

超大型円柱橋脚に係留された作業台船の動揺特性 に関する実験的研究

岡野 哲*, 山根 彰**, 久宝啓作***, 平野廣和****

1. まえがき

近年、海峽部に長大橋梁を建設する計画が各所で進められ、橋脚に代表される超大型基礎構造物が設置されるに至っている。ところで、海峽部橋梁の特徴は、経済的な面から狭さく部に架設されることが多いこと、このため潮流・波の方向が橋軸に直角方向になること、さらに吹送距離等も長くなることなどから、潮流・波等の自然条件が非常に厳しくなることである。このため、建設に際しては、これらの条件に適した各種の工法の検討がなされている。しかし、これらの構造物は着底式であることが多いので、この場合、設置後、波の反射や後流渦等の流体運動の影響を受けやすいことになり、構造物周辺での流体場を大きく乱すことが予想される。

一方、海峡部において橋梁架設工事等を行う場合は、設置された橋脚の所定位置に、デッキバージタイプの作業台船を接岸・保留して、橋梁部材等の重量物を降ろす水切り作業が必要となる。これら一連の作業を安全かつ敏速に行うためには、流体場の乱れから生じる作業台船の動揺特性を正しく推定することが、作業の安全性を確保する上で必要不可欠なことである。

しかし、従来の研究ならびに工事実績には、厳しい自然条件下における超大型基礎構造物周辺での水切り作業に関する検討や経験が少ないのが現状である。

以上の観点から、本報告では、着底式超大型円柱橋脚を対象とし、この回りにデッキバジタイプの作業台船を係留した状態における水槽実験を行い、作業の稼働に大きな影響を及ぼすと考えられる上下運動と上下加速度ならびに水平面内運動に着目し、これらが総合的に小さくなるような係留位置及び海象条件について検討した。

2. 実験の概要

本実験は、所定の海象条件下において超大型円柱橋脚

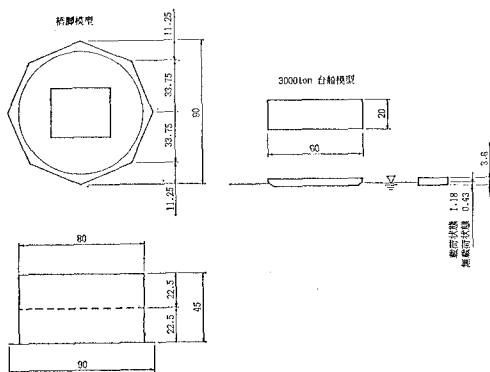
(実機直径 80m) の回りに、積載重量 3,000 t 級のデッキバジタイプ¹⁾の作業台船を係留した状態で、重量物の水切り作業を行う場合を想定した。

(1) 相似則

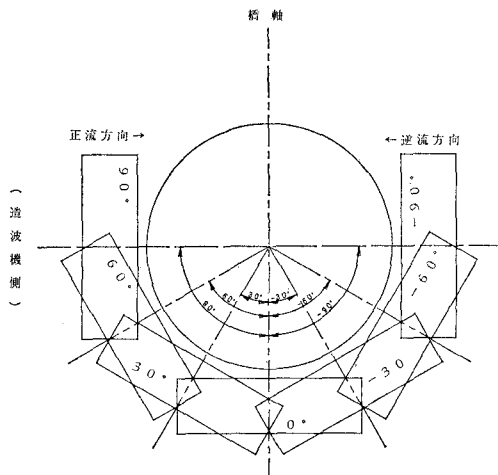
本実験での台船運動は、重力の影響が支配的と考えられるので、フルードの相似則に従うこととした。

(2) 供試模型

台船ならびに橋脚模型の概略形状寸法を図-1 に、主要目表を表-1 にそれぞれ示す。模型と実機との縮尺は、実験水槽の寸法及び実験精度等を考え併せて、実機



図一1 概略形状寸法 (実機寸法: m)



