

独立カラム型浮体橋梁の波浪応答特性に関する研究

Wave Response of Bridges with Independent Column-type Floating Foundations

渡邊 英一*・宇都宮智昭*・相馬 武征**

Eiichi Watanabe, Tomoaki Utsunomiya and Takemasa Souma

Floating bridges with independent column-type floating foundations have been studied in this paper. Wave response analyses of the proto-type floating bridges (Bergsoysund bridge, Norway) have been performed, and the effect of arch-action of the horizontal arch system has been examined. In the analysis, the interaction effect of the elastic deformation of the structural system with fluids are included. The analytical results have shown that the dynamic fluid-structure coupling effect of the floating foundations is essentially important, and this influences much not only on the vertical responses but also on the horizontal responses.

Keywords: floating bridge, floating foundation, wave response, fluid-structure interaction

1. はじめに

沖合海洋施設へのアクセス法,あるいは長距離海峡横断の手段の一つとして,浮体橋梁がある。浮体橋梁は,特に大水深域あるいは軟弱地盤のため基礎の設置が困難な海域等において有効と考えられるが,従来の橋梁に比べて波浪による影響が大きく,特に波浪作用時における動的応答を考慮しなくてはならない。そこで本研究では,ノルウェーですでに供用されている Bergsoysund 橋¹⁾(図1参照)を取り上げ,日本近海のようなより波浪条件の厳しい海域においても同様な浮体橋梁が適用可能かどうかを検討することを目的とする。既報²⁾においては,鉛直応答に及ぼす浮体基礎形状の効果について検討したが,本報では,主として水平波力に対する応答に着目し,水平力に対する抵抗を目的として採用されている水平アーチ機構の効果について数値解析により検討を加えることにした。

まず, Bergsoysund 橋と同じ浮体基礎形状を取り上げ,3次元 FEM 解析プログラムによりこれに作用する波力ならびに流体力係数の算出をおこなう。次に,波浪などによる水平力をアーチ機構により軸力に変換する形式の水平アーチ型の浮体基礎橋梁について,それぞれの浮体基礎に作用する波力について,その変位応答や断面力応答を算定する。ここで,アーチ機構による水平力支持の効果を調べるため,ライズ比をパラメータとし,これを变化させたものに対して波浪応答解析をおこなった。

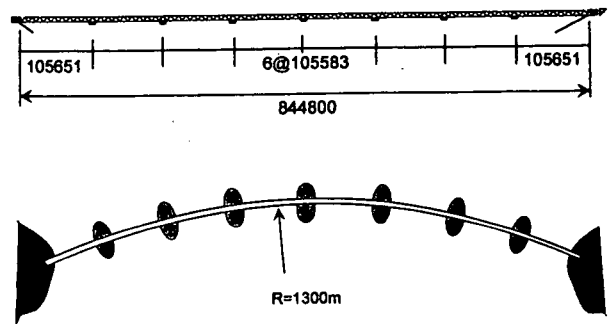


図1. Bergsoysund 橋の側面図および平面図

2. 解析モデルの設定

本研究では,上述の Bergsoysund 橋をプロトタイプとし,解析モデルの設定をおこなう。下部工である浮体基礎部は,実橋のものと同型の小判型を採用し,3次元有限要素法プログラムにより強制波力および流体力係数を算定する。上部工に関しては,まず実橋と同じ曲率半径を有するモデルを設定した。ただし実際の Bergsoysund 橋はトラス構造であるが,ここでは簡略化のため,曲がり梁モデルを考える。次にアーチ形状を示すライズ比をパラメータに用いて,直線を含む6つの異なる曲率半径を有するアーチ形状をモデル化した。

* 正会員 京都大学大学院工学研究科土木工学専攻(606-01 京都市左京区吉田本町)

** 正会員 東亜建設工業株式会社

2.1 下部工（浮体基礎部）

モデルの概略図を図 2 に、その諸元を表 1 に示す。浮体基礎単体に作用する波力、及び浮体基礎と流体の動的相互作用により生ずる付加質量並びに造波減衰を、線形回折波理論に基づく任意形状 3 次元 FEM プログラムにより算出した。本プログラムでは、Park らによる無限要素^{3),4)}を採用している。なお、本解析においては、浮体基礎間および陸域との相互干渉効果については考慮せず、無限海域での値を算出した。解析に使用した FEM 要素分割(平面図)を図 3 に示す。なお、水深は 20m とし、z 方向は水面から浮体下部高さまで ($z=-4\text{m}\sim 0\text{m}$) を 2 層、浮体下部高さより水底まで ($z=-20\text{m}\sim -4\text{m}$) を 2 層のあわせて 4 層に分割した。

