

ケーソン沈設過程の波浪中挙動

堀 沢 真 人* ・ 佐 藤 典 之** ・ 大 橋 裕 寿***
赤 村 重 紀**** ・ 坂 間 茂***** ・ 吉 倉 敬 治*****

1. 緒 言

防波堤や護岸の築造において、ケーソン据付作業は波浪の影響を最も受けやすい工種のひとつである。そのため、外洋等の波浪条件の厳しい海域ではケーソンの据付機会が著しく制限され、全体の建設工期を短縮できない要因となっている。今後の沖合人工島建設などにおいては、さらに厳しい海象条件下での施工となることから、据付作業の合理化が強く求められている。

現状では、据付時のケーソンの波浪中挙動が未解明なため、据付方法や使用機材の決定は経験的になされているのが実状である。合理的な施工を目指すためには、まずこの点を明らかにする必要がある。

これまでに、有限水深における浮体の波浪中挙動を対象とした多くの研究がある。しかし、それらは浮体底面と海底面の距離（ボトムクリアランス、以下 BC）が比較的大きい場合を対象としており、浮体の海底面との接触の影響や沈設過程の挙動について検討した事例はほとんどない。実際の据付作業で問題となるのは着底寸前のケーソンの動揺である。特に、マウンドとの衝突にともなうケーソンあるいはマウンドの損傷や、着底寸前に波の進行方向に大きくスライドする現象などにより据付作業が困難になるといわれている。

本研究では矩形ケーソンを対象とし、BC が小さい場合の模型実験を実施して、その動揺特性を把握するとともに、マウンドとの接触を考慮した動揺計算法の妥当性について検討した。さらに、沈設過程での計算を実施し、実際のケーソン据付時の動揺計測結果と比較した。また、これらの結果から合理的なケーソン据付の方法について考察した。

2. 模型実験

（1）供試模型

実験に使用した模型は、図-1 に示すように重量約 3,000 ton ケーソンの縮尺 1/20 のものであり、重量、重心位置等が実機に対応するように、鋼板、アクリル板およびベニヤ板からなる複合構造とし、底盤にコンクリートバラストを打設した。さらに、各隔壁の下部には $\phi 15$ mm の通水孔を設けた。

海底には鋼製の基礎マウンド模型を設置し、マウンドにおける水の透過およびケーソンとマウンドの抵抗係数を実機と相似にするため、ケーソン下方に位置するマウンド部には砂利を敷設した。ケーソン模型の諸元を表-1 に示す。

（2）実験方法

実験は、造波装置の付いた平面水槽（長さ 60 m、幅 30 m）において実施した。供試波は、波高 5 cm、周期 1.3~2.7 秒の規則波とし、模型の真横から入射させた。入射波高をサーボ式波高計で、ケーソンの動揺および波

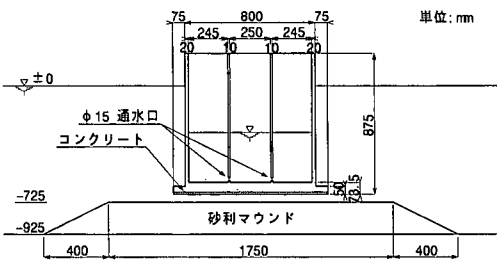


図-1 ケーソン模型断面図

表-1 ケーソン模型諸元

喫水	d (m)	0.700	0.450
長さ	L_c (m)	1.000	1.000
幅	B (m)	0.800	0.800
高さ	D (m)	0.875	0.875
排水量	W (kg)	582.0	377.0
重心高さ (m)	KG (m)	0.266	0.291
横メタセンタ高さ	GM (m)	0.155	0.046
慣動半径	(m)	0.346	0.346