图一2 台船係留位置

* 正会員 工修 本州四国連絡橋公団 第一建設局垂水工事事務所
技術課長

正会員 本州四国連絡橋公団 第二管理局維持施設第一部
計画課

*** 正會員 工修 三井造船(株) 昭島研究所運動研究室

*** 正會員 工博 三井造船(株) 鉄構土木事業部鉄構技術部

との縮尺比を1:30とした。

台船の諸元については、現存台船に関する調査を行い、この結果より決定した。模型の材質は、硬質ポリウレタン・木・アルミのハイブリッド構造である。積載重量物は、橋梁部材を対象とし、実機高さは12.5m、実機重量は約850tfとした。

慣動半径は、復元用バネを利用した慣動半径計測装置によって合わせ、固有振動周期（上下揺、縦揺、横揺）は、平水中において台船を無係留の状態にして計測した。

橋脚模型は、鋼製とし、これにアルミ製の作業用足場を取り付けた。台船の係留方法としては、最も簡単な係留方法である2点係留方法とした。また、橋脚の係留点は、台船デッキ面とはほぼ水平となるような位置とした。係留ロープの初期張力は、平水中において、台船と橋脚に設置された作業足場とが若干触れる程度に調整した。この時の初期張力は、実機換算で約5tfである。

(3) 実験水槽

水槽は、三井造船(株)昭島研究所の潮流水槽（全長：70.8m、幅：8.0m、水深：0.5～2.5m）を使用した。同水槽は、プランジャー式造波装置によって規則波及び不規則波の造波が可能となっている。また、水流は船用スラスターを利用した潮流発生装置により、往復流の発生が可能となっている。

(4) 実験条件

実験は、潮流中、波浪中及び潮流＋波浪中の3状態について、潮流速度2KT、4KT、6KT・有義波高0.5m（不規則波）・平均波周期4.5,6秒で行った。台船の係留位置は、図-2に示すように流れに直角方向を0°とし、時計回りに-90°から90°まで30°ごとに变化させた。これらのパラメータの組み合わせは、表-2に示す通りである。また、計測項目及び使用計器は次の通りである。尚、実験概略図を図-3に示す。

① 作業台船の運動

作業台船の6成分の運動（上下揺・縦揺・横揺・前後揺・左右揺・船首揺）は6分力動揺計測装置を台船のデッキ上に取り付けた状態で計測した。

② 作業台船の加速度

作業台船の加速度（前後・左右・上下）はキャラメル型の3軸加速度計を作業台船模型積載貨物天端に取り付けて計測した。加速度計設置高さは、作業台船デッキ面から実機換算で12.5mである。

(5) 実験方法

① 潮流中実験

潮流中実験では、予め台船が無い状態で所定の潮流速度になるように水流発生装置を調整し、流速が定常状態に達した後、所定の計測項目について計測を開始した。

② 波浪中実験

波については2次元不規則波とし、本実験では波スペクトラムとして Pierson-Moskowitz の変形スペクトラムである ISSC-2型を用いた。不規則波の検定は、橋脚

表-1 主要目表

	項 目	実機計画値	模型計画値
橋 脚	直 径 (m)	80.0	2.667
	高 さ (m)	45.0	1.50
	喫 水 (m)	38.0	1.267
作業台船	長 さ (m)	60.0	2.0
	幅 (m)	20.0	0.677
	深 さ (m)	3.6	0.12
	排水量 (t, kg)	1270.0	47.4
	上下揺 T_z (s)	6.7	1.23
	縦 揺 T_θ (s)	3.1	0.56
	横 揺 T_ϕ (s)	5.3	0.97

表-2 パラメータの組み合わせ

実験種類	係留位置 (deg)	潮流速度 (knots/ (m/s))	有義波高 (m)	平均波周期 (s)
潮流中実験	-90, -60, -30	2, 4, 6	—	—
	0, 30, 60, 90	(0.19, 0.38, 0.56)	—	—
波浪中実験	-90, -60, -30	—	0.5	4, 5, 6
	0, 30, 60, 90	—	(0.017)	(0.730, 0.913, 1.10)
潮流＋波浪中実験	-90, -60, -30	2, 4, 6	0.5	4, 5, 6
	0, 30, 60, 90	(0.19, 0.38, 0.56)	(0.017)	(0.730, 0.913, 1.10)

