

セミフロート式海洋構造物の着底衝撃に関する研究

清 川 哲 志*・田 原 茂 生**

1. はじめに

セミフロート式海洋構造物は、自然条件に合わせてモード変換を行う新しいタイプの構造物で、常時は浮遊状態にあって免震の利点を有し、荒天時は水バラストにより着地安定するという従来にない特長を持つ。モード変換の概念は既に提案されているが(清川ら, 1989), 本研究とは逆に、常時および荒天時は着底しており、地震時に初期微動をセンサーで感知して浮上するというもので、短時間で浮上させるために大規模な排水システムを必要とする。また、いつ来襲するかわからない地震に対して常に待機状態にしなければならずシステムの信頼性の問題も大きいと考えられる。これに対し、セミフロート式の場合、予め来襲が予測できる台風等の荒天時に対してモード変換を行うため、コントロールがはるかに容易で、また、地震に対するのに比較して十分ゆとりを持ったオペレーションが可能である。しかし、その一方、台風等が接近中の中程度の波浪中で動揺しつつ沈降、着底する必要があり、その際に海底の基礎と浮体部分の接触による衝撃力の問題が生じる。特に、3万トン以上の排水量になるセミフロート式海洋構造物の場合、その運動エネルギーは大きく、何らかの緩衝装置が必要となる可能性もある。本研究は、着底時衝撃力の発生メカニズムとその特性、また、緩衝装置としてのパッファによる衝撃力の吸収効果を実験により明らかにするとともに解析の検証のためのデータを取得することを目的に行ったものである。

2. セミフロート式海洋構造物の概念

セミフロート式海洋構造物は、図-1に示すような水深10~50mの海域に建設する中規模の海洋構造物(1ユニット:1000m²~20000m²)である。この構造物は、ウォーターフロント開発や海洋リゾート開発等、地域振興の核として機能させるもので、マリンレジャー施設、コンベンション施設、ホテル、リゾート施設、ヘリポート、海洋観測研究施設等の用途に適すると考えられる。

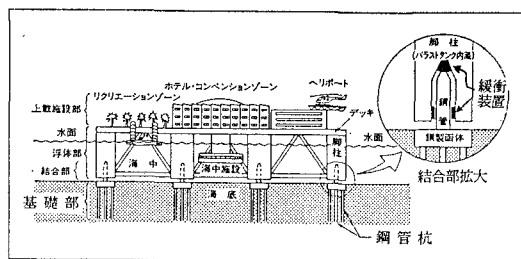


図-1 セミフロート構造物の概念図

その機能上の主な特徴は、①暴風波浪時に動揺しないこと、②結合部の緩衝装置により地震の影響を小さくできること、③海面からデッキまでの高さが潮の干満によって変わらないので、親水設備を施す上に有利であること、④コラムを貫通するスバッド係留方式であるので、係留のための水面占有が不要であり、かつ外観をもそこなわないこと、⑤必要に応じて別海域への移設ができる上、ドック内での補修も可能であること等である。

一方、これに伴う新たな技術上の問題として、最も重要と考えられるものは、先にも述べたように、浮体と基礎との結合部分の設計、とりわけその部分が着底時に受ける衝撃力とその緩和策である。図-1の中の結合部拡大図に示す水平および上下方向の緩衝装置のうち、特に上下方向の問題を本論文で対象とした。

3. 模型実験

3.1 実験の目的

種々の緩衝方式をとった場合の、浮体の沈降、着底の過程を解析的に再現し、任意の設計に対応できるように、衝撃力推定法を確立することが最終目標である。本実験はその第1ステップとして、①シンプルな形状の要素模型を使って解析シミュレーションを検証するためのデータを取ることを、および②概念設計の初期段階にあって、現象を即物的に観察すると共に、衝撃力のおおよその値を初期段階において知っておくことを目的とした。