* 正会員 東亜建設工業(株) 土木本部設計部
** 正会員 工修 東亜建設工業(株) 土木本部設計部
*** 正会員 東京電力(株) 千葉火力建設所 土木課長
**** 正会員 工修 東京電力(株) 富津火力建設所 第三土木課
***** 正会員 東京電力(株) 常陸那珂火力建設所 土木課副長
***** 正会員 東亜建設工業(株) 土木本部設計部長

漂流力を6成分運動計測装置で計測した。

ケーソンの喫水は、注水により 45.0 cm, 67.5 cm, 70.0 cm および 72.5 cm (喫水・水深比 $d/h=0.625\sim 1.0$) と段階的に変化させた。なお、模型の波による漂流を防ぐため、運動を拘束しない程度の軟らかいスプリングで保持した。

3. 理論解析の方法

ケーソンに真横から波が入射する場合を想定し、簡単のため二次元問題として扱う。運動モードを Sway, Heave, Roll とし、それぞれの変位量を y, z, ϕ で表す。

ケーソンは、BC が小さい状態で波が作用すると、マウンドに接触し動揺が制限される。この現象を考慮するため、図-2 に示すように、マウンドに接した時点で鉛直方向反力が作用するようなバネをケーソン底面の両端部に配置した。

この場合の運動方程式は (1) 式のように表すことができる。

$$\left. \begin{aligned} (M+m_{yy})\ddot{y}+N_{yy}\dot{y}+K_{yy}+m_{y\phi}\ddot{\phi}+N_{y\phi}\dot{\phi} \\ =F_{yy}+F_D \\ (M+m_{zz})\ddot{z}+N_{zz}\dot{z}+C_{zz}z+R_{zz}=F_{zz} \\ (I+m_{\phi\phi})\ddot{\phi}+N_{\phi\phi}\dot{\phi}+Ne_{\phi\phi}\phi|\phi|+C_{\phi\phi}\phi+K_{\phi\phi} \\ +R_{\phi\phi}+m_{\phi y}\ddot{y}+N_{\phi y}\dot{y}=M_{\phi\phi} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 M ；質量、 I ；Roll 慣性モーメント、 m ；付加質量、 N ；造波減衰力係数、 Ne ；粘性減衰力係数、 C ；復原力、 F ；波強制力、 F_D ；波漂流力、 K ；係留力、 R ；マウンド反力、 y ；Sway、 z ；Heave、 ϕ ；Roll である。

1 個のバネによるマウンド反力 R は、(2) 式によって与えられる。

$$\left. \begin{aligned} R=0 \quad (\delta \leq 0) \\ R=k\delta \quad (\delta > 0) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

$$\delta = -c - z + \frac{B_0}{2}\phi$$

ここに、 k ；マウンドのバネ定数、 δ ；マウンドの圧縮量、 c ；ボトムクリアランス、 B_0 ；ケーソンの底面の幅である。

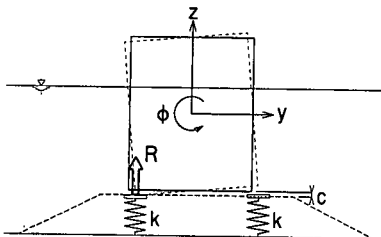


図-2 マウンド影響のモデル化

運動方程式には、粘性減衰力や非線形バネが含まれており、解析的に解くことは困難であるので、時間領域で積分することにより、各運動成分の時系列解を求める。

ケーソンに作用する付加質量、造波減衰力および波強制力は、伊藤ら (1972) の方法により求める。この方法は、領域分割法における無限級数項を省略したものであるが、水深に対し喫水が深い場合には厳密解と比較して十分な精度を有していることが確認されており、簡単な計算によって流体力が得られる利点がある。ただし、矩形浮体にしか適用できないため、フーティング付きケーソンでは流体力を修正する必要がある。ここでは、フーティング上の流体を浮体の一部とみなして Heave および Roll の付加質量に加算する方法 (藤田ら, 1983) によった。

