図-2 造波波形および算定された長周期波形（実線：長周期変動，破線：拘束長周期波，点線：自由長波）

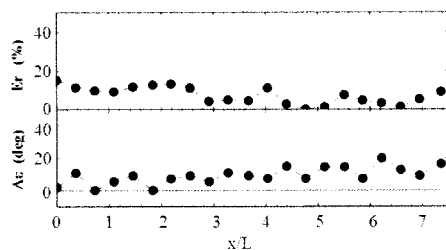


図-3 拘束長周期波の造波精度（上段：波高の相対誤差，下段：位相差）

$$Er = \frac{|H_{low} - H_{bound}|}{H_{bound}} \times 100 (\%) \quad (14)$$

図の上段は，式(14)で定義した波高に対する相対誤差 Er ，下段は両波形の相互相関解析から得られる位相差 $\Delta\epsilon$ について，それぞれ空間変化を示したものである．ここで， H_{bound} は理論的に推定される拘束長周期波の波高， H_{low} は水面の長周期変動の波高である．また，図の横軸は，第一成分波の周期に対する波長で無次元化した造波板からの距離である．

図より，自由長波を制御して算定した水位変動の長周期変動成分は，同じ地点の波群を用いて推定される拘束長周期波を，空間的な変動はあるものの，波高について相対誤差20%以下（空間平均誤差：14%），両波形の位相差で20deg以下（拘束長周期波の代表周期との誤差：6%）の精度で再現できていることがわかる．また，図には示していないが，一方向不規則波に対しても，2成分合成波と同程度の拘束長周期波の造波精度（波高の相対誤差：25%以下（空間平均誤差：14%），位相差：8deg以下（拘束長周期波の代表周期との誤差：約2%））を有していることが確認された．

4. 自由長波制御法の大型平面水槽への導入

数値計算によりその妥当性を確認した自由長波の制御法を大型平面水槽内のサーペント型造波装置に導入し，その適用性を検討した．さらに，拘束長周期波のうち，一部の拘束が解放されて生じたと仮定した自由長周期波と残った拘束長周期波が重畳した場合を想定し，このような重畳波の造波を試みた．

(1) 実験概要

本実験では，(独)港湾空港技術研究所所有の大型平面水槽（デュアルフェースサーペント水槽；長さ48m×幅25m×高さ1.5m）内の一様水深場（水深0.57m）において，一方向に伝播する波群とこれに伴う拘束長周期波，あるいは何らかの原因でこの拘束が解かれた自由長周期波を造波した．ただし，数値計算とは異なり，これらの長周期波の波長に対して水槽の大きさは有限であるため，ここで計測される水面波形には水槽壁面での反射の影響が含まれる．実験で用いた入射波は，成分波の周期と振幅が互いに異なる2成分合成波と一方向不規則波である（表-2）．特に後者は，JONSWAP型スペクトル（スペクトル尖鋭度： $\gamma=3.3$ ）に従う周期1.13s，有義波高7.0cmとし，これを造波するための成分波

表-2 入射波条件（水槽実験の場合）

波の種類	周期 (s)	振幅or波高 (cm)	初期位相 (deg)	波長 (m)
2成分合成波	1	1.08	2.5	0.0
	2	1.18	3.0	0.0
一方向不規則波 JONSWAP ($\gamma=3.3$)	1.13	7.0	0.0	1.90

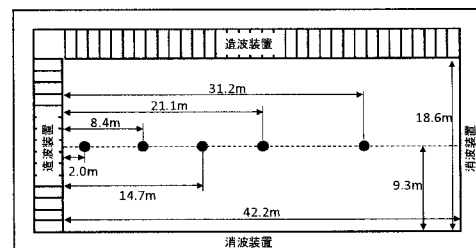


図-4 実験水槽と波高計設置位置（●：容量式波高計）

数は 10 とした。また、これらの波群に伴う拘束長周期波の造波精度を確認するために、大型平面水槽の短辺の造波装置中央に原点をとり、波群の伝播方向に沿って設置した図-4 に示す 5 地点において水位変動を計測した。なお、サンプリング時間間隔は 0.01s、解析データ数は 12000 個 (=120s) とした。