3.2 実験方法および測定項目

実験は、清水建設技術研究所の長さ40m、幅4m、

* 正会員 工博 清水建設(株) 大崎研究室 応用工学グループ

** 清水建設(株) 海洋開発エンジニアリング部

深さ 1.3m の造波水槽を用いて、前記①に対応してコラム単体実験、②に対応して 3 本コラム実験を行ったが、何れの場合も水深 20m で使用するコラム 12 本のセミフロートを想定し、その 1/20 の部分模型とした。

a) 実験の種類

各実験では後述するように、波高は 2 通り、波長は 3 ～ 5 通りに変化させた。衝撃計測時の模型の状態は、基本的に下記 3 種とした。

①沈降実験

波浪中で動揺している模型に注水、沈降させて着底時の衝撃を計測。

②吃水一定の実験

浮体と水底とのクリアランスを一定に保った状態で波を当て、動揺によって水底に衝突させて衝撃力を計測。この実験は解析との照合を容易にする基礎的なもの。

③波なし沈降

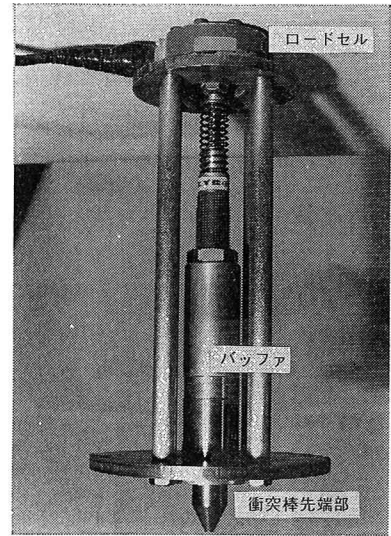
静水中で浮遊状態から注水し、着底時の衝撃を計測。

b) 実験波について

波はすべて規則波とし、原則として表一 1 に示す条件を適用した。波高によって衝撃の状況が異なると予想し、2 通りの波高で実験した。

表一 1 実験波の条件

	実物	模型
波高：2 通り	3.0m, 1.5m	15cm, 7.5cm
波周期：3 通り	5, 6, 7sec	1.1, 1.35, 1.6sec



写真一 計測ユニット

響を及ぼすかを調べた。

d) 緩衝装置

緩衝装置として実験に用いたばねは、実際海底での軟粘土の弾性を模擬するものとした。また、バフファは、市販のミニオイルバフファの中から、出来るだけ実験の条件（実物の模擬）に合うものを選ぶこととしたが、予想される衝突速度が低い割に、高いエネルギー吸収を示すものがなく、最も近いものとしてカヤバ工業の最小型のバフファを採用した。

衝突部の緩衝方法を表一 2 に示す。この内ダイレクトは、模型に何も緩衝装置を付けない場合で、岩盤あるいはコンクリート基礎への直接衝突に相当する。

表一 2 衝突部の緩衝方法

コラム単体	3 本コラム
○ダイレクト（無緩衝）	○ダイレクト
○バフファ A	○バフファ C（軟）
○バフファ B	○バフファ D（硬）
○バフファ C（軟）	○ばね
○ばね	

e) 沈降方法

沈降手段として、模型上方に配管を施し、予め開度を調整した仕切弁を介して模型内に注水した。沈降速度は約 1.0 cm/sec で一定とした。

衝撃は波により動揺する浮体が、出合いがしらに水底を打つときが最大と予想されるが、このタイミングを意図的に合わせることは困難であるのでタイミングをずらせて 5 ～ 9 回沈降させて、衝撃の最大となるところを把

波高を各回毎に合わせることは煩雑であるので、概ね上記波高を狙って実験を行い、後に必要に応じて波高修正を施すこととした。

c) 荷重および変位の測定

水底と衝突するコラムの先端にバフファないしばねを介して衝突棒を取付け、ロードセルによって衝突荷重を測定した。写真一 1 は、バフファを組み込んだ計測ユニットである。このユニットをコラム底部の内側に装着した。3 本コラムでは、両端のコラムに取り付けた。下方の突起が衝突棒の先端であって、外板貫通部を上下に滑動するようにした。衝突荷重は、緩衝装置を介して上方のロードセルに直接伝達される。

