

大型弾性浮体下での孤立波の分裂に関する数値解析

劉 曉 東*・堺 茂 樹**

1. 緒 言

近年、海上空港など超大型浮体構造物の設計法の確立を目的とする各種の研究が活発に行われている。著者ら(1996, 1997)は、弾性浮体の波浪応答を対象として、境界要素と有限要素を接続した時間領域数値解法を開発し、津波の第一波を孤立波と見なした場合の応答解析(堺ら, 1998; 劉ら, 1999)を行ってきた。これらの検討の中で、孤立波が弾性浮体下を伝播する間に孤立波本体を先行する分裂波が発生し、これによって浮体に作用する曲げモーメントの分布は大きく変化されることが見出された。

没水構造物や地形変化などによって自由水面で起きる波の分裂現象に関する研究は数多く行われているが(例えば, Chandler ら, 1972; Massel, 1983; Seabra-Santos ら, 1987; 安田ら, 1991), 弾性浮体下での孤立波の分裂現象が、上述の理論によって説明できるか否かは現在のところ不明である。いずれにしても、弾性浮体下での孤立波の分裂は、新たに見出された現象であり、また浮体構造物の設計に際しても考慮しなければならないものであることから、その発生状況や発生条件を明確にすることが必要である。

本研究では、まず二次元造波水路を用いて孤立波浪場での弾性浮体の波浪応答に関する模型実験を行い、実験値との比較により数値解法の有効性を検証した。次に、本数値解法を用い、浮体の曲げ剛性と質量及び波浪条件を変化させた種々の計算を行い、弾性浮体下での孤立波の分裂について検討を行った。

2. 実験方法及び実験結果

2.1 実験方法

実験は図-1 に示すような長さ 26 m, 幅 0.8 m, 深さ 1 m の二次元造波水路を用いて行った。孤立波の造波には吸収式造波装置を用い、これと同一の装置が水路の他端にも設置されており反射波の発生を抑制している。弾性浮体の模型としては、板厚 20 mm, 長さ約 10 m のポリエ

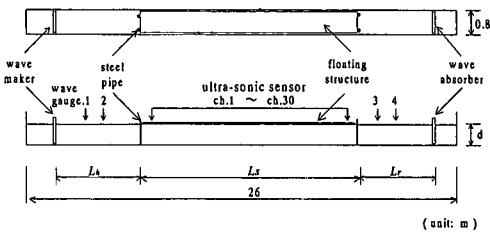


図-1 実験装置

表-1 実験装置

水深 (cm)	入射波高 (cm)
20	2, 3, 4
30, 40, 50, 60	2, 3, 4, 5, 6

チレン板を使用した。なお、市販のポリエチレン板の長さが 2 m であるため、5 枚の板を接続して約 10 m の連続板を作成した。ポリエチレン板の比重は 0.914, 弾性係数は約 450 であった。また、図-1 に示すように浮体の水平移動を鋼製パイプによって抑制した。

模型浮体を水路中央に設置し、浮体の前方及び後方開水域での水位変動を 2 台ずつの容量線式波高計により計測し、浮体の鉛直変位を超音波式変位計を用いて 30 点で測定した。図-1 中での L_s , L_r はそれぞれ前方開水域、浮体、後方開水域の長さを意味し、全ての実験においてそれぞれ 5 m, 10 m, 5 m とした。

実験条件は表-1 に示すとおりであり、計 23 ケースの実験を行った。

2.2 実験結果

図-2 は、孤立波が浮体下を透過する間の、浮体の各計測点の鉛直変位と浮体前後の開水域での水位の時間変化の例を示したものであり、水深 40 cm, 波高 2 cm の場合の結果である。なお、縦軸は入射波高(前方開水域での波高)で正規化しており、図中の x は浮体前端からの距離を表している。浮体の鉛直変位(図中第 2 段~4 段)は前方開水域での水位(図中最上段)とほぼ同一の波形を保ち、後方開水域(図中最下段)へ透過している。これに対し、波高を 6 cm とした場合には、図-3 に示すよ