(2) 自由長波制御の精度検証

3 章で検討した数値計算結果と同様に、図-5 および図-6 には、2 成分合成波および一方向不規則波をそれぞれ造波したときに計測された水位変動の長周期変動成分と、波群から推定された拘束長周期波を比較した結果を示す。なお、図-5 (a) および図-6 (a) は、造波した基本波の波形である。また、図-7 には、実際に計測された水面の長周期変動の拘束長周期波に対する再現誤差を評価した結果を示す。ただし、 L はそれぞれ、2 成分合成波の平均周期または一方向不規則波の有義波周期に対する波長とした。

まず、自由長波を制御しない場合には、2 成分合成波および一方向不規則波ともに、水位変動の長周期変動成分は、拘束長周期波の波形と大きく異なっている（図-5 (b)、図-6 (b)）。特に、2 成分合成波では、造波装置の近傍 ($x/L=1.05$) で計測された水面の長周期変動は小さく、拘束長周期波と自由長波がほぼ逆位相の関係にあったことが推測される。

次に、自由長波の発生を抑制した場合には、造波装置により近い地点で計測された水位変動の長周期変動成分のうち、少なくとも前半の波形は、拘束長周期波の波形と概ね一致している（図-5 (c)、図-6 (c)）。しかしながら、これらのうち後半の波形や $x/L=16.39$ ($x=31.2\text{m}$) で計測された水面の長周期変動波形は、いずれのケースともに、拘束長周期波の波形とあまり一致していない。これは、造波装置に対して岸側の水槽壁に設置された消波工により波群の一部が消波され、その結果、拘束が解放され水槽壁で反射された自由長周期波が、水面の長周期変動に混在するようになったためと考えられる。

さらに、これらの造波精度について、2 成分合成波の場合（図-7 (a)）には、自由長波を制御して造波された水位変動の長周期変動成分は、水槽壁からの反射の影響をそれほど受けていないと思われる $x/L < 7.72$ ($x < 14.7\text{m}$) の範囲において、空間平均された波高の相対誤差約 19%、最大位相差 12deg（拘束長周期波の代表周期との誤差：約 3%）の精度で拘束長周期波を再現していることを確認した。

一方、一方向不規則波の場合（図-7 (b)）には、2 成分合成波の場合に比べ、自由長波制御による拘束長周期波の再現精度が低下し、同様に水槽壁からの反射の影響をそれほど受けていないと思われる範囲において、空間平均された波高の相対誤差約 23%、最大位相差 33deg（拘束長周期波の代表周期との誤差：約 9%）であった。これは、造波すべき基本波の成分波数が多くにつれて、制御すべき自由長波を構成する成分波数が増加するとともに、一波あたり

の振幅や周波数差が減少し、既設基板仕様で扱える有効桁数の限界（振幅： 10^{-4}cm 、周波数： 10^{-4}Hz ）に近づいたことが大きく影響していると考えられる。