コラム先端部の水平および鉛直変位をポテンショメーターにより測定し、この微分波形から衝突速度を求めた。3 本コラム模型実験の場合、この値からさらに模型の鉛直面内の運動（Pitching および Heaving）を求めた。これにより、衝突部の緩衝方式（何も緩衝しない場合を含む）によって、模型の衝突速度が衝撃力にどう影

えることにした。

測定項目としては、波の条件を変化させつつ

①着底衝撃力およびそのタイミング

②浮体の運動 (heaving, pitching および沈降)

を計測するため、波高計 (3ヶ所)、荷重計、変位計 (ポテンシオメーター) からの信号を、計測用パソコンに取り込み記録した。

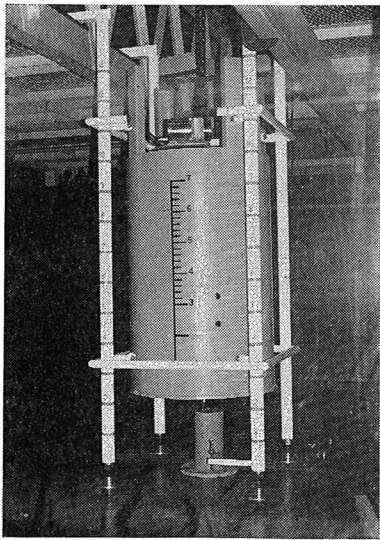


写真-2 コラム単体実験模型

3.3 コラム単体実験結果

写真-2 に示すように、コラム単体実験においては模型 (直径 500 mm) をローラー付き支持枠内に保持して鉛直方向の運動のみを行わせるようにした。

着底衝撃荷重の整理に当たって、衝突速度と荷重の関係を見るのが運動量変化、あるいは運動エネルギー変化モデルのいずれの観点から最も基本的なことを考えた。これにより、衝突のタイミング、沈降と吃水一定の

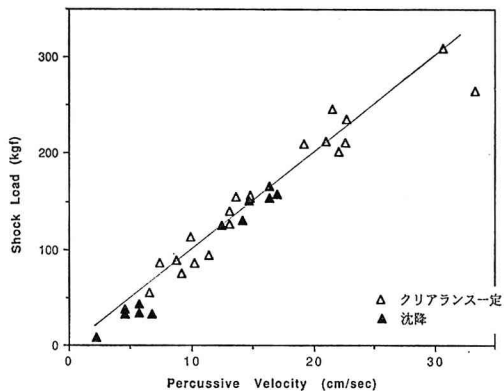
場合との差やクリアランスの大小の差による影響が現れない形での整理が可能となる。

a) 緩衝装置の効果

図-2 は 4 種の緩衝様式の着底衝撃 (クリアランス一定の実験) を比較したものであるが、ダイレクトに比較して緩衝装置の効果が顕著であることがわかる。バッファ C (軟らかいバッファ) では無緩衝に比し、同一速度で衝撃荷重が 1/7.5 以下に低減される。なお、更に軟らかいバッファが望ましいかというと、そうではなく軟らかすぎるバッファでは、最終着底時にストロークエンドでの衝突荷重が、初期の打撃を上まわるという現象を生じる。

b) クリアランス一定と沈降を伴う場合の比較

図-3 (a) (b) はクリアランス一定の場合の衝突と沈降を伴う場合の衝突とて、衝突速度と衝撃荷重の関係に差があるかどうかを見たものである。ここにはダイレクト着底とバッファ C を用いた場合の例を示すが、いずれも両者の関係に差がないことがわかる。バッファ D およびばねの場合も全く同様であった。したがって、沈降のあるなしにかかわらず、実際の衝突速度さえわかれば