粘性減衰力は、自由動揺実験から求めた。すなわち、Roll では、自由動揺実験から得られた減減曲線を (3) 式で近似し、(4) 式から求めた。

$$\left. \begin{aligned} \phi_n - \phi_{n+1} &= a\phi_m + b\phi_m^2 \\ \phi_m &= \frac{\phi_n + \phi_{n+1}}{2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

$$Ne_{\phi\phi} = \frac{3}{4}b \cdot \frac{180}{\pi} \cdot (I + m_{\phi\phi}) \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 ϕ_n ； n 回目の横揺れ角、 a, b ；減減係数である。ここでは、水深-3.5 m ($d/h=0.13$) の状態での自由動揺実験結果より求めた b 係数 (0.0175 1/deg) を用いた。

波漂流力は、規則波中では Maruo (1960) の理論式に水深影響を考慮して求める。不規則波中における波漂流力は、不規則波のゼロクロスから次のゼロクロス間を規則波の半周期とみなして、近似的に (5) 式で表現できるとする Hsu (1970) の仮定に基づいて計算した。

$$\left. \begin{aligned} F_{Dj} &= \frac{1}{8}\rho g H_j^2 R_j \\ R_j &= K_R^2 \left\{ 1 + \frac{4\pi h/L_j}{\sinh(4\pi h/L_j)} \right\} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 ρ ；流体比重、 g ；重力加速度、 F_{Dj} ； j 番目の波の漂流力、 H_j ； j 番目の波の波高、 R_j ； j 番目の波の漂流力係数、 K_R ； j 番目の波の反射率、 h ；水深、 L_j ； j 番目の波の波長である。

付加質量および造波減衰力係数は入射波の周期に依存するが、ここでは有義周期に対する値で代表させた。なお、沈設過程の計算では、後述するように、流体力および波漂流力は d/h によって大きく変化するため、計算の時間ステップ毎に計算しなおす。

4. 規則波中動揺特性

(1) 喫水による動揺の変化

沈設の各段階における Heave および Roll の実験結果を図-3 に示す。ここで、横軸は喫水水深比であり、波長幅比 L/B ($L=gT^2/2\pi$, g : 重力加速度, T : 波周期) ごとに動揺振幅を波高で無次元化して表示した。

これより、 d/h が大きくなるにしたがって、Heave, Roll とも動揺が小さくなっていることがわかる。ここには示していないが、Sway も同様の傾向を示す。

図-4 は、Heave の付加質量および Roll の付加慣性モーメントの計算結果であり、 d/h に対する変化として示した。また図-5 は、この付加質量より計算された Heave, Roll の固有周期 T_z , T_ϕ であり、自由動揺実験結果も示している。縦軸は固有周期に対応する波長とケーソン幅の比に相当する。固有周期の計算結果と実験結果はほぼ一致しており、ここでの付加質量の推定は妥当であることがわかる。

Heave の固有周期は、 d/h が大きくなるとともに漸増し、 d/h が 0.95 付近から急激に長くなっている。これは、

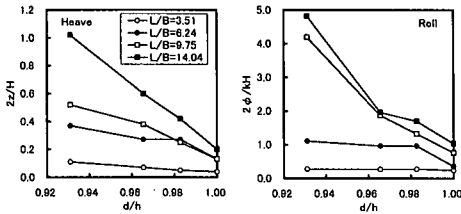


図-3 d/h による動揺の変化 (実験結果)