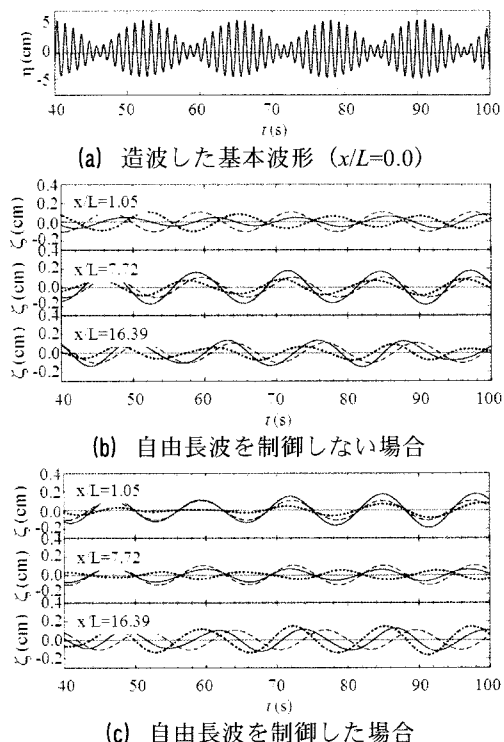


図-5 造波波形および計測された長周期波波形（2 成分合成波）（実線：長周期変動、破線：拘束長周期波、点線：自由長波）

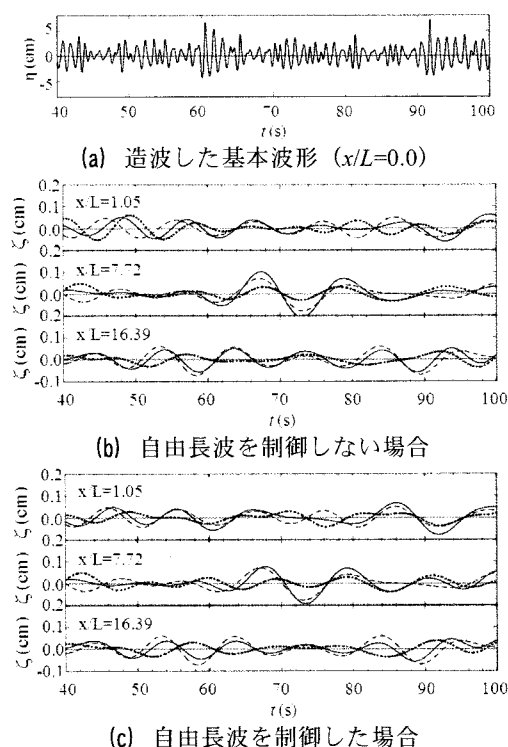
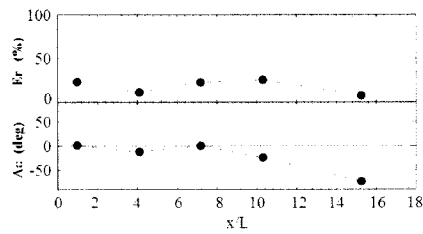
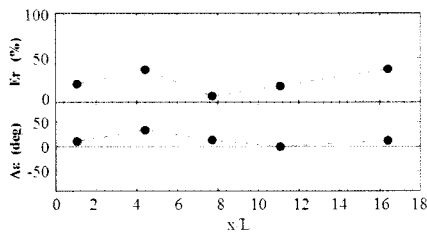


図-6 造波波形および計測された長周期波波形（一方向不規則波）（実線：長周期変動、破線：拘束長周期波、点線：自由長波）



(a) 2成分合成波



(b) 一方向不規則波

図-7 拘束長周期波の造波精度
(上段：波高の相対誤差，下段：位相差)

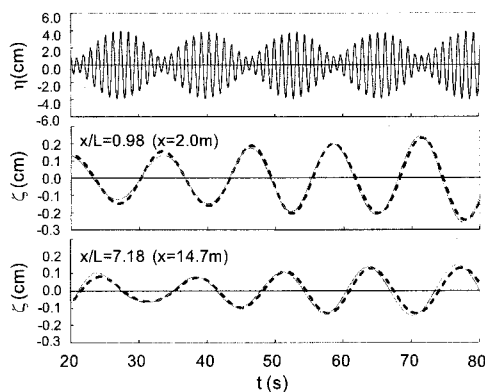


図-8 波群と長周期変動成分の重畳波の再現結果 (上段：造波波形，中段・下段：長周期変動成分 (実線：単独波の重ね合わせ，破線：重畳波))