静水圧的復元力は弾性バネとしてモデル化した。そのバネ定数は浮体の対称性から、z 方向のバネ定数 k_{33} 、x 軸回りの回転バネ定数 k_{44} 、y 軸回りの回転バネ定数 k_{55} のみを考えればよい。

2.2 上部工

Bergsoysund 橋の主要諸元を表 2 に示す。これを、両端でピン支持され、浮体基礎部において、z 軸方向（鉛直方向）および x 軸、y 軸回りの回転方向に弾性支持された曲がり梁としてモデル化した。モデル化した梁の諸元を表 3 に示す。構造解析においては NASTRAN を使用し、直接周波数応答解析により変位応答及び断面力応答を算定した。NASTRAN へのモデル入力において、曲がり梁部は 32 等分し、それぞれ弾性曲がり梁要素によりモデル化した。浮体基礎部においては、浮体基礎自身の質量・慣性モーメントに加えて、流体との相互作用により生ずる付加質量マトリクスおよび造波減衰マトリクスを DMIG(Direct Matrix Input at Grid point) 命令により入力した。

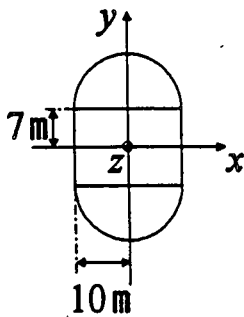


図 2. 浮体基礎の平面図

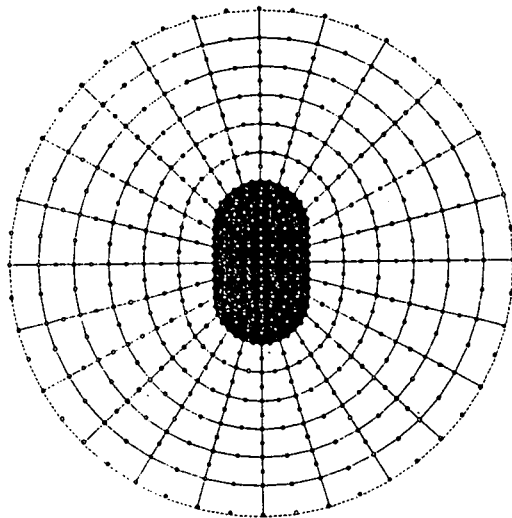


図 3. FEM 要素分割図

表 1. 浮体基礎部の諸元

断面積 A (m^2)	594.2
喫水 d (m)	4.0
没水体積 (m^3)	2,376
重量 (tonf)	1,300

表 2. Bergsoysund 橋の主要諸元

全長 (m)	845
ポンツーン数 (函)	7
ポンツーン間隔 (m)	105
トラス高さ (m)	7.0
幅員 (m)	11.2
鋼管トラス直径 (m)	0.95~1.2
肉厚 (mm)	35~55
鋼重 (tonf)	6,250
床板重量 (tonf)	1,352

表 3. 曲がり梁モデルによる諸元

断面積 (m^2)	0.5822
水平軸回りの断面 2 次モーメント (m^4)	7.131
鉛直軸回りの断面 2 次モーメント (m^4)	18.26
梁密度 (ton/m^3)	15.48
梁体積 (m^3)	491.9
梁重量 (tonf)	7,602
ねじり定数 (m^4)	30.0

3. 解析結果および考察

3.1 固有値解析

橋梁全体系に対して固有値解析をおこなった結果を表 4 に示す。なお、本固有値の算出にあたっては、浮体基礎の($k_0=0.1\text{ m}^{-1}$ に対する)付加質量のみを考慮した。同表中の Rise ratio number は 0 が直線梁を 3 が基準モデルをあらわし、あとは、ライズ比に関して等間隔となっている。表 4 にみられるとおり、直線梁の場合には 1 次固有振動数(水平 1 次モード)が他と比べ著しく小さくなっているが、これは浮体基礎の付加質量の効果のためである。また、 $k_0=0.1\text{ m}^{-1}$ の時、 $\omega=0.9736\text{ rad/sec}$ 、 $k_0=0.2\text{ m}^{-1}$ の時、 $\omega=1.40\text{ rad/sec}$ であり、基準モデルにおいては $k_0=0.2\text{ m}^{-1}$ において 3 次モードの振動が励起される可能性が高い。

表 4. 固有円振動数(rad/sec)

Rise ratio number	Mode number							
	1	2	3	4	5	6	7	8
0	0.1831	0.7314	1.5012	1.8165	2.2148	2.2591	2.4410	2.8700
1	0.5719	0.7489	1.5391	1.9110	2.2226	2.2687	2.4597	2.9048
2	0.7340	1.0012	1.5606	2.1564	2.2232	2.2640	2.4542	2.8832
3	0.7126	1.2569	1.5641	2.2140	2.2571	2.4288	2.5811	2.8460
4	0.6677	1.4165	1.6400	2.2053	2.2422	2.4129	2.7433	2.8219
5	0.6095	1.3655	1.8599	2.1931	2.2219	2.3836	2.5913	2.7466