(a) ダイレクト衝突の場合

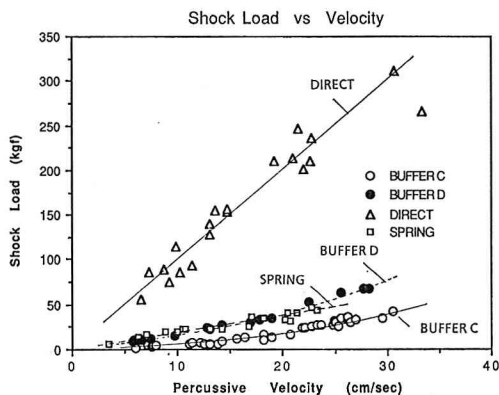
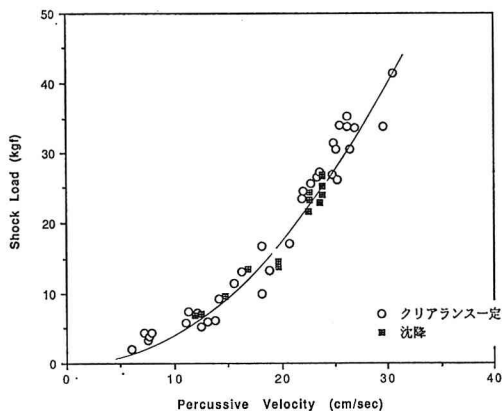


図-2 緩衝方式による着底衝撃力の比較
(クリアランス一定の実験)



(b) バッファ C を用いた場合

図-3 クリアランス一定と沈降の場合の比較

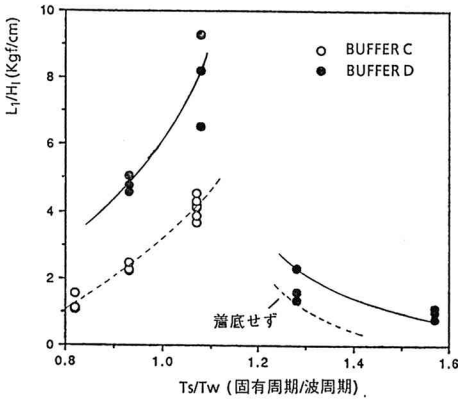


図-4 衝撃力の周期特性(沈降実験)

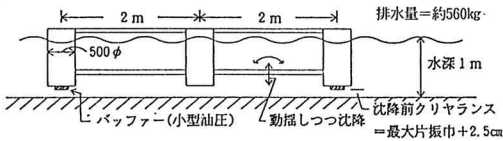


図-5 3本コラム実験模型概念図

ば、衝撃荷重は一意的に決めることができると考えられる。また、ダイレクト着底の場合、荷重は速度と比例関係にあり、バッファを用いた場合は2次曲線に近くなっている。これは、衝撃力の発生機構がそれぞれ運動量変化、およびバッファの仕事による運動エネルギー吸収によっていることを示唆するものである。

c) 衝撃力の周期特性

図-4に衝撃力と波周期 T_w の関係を示す。この図に用いた模型の heaving の固有周期 T_s は、静水中において別途計測したものである。縦軸には衝撃荷重を各実験ケース毎の実波高 H_I で割り、単位波高当りに換算した荷重をとった。これは、緩衝方式としてバッファ C、Dの場合についての結果を示したものであるが、いずれも同調比 T_s/T_w が 1.1 付近で衝撃荷重が最大となっている。これは固有周期として完全浮揚状態の値をとっているのに対し、着底を伴う動作では、固有周期が短い方に移行することを示している。なお、ダイレクト衝突およびばね緩衝の場合も、衝撃荷重の大きさは異なるものの特性はほぼ一致している。

3.4 3本コラム実験結果

図-5に3本コラム模型の概念図、写真-3に実験状況を示す。なお、3本コラムの場合は垂直面内の運動のみを許容するような支持枠を設けて heaving および pitching を計測し、surging については、漂流どめの緩やかなスプリング係留をすることによって出来るだけ拘束しないようにした。