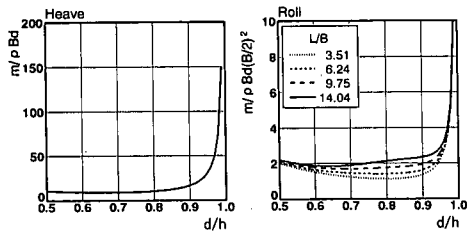


図-4 付加質量の計算結果

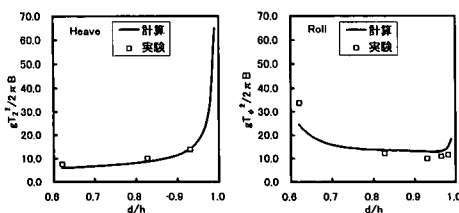


図-5 固有周期の計算結果および実験結果

各喫水状態で上下揺れの復原力が一定であるのに対し、質量が喫水とともに増大し、さらに d/h が 0.95 以降では急激に付加質量が増大するためである。 d/h の増加にともなう Heave の減少はこのことが原因しているといえる。

一方、Roll の固有周期は d/h が大きくなると短くなっている。これは、このケーソンの場合、喫水の増加とともにメタセンタ高さ GM が大きくなって、Roll の復原力が増大していくためである。ただし、 d/h が 0.97 付近から長くなる傾向にあり、付加慣性モーメント増大の影響が現れているが、Heave に比べ固有周期の変化は顕著ではない。よって、Roll の動揺減少の主因はマウンドとの接触によって動揺が拘束されることにあると考えられる。

(2) 実験結果と計算結果の比較

ここでは、沈設の各段階における実験結果と計算結果を比較し、本計算法における流体力およびマウンド影響のモデル化の妥当性について検討する。

d/h が 0.62 の場合について、Sway, Roll の実験結果と計算結果を比較したものを図-6 に示す。

横軸は波長・ケーソン幅比 L/B 、縦軸は動揺振幅を波振幅あるいは最大波傾斜 $kH/2$ (k : 波数, H : 波高) で無次元化して表示した。計算は二次元であり、マウンド天端を海底面とした一定水深としている。しかし、両者は一致しており、三次元影響やマウンド形状の影響は小さいことがわかる。

図-7 は d/h が 0.97 の状態での比較結果である。実験時の観察によれば、この状態ではケーソン底面がマウンドに接触していることが確認されている。計算結果はマ

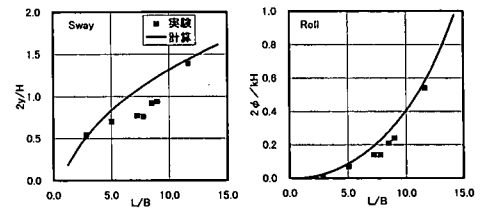


図-6 動揺の実験結果と計算結果の比較 ($d/h=0.62$)

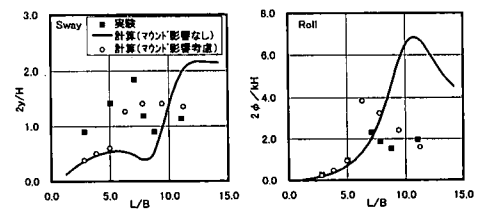


図-7 動揺の実験結果と計算結果の比較 ($d/h=0.97$)

ウンドとの接触の影響を無視した場合とケーソン底面両端下に線形バネをおいた場合の両者を示している。なお、マウンドのバネ定数は不明であるので、63~500 kg/m (617~4900 N/m)の間で数種変化させ、計算結果が実験結果に最も近い 125 kg/m (1225 N/m) のバネ定数とした。これより、前者の計算結果（実線）は実験結果と大きく異なっているのに対し、後者の計算結果（○）は実験結果に近いことがわかる。このことから、BC が小さい場合、ケーソンとマウンドとの接触を考慮することが不可欠であるといえる。なお、Heave では、マウンドとの接触を考慮しない場合でも実験結果との対応は良好である。

5. 波漂流力特性

波漂流力の計算結果と実験結果を比較したものを図-8 に示す。計算ではマウンドとの接触の影響を考慮していないが、実験結果と計算結果の対応は良好である。

図-9 は d/h に対する波漂流力の変化を示したものである。波漂流力は、 d/h によって大幅に変化し、そのピークは波周期が長くなるほど BC が小さい位置で発生する。すなわち、波周期が長い場合、沈設の最終段階に大きな波漂流力が作用することになる。うねりのなかでのケーソン据付作業において指摘される「着底寸前に波下側へ大きくスライドする現象」はこの波漂流力に起因しているものと考えられる。