注：（ ）内は実験値を示す。

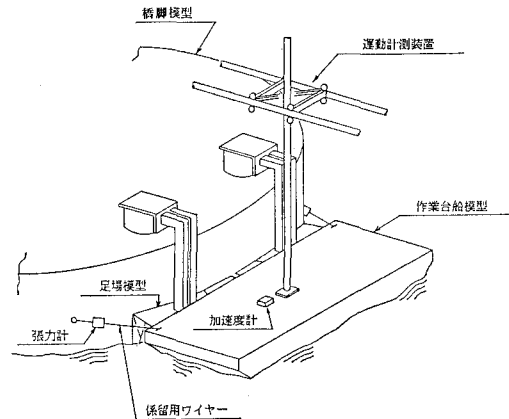
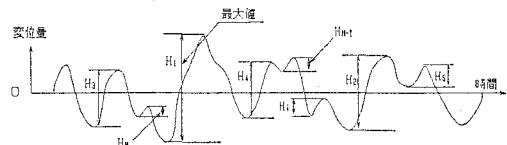


図-3 実験概略図



(注) 有義波: $H_{1/3} = \frac{1}{N/3} \sum_{i=1}^{N/3} H_i$

図-4 データ解析法

模型の前方（造波機側）7.0 m の位置にサーボ式水位計を設置し、作業台船無しの状態において、有義波高・平均波周期が実機の設定波浪条件に一致するように造波機を調整し行った。計測は、造波開始後波が橋脚模型部を数波通過した段階から計測を開始した。

③ 潮流+波浪中実験

潮流+波浪中実験は、潮流を起こした状態に、波浪中実験の場合と同様の造波状態で造波し、波と流れは線形重ね合わせができるものとした。計測は、所定の潮流速度を発生させ、速度が定常状態に達した後、波浪中の実験に先立って検定した波を重ね合わせ、波が数波橋脚模型部を通過した段階から計測を開始した。

（6）解析方法

計測した時系列データは、30 Hz のフィルターを通した後、50 Hz で2分間のデータをサンプリングした。この約6000個のデータを図-4 に示すように、隣り合う山の極大値と極小値をそれぞれ計算し、サンプリングした全データを全て大きい順にソーティングした後、大きい方から1/3のデータを平均化して有義値を求めた。

3. 実験結果及び考察

図-5～図-6 に作業台船の運動（上下揺・縦揺・横揺・水平面内運動）及び加速度（前後・水平面内）の有義値を示す。実験結果は、定常外力と非定常外力との共存した状態における値であるため、全て有次元値（運動及び加速度の両振幅）で示した。尚、水平面内運動は以下の式で定義した。

$$\text{水平面内運動} = \sqrt{(\text{前後運動})^2 + (\text{左右運動})^2}$$

（1）潮流中実験の運動及び加速度

潮流中における上下運動及び加速度は、図-5 と図-9 に示すように潮流速度が増加するにつれてほぼ比例して増加している。また、作業台船の係留位置による影響はほとんど見られない。上下運動がこのような特性を示すのは、潮流が橋脚や台船からの渦の影響を受けて“波動状態”となり、上下運動の起振力として作用したためと思われる。一例として潮流速度2 KT, 4 KT, 6 KT の場合における上下運動の時系列データを図-11 に示す。いずれの流速の場合も運動周期は約1.6秒であり、表-1 に示す上下揺の自由動揺周期1.23秒に近い周期で運動している。また、流速6 KT の場合における時系列から明らかのように、長周期の運動も見られる。この周期は約16秒であり、橋脚模型のストロハル数を0.2とした時のカルマン渦の流出周期とほぼ一致していることから、この長周期の上下運動はこの渦によるものと考えられる。

縦揺運動は、図-6 に示すように全体的に潮流速度の増加に伴い、ほぼ比例して運動変位も大きくなる傾向が見られるが、係留位置によって若干異なり、30° 付近が

大きくなるようである。これは、潮流による波動が橋脚回りで回折し、ほぼ30° 付近で台船に対して、“縦波状態”となることによるものと思われる。

横揺運動は図-7 に示すように、上下揺・縦揺運動と同様に潮流速度にほぼ比例する傾向を示している。また、係留位置の違い及び運動変化に与える影響は、-90° の6 KT の場合を除き顕著な傾向は見られない。ここで-90° の位置の運動変位が若干大きくなるのは、この付近では波動が橋脚の影響をあまり受けず、直接台船に作用するため、台船に対して“横波状態”となることによる。