3本コラム実験は沈降を伴う場合を主として行った。

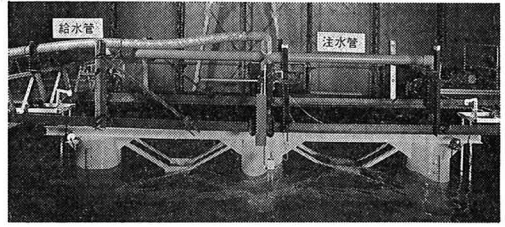


写真-3 3本コラム浮体の水槽実験状況

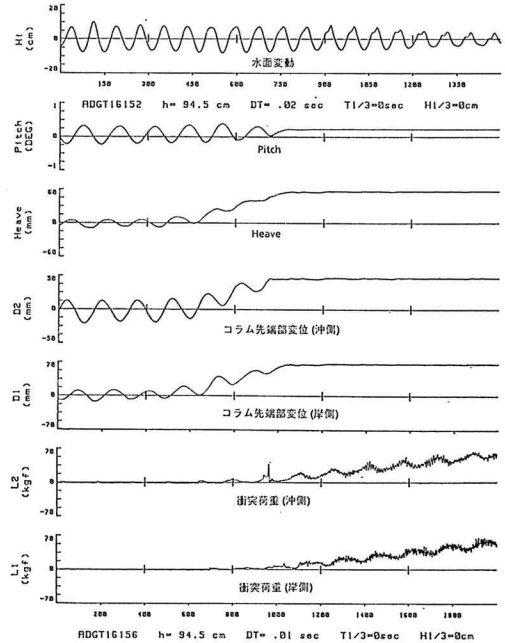


図-6 実験採取データの一例

実験結果は着底衝撃荷重を、主として衝突速度ベースで整理したほか、沈降実験における着底のタイミングと衝撃荷重の関係も調べた。これは注水開始のタイミング次第で衝撃力に影響が出て、最大衝撃力が把握されない恐れがあるため、原則として同一実験を数回繰り返すこととし、最大9回の繰り返しを行ったケースもある。この結果、後に示すように動揺周期のほぼ全位相にまたがったデータを得ることができた。

この実験では、荷重、変位および衝突速度の計測を沖側コラムと岸側コラムの両方で行っている。以下の説明において、添字1を付けたものは岸側、添字2は沖側を表す。また、図中においては岸側を黒、沖側を白(黒く塗りつぶさない記号)で表してある。

図-6は採取生データの一例である。上より水面変動、Pitch および Heave、コラム両端部変位 D_1 、 D_2 、衝撃荷重 L_1 、 L_2 である。波高は3ヶ所で計測したが、ここにはその中の1ヶ所(模型前方約 10m)のものを示す。これらのうち Pitch および Heave は D_1 および D_2 より、計測用パソコンで計算させて表示した。