6. 沈設過程のケーソンの挙動

図-10 は模型実験で対象としたケーソンにおいて、5 分間で喫水を 12.5 m から 14.5 m（マウンド天端-14.5

m) に直線的に変化させた場合の計算結果である。波高 1 m、周期 10 秒の規則波が作用しているとし、引船にナイロンロープで繋がっている状態を想定して、ケーソンをロープの変位張力特性と等価な線形バネで係留した。横軸が時間であり、上段から Sway, Heave, Roll である。これより、BC が小さくなるにしたがい Heave および Roll が急激に小さくなっているが、Sway はあまり変化していないことがわかる。

つぎに、ケーソン動揺の現地計測結果と計算結果との比較を行う。

現地計測は、仮置きのために注水により沈設する状態 ($d/h=0.93\sim1.0$) について行い、Surge, Sway, Heave をリアルタイムキネマティック方式の GPS (トプコン社製) で、Roll, Pitch を慣性測定装置 (トキメック社製)

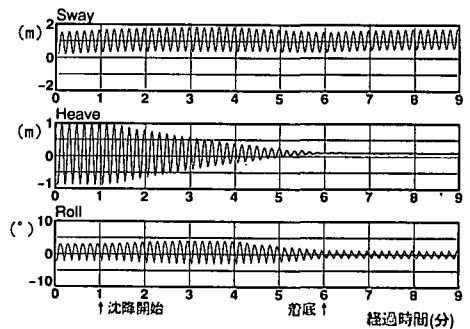


図-10 沈設過程の動揺計算結果（規則波中）

表-2 ケーソンの諸元および計測時の状況

ケーソン		波 浪	
長さ (m)	20.4	$H_{1/3}$ (m)	0.69
幅 (m)	16.2	$T_{1/3}$ (sec)	6.78
深さ (m)	16.0	波向	90° (横波)
マウンド天端 (m)	-13.0		

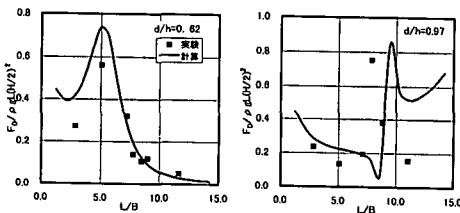


図-8 波漂流力の計算結果と実験結果の比較

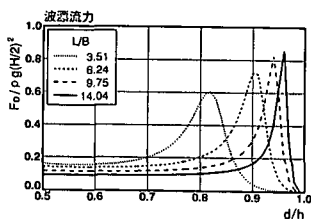


図-9 喫水・水深比と波漂流力の関係

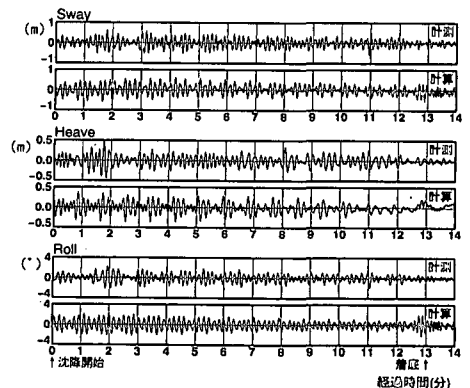


図-11 沈設過程の現地計測結果と計算結果の比較

で計測した。ケーソンの諸元および計測時の状況を表-2に示す。

図-11は、沈設開始から終了までの動揺の計測結果と計算結果を比較したものである。動揺の計測結果は、引船等によるケーソンの位置決め操作が含まれているため、周期30秒のローカットフィルタによって波による動揺成分のみを抽出した。計算では、計測された水位変化の時系列をそのまま入力として用い、マウンドのパネ定数を1000 tf/m (9800 kN/m)とし、計算結果からドリフト成分を除いて表示している。