水平面内運動については図-8 に示すように、係留位置によって前後・左右運動が起こり易い位置と起こりにくい位置があり、例えば0° の場合は本係留方式では前後運動が起こり易いが左右運動は起こりにくくなっている。両者が起こり易いのは30°、-30°、-90° 付近であり、ここで水平面内運動が大きくなったと思われる。但し、加速度については、図-10 に示すように係留位置の違いによる影響はほとんど見られない。

（2）波浪中実験の運動及び加速度

波浪中（有義波高：0.5 m, 平均波周期6秒）における上下運動は、図-5 から係留位置 -30°～90° の付近が-60°～-90° 付近に比べ約20～50% ほど大きくなっている。これは、MacCamy & Fuchs(1954)の理論解によると、係留位置90°～0° 付近の波高分布が大きくなり、0°～-90° 付近で小さくなることから想定できる。尚、本条件下における箱型台船の上下運動の応答は波高に比例することが、(社)日本造船研究協会(1982)の文献よりも明らかである。しかし、加速度については、運動のような係留位置による顕著な違いは見られない。

縦揺運動は、図-6 に見られるように、係留位置による影響を顕著に受け、0° 付近で最大、90° と -90° 付近で最小となっている。これは、橋脚回りの波高分布の影響よりも台船に対する波の入射波の影響の方が強く受けることを示し、このため0° 付近で台船は“縦波状態”となり運動が大きくなったものと考えられる。

図-7 の横揺運動についても係留位置による影響を強く受け、90° 付近で最大となっている。これは台船が横揺運動に対して90° で“横波状態”となるためである。但し、-90° の場合は橋脚によって波が遮断され、波高が減衰することから、横揺運動は最小となっている。

水平面内運動については、0° と90° が最大を示し、-90° が最小となっている。これは、前後・左右運動が波高に比例することから、波高の大きくなる0°～90° 付近が大きくなったと考えられる。このため、図-10 に示す対応する加速度もほぼ同様の傾向を示している。

（3）潮流+波浪中実験の運動及び加速度

潮流+波浪中実験の上下運動は、図-5 に示すように

波浪中実験の挙動とほぼ傾向が一致しており、本条件下において、上下運動は潮流よりも波浪の方が支配的であることがわかる。ここで、潮流+波浪中実験の結果ならびに潮流中実験と波浪中実験の結果とを足し合わせて比較すると、潮流+波浪中実験の場合より波浪、潮流による結果を各々足し合わせた方が若干大きくなっている。これは前述のように、流れを起こした状態で波浪中の実験と同様な振幅で造波板を動かして造波したため、潮流の影響により、波浪中のみのときと比べ波高が小さくなるからである。尚、上下加速度については、潮流中、波浪中実験同様、係留位置による顕著な影響は見られない。

一方、縦揺・横揺運動については全体的に上下運動同様であるが、縦揺運動については 0° の場合、横揺運動については 90° の場合で傾向が異なり、波浪中実験の場合の方が潮流+波浪中実験の場合より顕著に運動が増大している。この理由としては、波と流れが同一方向の場合、流速が速くなるにつれて波高が減少することが知られており、潮流の影響が支配的となった結果、波浪中実験の場合より運動が減少するものと考えられる。また、波と流れの方向が逆の場合には、運動ならびに加速度ともに波浪中実験の場合よりかなり減少している。これは、堀川ら(1977)や野村(1977)の研究からも明らかなように、一般的には流れの方向と波の進行方向とが逆の時は、波高は一旦高くなるが、波形勾配が大きくなり過ぎて碎波することから、みかけの波高が減少するためと思われる。

記号	潮流 (kt)	平均波周期 (S)	有義波高 (m)
▽	2	—	—
○	4	—	—
△	6	—	—
●	4	6	0.5
▲	6	6	0.5
■	-2(逆流)	5	0.5
◆	—	6	0.5