* 正会員 博(工) 岩手大学助手 工学部建設環境工学科
** 正会員 工 博 岩手大学助教授 工学部建設環境工学科

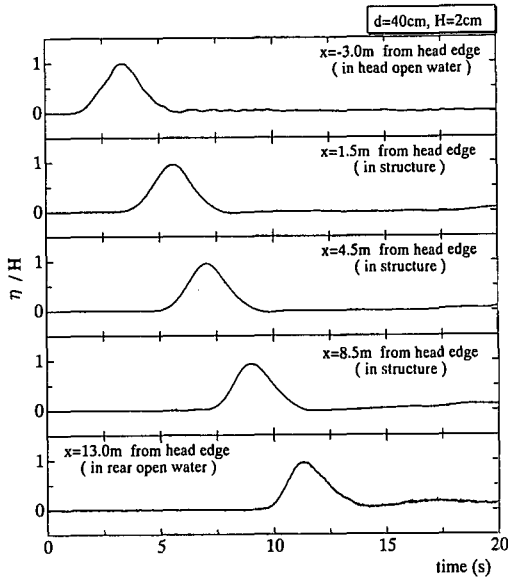


図-2 実験による開水域での水位及び浮体の変位の時間波形

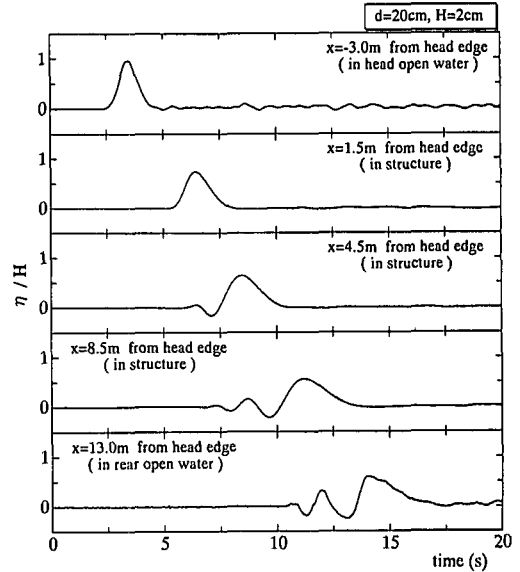


図-4 実験による開水域での水位及び浮体の変位の時間波形

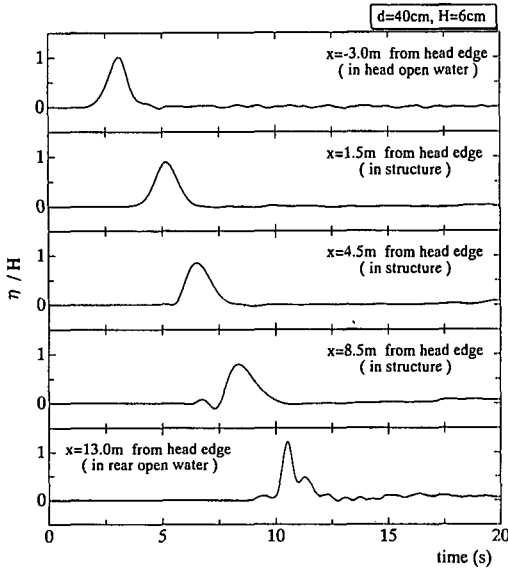


図-3 実験による開水域での水位及び浮体の変位の時間波形

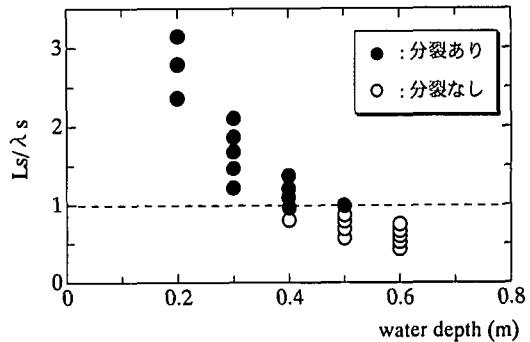


図-5 分裂の有無における浮体の相対長さ和水深との関係

うに浮体下を進行する間に波形の対称性が次第に失われ(図中第3段)、非対称化が進むと、孤立波本体を先行する分裂波(図中第4段)が発生する。また、図-2に示したように波高が2cmで、水深が40cmの場合には分裂波は発生しなかったが、波高が同一でも水深が浅くなるにつれ分裂が発生し、図-4に示す水深20cmの場合には分裂現象が顕著となる。