(3) 波群と長周期波の重畳波の造波

実海域で観測される長周期波は，波群に伴って沖から来襲した拘束長周期波と，その一部の拘束が解放されて発生した自由長周期波が混在していると考えられる。ここでは，これらの構成比を仮定したうえで，これらが重畳した長周期波の造波を試みた。

図-8 は，図の上段に示す波群に対し，式(6)で推定される拘束長周期波のエネルギーのうち 50%が，何らかの影響により拘束が解かれて自由長周期波となった場合を想定して造波したとき，各地点で計測された水位変動の長周期変動成分を示している。ここで，実線は，発生した自由長周期波と残った拘束長周期波をそれぞれ単独で造波して計測された波形を線形に重ね合わせたもの，点線は，これらの重畳波として同時に造波したものである。なお，一部の拘束が解かれて残った拘束長周期波は，造波板の運動による自由長波の発生を抑制しながら，拘束が解放された分に相当するエネルギーを減じた波群を造波することによって再現した。

この図において，両者は非常によく一致していることから，少なくとも実用的には，拘束長周期波と

その一部の拘束が解かれた自由長周期波は独立とみなしてよいものと思われる。また，この造波システムにより，任意の割合で拘束が解放されて発生した自由長周期波と，残った拘束長周期波の重畳波の造波が可能になった。なお，拘束長周期波の拘束が解かれる原因には，海浜での砕波や海底地形の不連続性のほか，島や防波堤による波の回折，消波工等による波の部分反射などが考えられる¹⁰⁾。

5. おわりに

本研究では，造波板運動により生じる自由長波を制御することにより，数値計算および水理実験において拘束長周期波を適切に再現できることを確認した。また，任意の割合で拘束が解放された自由長周期波と拘束長周期波の重畳波の造波が可能になった。

今後は，この造波システムを活用し，甚大な越波浸水災害が発生した入善漁港海岸を例に，当時来襲した長周期うねりの波群とそれに伴う水面の長周期変動を造波し，高波浪の集中機構等の再現とその発生メカニズム及び対策工の検討を行う予定である。

謝辞：本研究は，独立行政法人鉄道建設・運輸施設整備支援機構「運輸分野における基礎的研究推進制度」による補助を受けて実施したことを記し，謝意を表します。

参考文献

- 1) 田島芳満，石指裕章，佐藤慎司：地形急変部周辺における長周期変動を伴う波・流れ場の局所集中機構，海岸工学論文集，第 56 巻，pp.211-216，2009。
- 2) 池野正明，田中寛好：自由長波制御により造波された波群拘束長周期波の浅水・砕波変形と構造物による重複波の特性，海岸工学論文集，第 42 巻，pp.156-160，1995。
- 3) 笈田博章，水口優：単一波群による長周期波，海岸工学論文集，第 43 巻，p.161-165，1996。
- 4) 合田良実：鉛直振動流による造波の理論について，第 11 回海岸工学講演会講演集，pp.69-73，1964。
- 5) 大山巧，土田充：非線形不規則波を対象とした自由波制御型の造波理論，海岸工学論文集，第 45 巻，pp.11-15，1998。
- 6) Sand, S.E. : Long wave problems in laboratory models, J. Water Ways, Port, Coastal Ocean Div., ASCE, 108, WW4, pp.492-503, 1982.
- 7) Barthel, V., E. P. D. Mansard, S. E. Sand and F. C. Vis: Group bounded long waves in physical models, Ocean Engineering, Vol.10, No.4, pp.261-294, 1983.
- 8) Sand, S.E. : Long waves in directional seas, Coastal Engineering, Vol.6(3), pp.196-504, 1982.
- 9) 平山克也：非線形不規則波浪を用いた数値計算の港湾設計への活用に関する研究，港湾空港技術研究所資料 No.1036, 162p, 2002。
- 10) 関本恒浩，森屋陽一，水口優：自由長周期波の発生とその定量的評価に関する理論的考察，海岸工学論文集，第 47 巻，pp.236-240，2000。