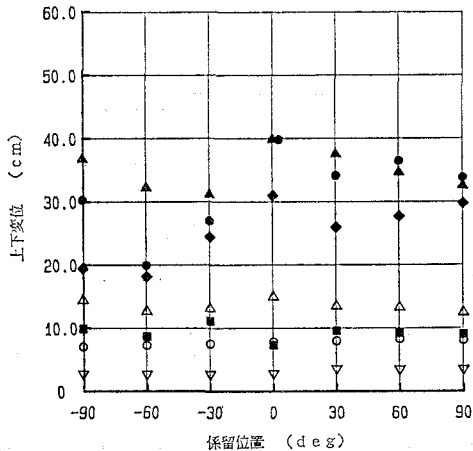


図-5 上下運動の有義値

水平面内運動は、 -90° と 30° の場合が大きく 60° と 90° の場合が小さくなっている。潮流+波浪中においては、潮流のみ(6 KT)の場合とほぼ同様の傾向を示して

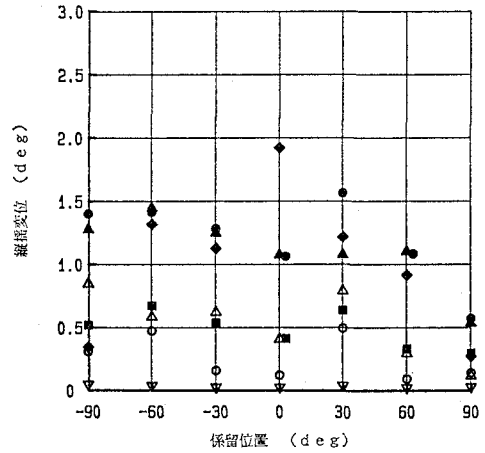


図-6 縦揺運動の有義値

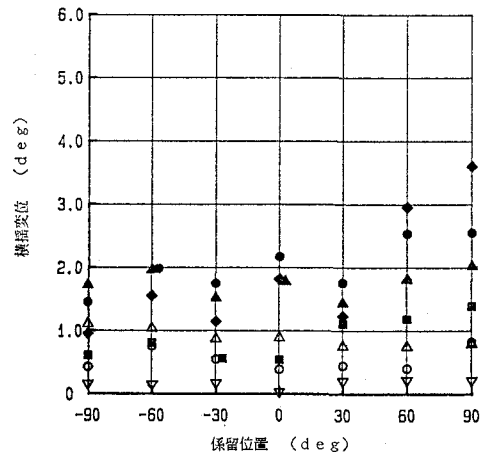


図-7 横揺運動の有義値

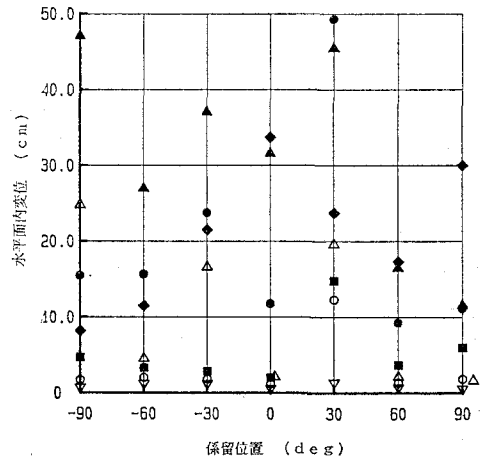


図-8 水平面内運動の有義値

おり、本実験内では波よりも潮流の影響が強く現れている。これは定常外力である潮流が、水平面内運動の支配

的な要因であることより明らかである。尚、 -90° と 30° の場合が大きくなるのは潮流中運動に述べた理由による。

4. ま と め

本実験により明らかになった点を要約すると次のようにまとめられる。

(1) 円柱橋脚近傍に係留された作業台船は、橋脚の影響によって複雑な挙動を示し、従来の船舶の非攪乱場における運動応答からは想定しにくい特性を明らかにすることができた。

(2) 水切り作業に適当な係留位置ならびに海象条件を考察すると、波が支配的な場合は、 0° から -60° (波の卓越方向に対して 90° から 150°) 付近が適すると考えられる。また、潮流が支配的である場合には、特に係留位置を特定する必要がないと考えられる。