上記のように、波高の増加あるいは水深の減少に伴い

弾性浮体下での孤立波が分裂をしはじめるということは、ある曲げ剛性、質量及び長さを持つ浮体に対して分裂波発生の有無が入射波の非線型性の強弱に左右されていると考えられる。水深及び波高の両者の影響を統一的に表現するために、孤立波理論の一次近似解より波形の総面積の99.6%を含む長さ λ_s を求めると、次式のようになる。

$$\lambda_s = \frac{4\pi}{\sqrt{3}} \left(\frac{d}{H} \right)^{3/2} H \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 d は水深、 H は波高である。

浮体の長さ L_s と λ_s との比 L_s/λ_s を浮体の相対長さとして定義し、分裂の有無に関わる相対長さ和水深の関係を本実験の全てのケースにおいてまとめたのが図-5である。水深の減少及び波高の増大により λ_s は短くなり、浮体の相対長さが長くなる。相対長さがある限界値を超えると、

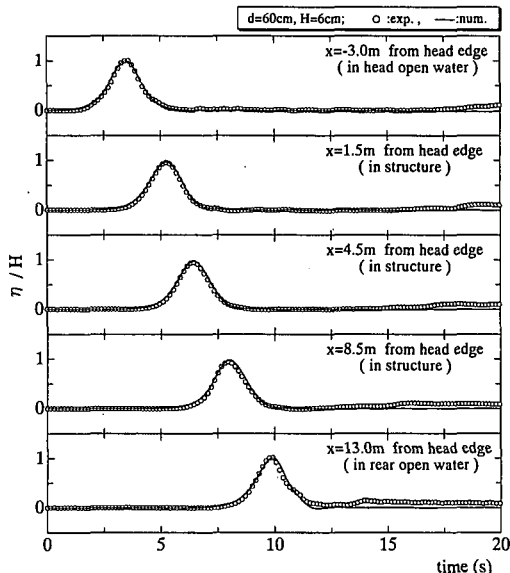


図-6 水位及び浮体変位の時間波形の数値解と実験値との比較

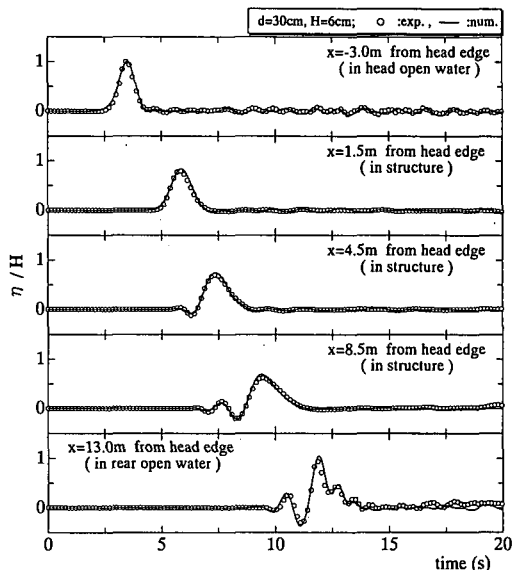


図-7 水位及び浮体変位の時間波形の数値解と実験値との比較

分裂波が生じることとなる。本実験で用いた浮体に対しては、その限界値が約 1.0 であったが、浮体の曲げ剛性や質量が変化すると、限界値が変わる。

3. 数値解析による検討

3.1 数値解析法

著者らは波浪条件、海底地形、構造物の質量分布あるいは剛性分布のいずれも任意に設定できる解析法を確立することを目的として、流体運動には境界要素法を、また浮体の弾性変形の解析には有限要素法を別個に用い、浮体と流体の界面での変位及び圧力を接続することによって、流体と浮体の動的な干渉を計算できる数値解析法を提案した。この解析法では、流体の自由水面及び流体と浮体の界面での運動学的及び力学的境界条件を線形化し、これらを時間と共に変化する自由水面及び界面に適用しており、構造解析における有限変位解析に対応するものである。一様水深上の規則波、不規則波、孤立波及び一様勾配斜面上の孤立波に対する波浪応答の解析結果は、模型実験結果と良く一致していることから、著者らの数値解析法の有効性は認められる。しかし、自由水面及び界面での運動学的及び力学的境界条件を線形化し、これらを移動境界に適用しているという点で、理論的には非線形性の取り扱いが不統一であった。そこで、著者ら (2000) は上述の線形化を行わず、非線形境界条件を移動境界に適用した場合の解析法に改良し、解の収束性、安定性及び精度について検討を行った。