計測結果はどの動揺モードも沈設とともに小さくなっているが、計算結果も同じ傾向を示しており、本計算法によって実際の現象を概ね説明できることがわかる。ただし、計算では計測結果にみられない着底直前の動揺の増大が現れている。これは、マウンドのパネ定数の設定に問題があると考えられるため、数種のパネ定数について計算を試みたが、改善はみられなかった。また、ここには示していないが、計測結果では着底後の注水により最終的にSwayがなくなるが、計算では動揺が減少しない。これはケーソン底面とマウンドとの摩擦力が作用するためであり、最終的なスライド量の予測などのためには、この摩擦力を考慮することが必要である。

7. 合理的な据付作業のための方策

以上のことから、合理的な据付作業を行うためには次の点に留意する必要があると考えられる。

① マウンド上ではBCをできるだけ小さくして、ケーソンのHeaveやRollを抑制した状態で作業を行うべきである。すなわち、ケーソンをマウンド上に曳航する過程では、ケーソンも激しく動揺しているので、マウンド端部との接触を避けるため、ある程度BCが必要となるが、その後はできるだけ早く注水してBCを小さくすることが肝要である。

② 着底作業は、沈降とともに波漂流力が大きく変化するので、急激に沈降させるのではなく、段階的に沈降させ、各段階で波漂流力によるドリフト分を修正しながら沈設を行うのがよい。

8. 結 言

水理模型実験によって、ケーソン沈設過程の波浪中動

揺特性を明らかにするとともに、ケーソン沈設過程の動揺計算法を開発した。本研究で得られた主要な知見を以下に示す。

① BCの減少とともに、ケーソンの動揺は小さくなる。これは、Heave, Rollの場合、BCが小さくなると付加質量が急激に大きくなり、その結果、固有周期が長くなるためである。ただし、Rollではそれだけで説明することはできない。ケーソン底面とマウンドとの接触の影響を考慮する必要がある。

② マウンド影響をマウンドに接した時点で反力が作用するパネで近似した計算モデルはほぼ妥当な結果を与える。ただし、計算にあたり、適切なパネ特性を設定する必要があるが、その合理的な設定法は今後の課題である。

③ 波漂流力は、波周期が長い場合、着底寸前で急激に大きくなる。実際の据付作業で指摘されている着底直前の波下側へのスライド現象は、このことが原因していると考えられる。

④ 以上の点を考慮した沈設過程の計算により、実際の現象を概ね説明することができる。

⑤ BCが小さい場合の計算では、さらにケーソン底面とマウンドとの摩擦を考慮することが必要である。そのためには、動的な摩擦特性について検討する必要がある。

なお、模型実験は、東京電力・東亜建設工業・五洋建設・エムイーシーエンジニアリングサービスが共同で実施したものである。また、現地計測にあたっては東京電力常陸那珂火力建設所、東亜建設工業東電常陸那珂工事事務所の方々の協力をえた。ご協力いただいた方々に謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 伊藤喜行・千葉 茂 (1972): 浮防波堤の水理に関する近似理論と応用, 港湾技術研究所報告, 第11巻第2号, pp. 137-166.
- 藤田良一・坂東浩造・志岐 明・中込國喜・利穂吉彦 (1983): 矩形構造物の動揺および係留に関する研究, 第30回海岸工学講演会論文集, pp. 445-449.
- Maruo, H. (1960): The drift of a Body Floating on Waves, Journal of Ship Research, Vol. 4, No. 3, pp. 51-60.
- Hsu, F. A. and Blenkarn, K. A. (1970): Analysis of Peak Motion Forces by Slow Vessel Drift Oscillations in Random Seas, OTC paper No. 1159, pp. 1135-1146.