ところで、一般に海峡部における潮流は、潮汐流が主となり、往復流となるので、この点も含めて水切り作業に適当な係留位置を選定する必要がある。これら総合的に判断すると、係留位置 0° 付近が適すると考えられる。

参 考 文 献

- (社)日本造船研究協会 第179研究部会 (1982): 箱型海洋構造物の運動特性及び係留システムに関する研究報告書。
 野村直茂 (1977): 流れと波が共存する場における流体力の評価について、本四技報, No. 2, pp. 22~27.
 堀川清司・北沢 修・中川雅彦・水口 優 (1977): 流れと波が共存する場における流体力について (2), 第24回海岸工学講演会論文集, pp. 347~351.
 MacCamy, R. C. and R. A. Fuchs (1954): Wave forces on piles; a diffraction theory, Tech. Memo., No. 69, Beach Erosion Board, pp. 1~17.

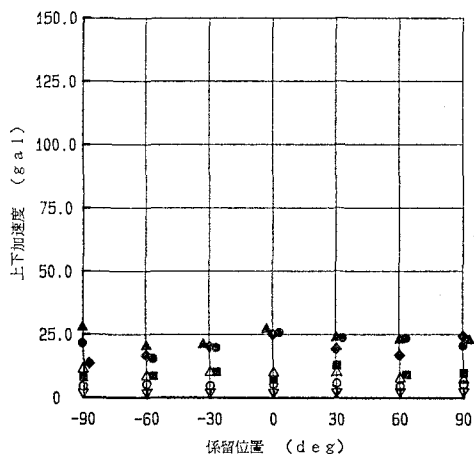


図-9 上下加速度の有義値

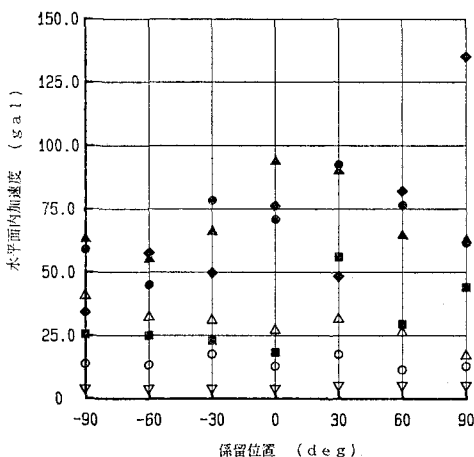


図-10 水平面内加速度の有義値

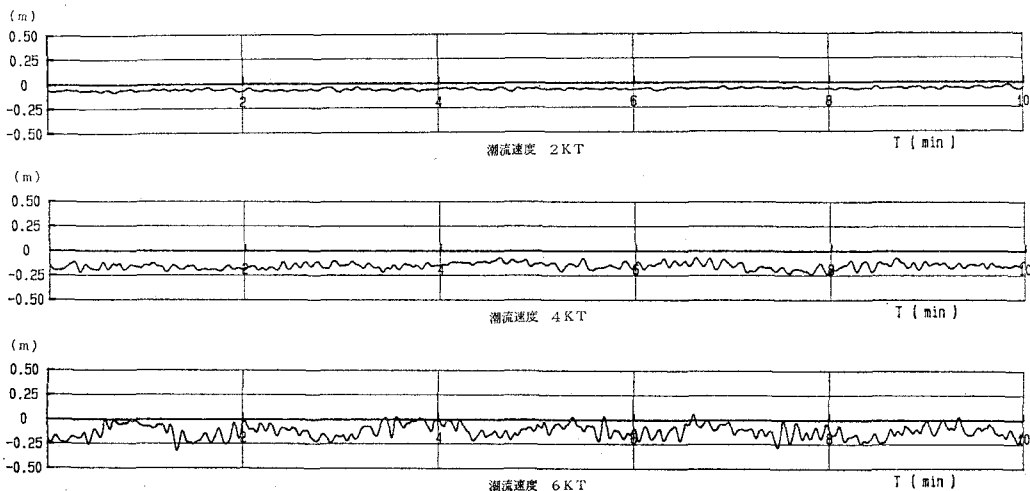


図-11 潮流中実験における上下運動の時系列データ