以下では、著者らが開発した非線形波浪場での大型浮

体の弾性応答に関する時間領域数値解法を用い、実験値との比較により数値解析の有効性を検証し、弾性浮体下での孤立波の分裂及び分裂波の発生機構に関わる浮体の特性及び波浪条件の影響について検討する。

3.2 検証計算

孤立波の分裂現象に対する数値計算法の適用性を検証するため、数値解と実験値との比較を行った。図-6 は水深 60 cm、波高 6 cm とした場合であり、浮体の鉛直変位、前方及び後方開水域での水位の時間波形の数値解 (実線) は実験値 (白丸) と極めて良く一致している。なお、孤立波通過後の水位あるいは浮体変位は、計算では静水位に戻るのに対して、実験値は幾分大きな値となるが、これは実験では反射波の影響があるためである。図-7 は水深を 30 cm とした場合に分裂が発生する条件とした場合の比較であるが、分裂の発生状況、孤立波本体及び分裂波の形状がよく再現されており、本解析手法が分裂のような現象に対しても十分適用できることがわかる。

3.3 分裂波の発生状況及び発生条件

長さ 10 m の模型浮体を用いた実験では分裂が発生しなくても、浮体の長さを増加した際の分裂発生の有無は明らかではない。そこで、以下では、浮体長を 40 m とし、浮体の曲げ剛性及質量 (厚さ) 及び波浪条件を変化させて計算を行い、弾性浮体下での孤立波の分裂状況及び分裂条件を検討する。

図-8 は実験では分裂が生じなかった図-6 中の波浪条件に対して浮体長を長くした場合の変形の空間波形を示しており、孤立波本体が 25 m に達する時点から、前方

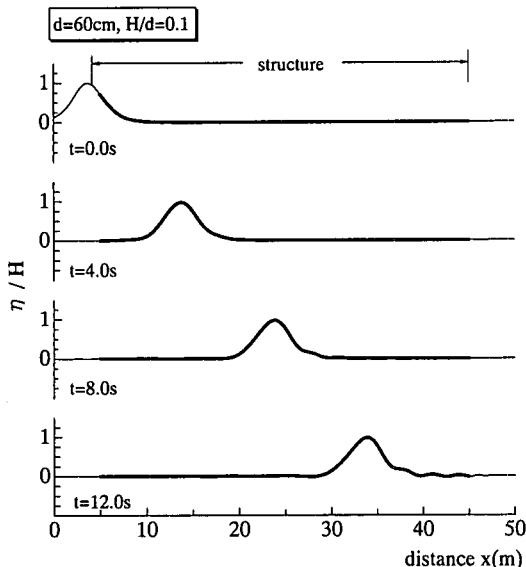


図-8 浮体変形の空間波形 (浮体の長さ 40 m, 厚さ 2 cm)

に分裂波が現れ、次第に明瞭になっている。このことから、浮体長が短く、分裂が発生する前に浮体を通過するような入射波でも、浮体長（あるいは浮体下での進行距離）の増大と共に分裂が生じはじめることが分かる。

図-9 は、水深を 60 cm, 波高水深比を 0.1, 浮体の厚さを 2 cm とした場合の、浮体下での孤立波の分裂状況に対する浮体の曲げ剛性の影響を示した例である。曲げ剛性が大きい場合には、分裂波は実験でも見られたように孤立波本体の前方のみに生じている (図-9a)。曲げ剛性が小さくなるにつれ前方の分裂波は弱くなり (図-9a'), 次で孤立波本体の前後で分裂波が発生し、ドップラー効果によって前方での波長は短く、後方では長い (図-9b)。曲げ剛性が更に小さくなると、前方分裂波は次第になくなり、分裂波は孤立波本体の後方のみに現れる (図-9c, c')。後方及び前後での分裂現象は本研究で新たに見出されたものであり、また本研究の範囲内 (水深 20~60 cm, 波高 2 cm~6 cm, 浮体の長さ 40 m 及び曲げ剛性 0.1~300 N・m²) では弾性浮体下での孤立波は三種類のいずれかのパターンで必ず分裂することが明らかとなった。