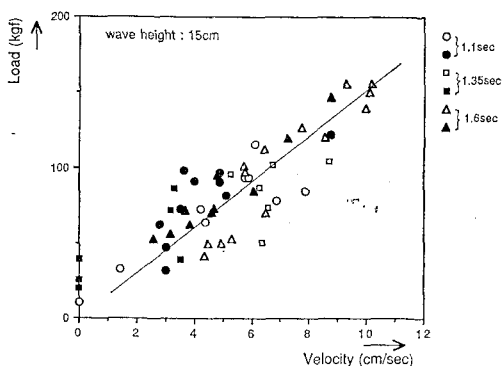


図-7 ダイレクト衝突の場合の衝撃力

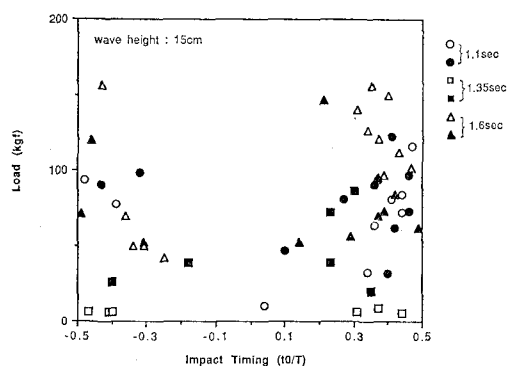


図-10 着底のタイミングと衝撃力の関係

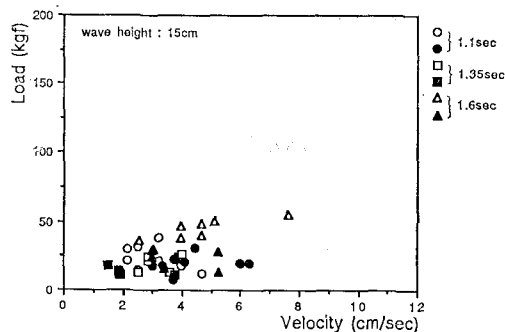


図-8 バッファCを用いた場合の衝撃力

a) 緩衝方式による衝撃力

図-7 はダイレクトの場合の衝突速度と衝撃荷重の関係である。コラム単体の場合(図-2)に比し、点のばらつきが大きいが、衝突荷重は概ね速度と比例関係にあるように読み取れる。

図-8 は、図-7 と同一条件下におけるバッファC(軟らかいバッファで、今回実験したものの中では最も効果が認められたもの)の場合で、無緩衝の場合に比し最大荷重は約1/3に低減する。また、コラム単体実験と異なるところは、バッファによる衝突速度の低減効果が認められることで、これはバッファによって初期衝突後のpitchingが抑えられることによると考えられる。また、図は省略するが、ばねに関してもばらつきがあるものの速度にはほぼ比例する結果が得られている。したがって、実際の場合も連成運動の結果としてのコラム先端部の衝突速度が予測できれば、衝撃力もかなりよい精度で予測できるものと考えられる。

b) 着底のタイミングと衝撃力

図-9 に示すように浮体の動揺の一周期の中央を0とし、-0.5~+0.5のどこで衝突したかによる着底のタイミングと衝

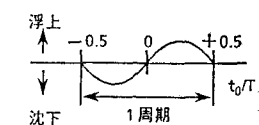


図-9 着底のタイミングの定義

撃荷重の大きさの関係を調べた。図-10は、ダイレクト着底の場合の例である。横軸にとった t_0/T (t_0 : 衝突時刻, T : 波周期) は、図-9 に示したタイミングで、 $t_0/T=0$ は浮体動揺運動が浮上方向に最大速度を持つ位相、 $t_0/T=\pm 0.5$ は沈下方向に最大速度を持つ位相である。図からわかるように、いずれの場合も一周期の両端すなわち沈下方向の速度が最大になる付近で衝突したとき、衝撃荷重も最大になる傾向を示している。また、図は省略するが、緩衝装置を取り付けた場合も、衝撃荷重の大きさが小さくなるだけで、全く同様の特性を示す。これから、設計時には沈降速度と動揺速度振幅の和によって最大衝突速度を求め、それに基づいて最大衝撃力を算定すればよいと思われる。

4. 結 語

中波浪時の海洋構造物の着底時衝撃力とその緩衝法に関する水槽模型実験を行った。この結果、着底時衝撃力は、衝突速度に支配されており、衝突部の衝突速度がわかれば、沈降時も含めてかなりの精度で予測できる。したがって、設計時には沈降速度と、動揺解析によって得られる動揺速度振幅の和によって最大衝突速度を求め、それに基づいて最大衝撃力を算定すればよいと思われる。ただし、構造物上の人々が着底時に不快なショックを感じる場合には、別途考慮する必要がある。その場合には着底による構造物の応答加速度が問題になる。これについては、解析による着底時の動揺シミュレーションも含め別の機会に発表したい。

本研究を進めるにあたり、清水建設(株)技術研究所田中正博、大山 巧の両氏には実験計画を含め貴重な意見を頂いた。記して深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 清川哲志・稲田 裕・中田博昭・荒井哲也 (1989): 浮上免震構造物の挙動の予測, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 759-763.