図-10 は、図-9 中で前後分裂のパターン (b) になった浮体の曲げ剛性を用いて、波浪条件を変化させた場合の孤立波の分裂状況を示している。水深が浅い場合では前方分裂のみが現れる (図-10a, a') のに対し、水深が深くなると、次第に前方分裂がなくなり後方分裂のみが発達する (図-10c, c')。

以上のことは、前方分裂, 前後分裂及び後方分裂の三種類のパターンの出現する範囲が存在していることを示

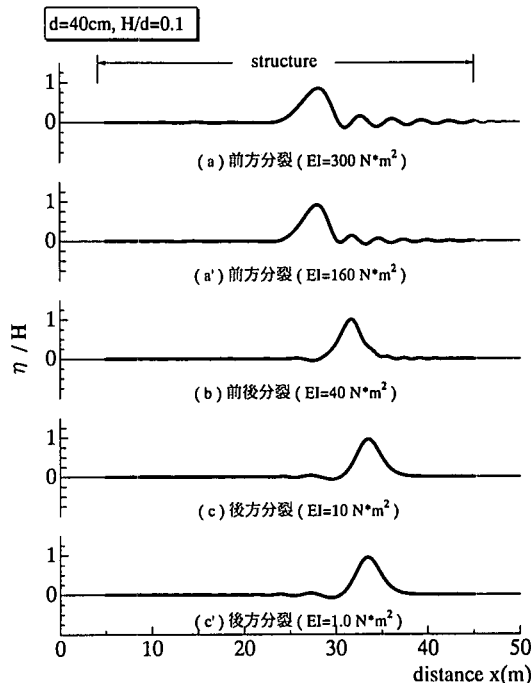


図-9 浮体の曲げ剛性を変化させる場合の孤立波の分裂状況 (浮体の長さ 40 m, 厚さ 2 cm)

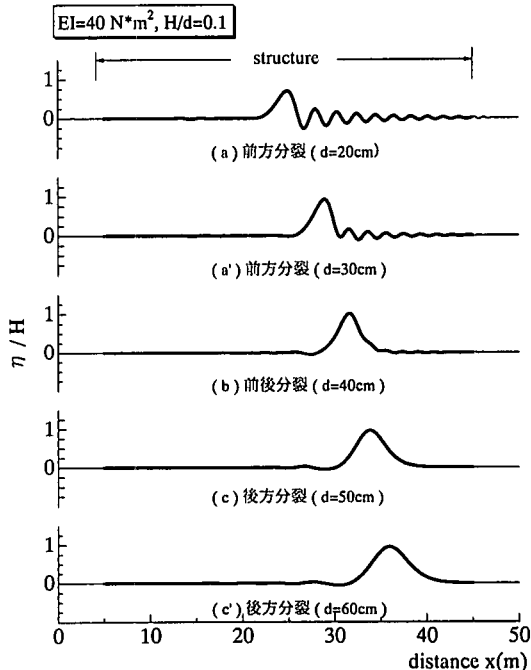


図-10 波浪条件を変化させる場合の孤立波の分裂状況 (浮体の長さ 40 m, 厚さ 2 cm)

唆している。そこで、波浪条件, 浮体の曲げ剛性及び質量を変化させて種々の計算を行い、分裂の現れる範囲の

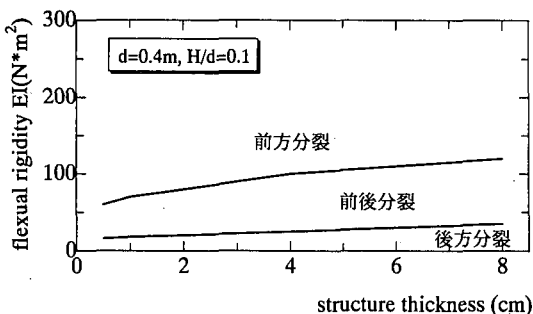


図-11 分裂波の発生範囲

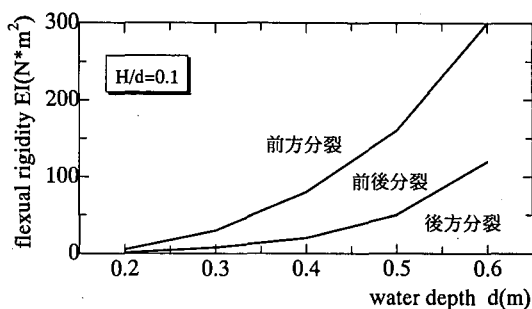


図-12 分裂波の発生範囲

例を図-11と図-12に示した。分裂のパターンは水深、波高、浮体の曲げ剛性及び質量によって決定され、特に、浮体の曲げ剛性及び水深が支配的であることが明らかとなった。しかし、上述三種の分裂波の発生条件及び出現範囲は波浪条件及び浮体特性と具体的にどのような関係を持つかを厳密に解明するためには、本研究のような数値解析では限界があり、理論的な検討が必要である。

4. 結 論

本研究では、大型弾性浮体下での孤立波の分裂特性について、実験及び数値計算によって検討を行った。得られた結論を項目毎に要約すると、以下のようになる。

- (1) ある一定の曲げ剛性、質量及び長さを持つ浮体に対して、分裂波発生の有無が入射波の非線型性の強弱に依存する。
- (2) 入射する孤立波が非線型性の弱いものであっても、浮体長(あるいは浮体下での孤立波の進行距離)の増大と共に分裂が発生する。
- (3) 分裂波は、前方分裂、前後分裂及び後方分裂の三種類のいずれかのパターンになる。
- (4) 前方分裂、前後分裂及び後方分裂の出現範囲は、水深、波高、浮体の曲げ剛性及び質量によって決定される。

本研究の結果より、分裂が三種類のパターンに分類され、前方分裂波については著者らの過去の研究でも見出されたものであるが、後方及び前後分裂波は本研究で新たに見出された分裂現象である。しかし、三種の分裂波の発生条件及び出現範囲を厳密に解明するためには、数

値解析では限界があり、理論的な検討が必要となる。更に、今回の実験では前方分裂のみが再現されたが、曲げ剛性が異なる浮体を使用した実験を行い、前後及び後方の分裂現象を実験的に検証することも今後の課題である。

参 考 文 献

- 堺 茂樹, 笹本 誠, 劉 曉東, 影佐拓也, 平賀健司(1998): 津波来襲時の大型弾性浮体の変形について, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 896-900.
- 安田孝志, 榑原幸雄, 北村 茂 (1991): 水深変化による孤立波の変形と砕波に及ぼす斜面の影響, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 41-45.
- 劉 曉東, 堺 茂樹 (1996): 弾性浮体の波浪応答に関する境界要素と有限要素の接続解法, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 991-995.
- 劉 曉東, 堺 茂樹, 鈴木隆裕 (1999): 海底勾配を有する海域に設置した大型浮体の津波応答, 西部造船会会報, 第97号, pp. 87-94.
- 劉 曉東, 堺 茂樹 (2000): 任意波浪場に於ける大型浮体の弾性応答に関する時間領域解析, 土木学会論文集. (投稿中)
- Chandler, P. L. and R. M. Sorensen (1972): Transformation of Waves Passing a Submerged Bar, Proc. of 13th Coastal Engrg., ASCE, Vol. 1, Chapt. 19.
- Liu, X. D. and S. Sakai (1997): BE-FE combined method for analysis on the dynamic response of large-scale floating structure to random waves, Proceedings of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Vol. 4, pp. 203-209.
- Massel, S. R. (1983): Harmonic Generation by Waves Propagating over a Submerged Step, Coastal Engrg., Vol. 7, pp. 357-380.
- Seabra-Santos, F. J., D. P. Renouard and A. M. Temperville (1987): Numerical and Experimental Study of the Transformation of a Solitary Wave Over a Shelf or Isolated Obstacle, J. Fluid Mech., Vol. 176, pp. 117-134.