3.2 鉛直応答変位

波数 $k_0=0.1\text{ m}^{-1}$ 、 0.2 m^{-1} について、単位片振幅波高入射時の鉛直応答変位の結果を図 4 に示す。ライズ比を変化させたときの鉛直応答変位は、直線梁の場合、ともに大きな値をとっているのがわかる。 $k_0=0.2\text{ m}^{-1}$ ($\omega=1.40\text{ rad/sec}$) の時には表 4 よりライズ比の大きい時に 2 次モードの振動が励起されると考えられるが、実際、図 4 においてそのような傾向が得られており、 $k_0=0.2\text{ m}^{-1}$ においてライズ比の大きなところで鉛直変位が大きくなっているのは 2 次モードでの共振によるものと考えられる。また、図中には静的に鉛直波力を与えた場合も比較として示したが、明らかに動的応答による応答拡大が読み取れる。

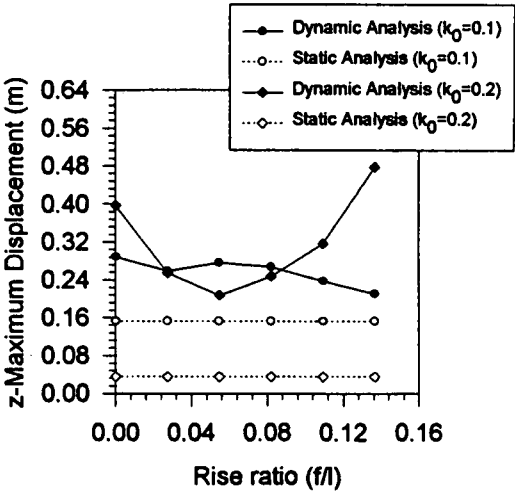


図 4. ライズ比と最大鉛直応答変位の関係

3.3 断面力応答

単位片振幅波高入射時の曲げモーメント応答の結果を図 5 および図 6 に示す。図 5 は水平面内に関する曲げモーメントを、図 6 は鉛直面内に関する曲げモーメントである。図 5 において、水平波力を静的に与えた時の結果をみると、ライズ比の増加とともにアーチアクションによる曲げモーメントの低減効果が認められるのに対し、動的応答解析の結果はこれとは全く異なった傾向を示している。すなわち、ライズ比が 0.08 の時(これは、実際の Bergsoysund 橋の場合に相当する)に応答が最大となっている。

図 6 の鉛直面内曲げモーメントに関しては、図 4 の鉛直応答変位の基本的な傾向に、高次モードにおいては曲げモーメント応答がより大きくなる、という特性を加味して考えれば理解できる傾向となっている。特に、ライズ比が 0.055 で、 $k_0=0.1\text{ m}^{-1}$ ($\omega=0.9736\text{ rad/sec}$)において 2 次モードの共振によるピークが強く現れている。

図 7 に、単位片振幅波高入射時の最大軸力について示す。この場合には、水平アーチ面内での軸方向変形を主体とした振動モードが高次であり、このような振動モードの影響があまりないと考えられるため、ほぼ静解析と同様な値あるいはこれより低い値が動的解析により得られている。

上部工は、4 本の弦材よりなるトラス構造であるため、トラス部材としての断面力算定には、全軸力の 1/4 倍したものと曲げモーメント(水平面内に関する曲げモーメントのみを考慮した)から算定した応力の和を考えた。その結果を図 8 に示す。主として曲げモーメント応答の特性を反映して、静解析においてアーチアクションの効果が顕著に見られるのに対し、動解析では必ずしもアーチアクションに伴う応答の低減は見られない。これは、浮体基礎による付加質量の効果が大きく現れているためである。また、単位片振幅波高入射時の応力の最大値は、103 MPa であり、かなり大きな応力が発生していることがわかる。

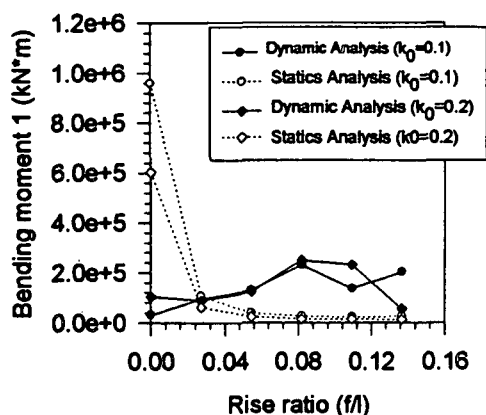


図 5. ライズ比と水平面内最大曲げモーメントの関係

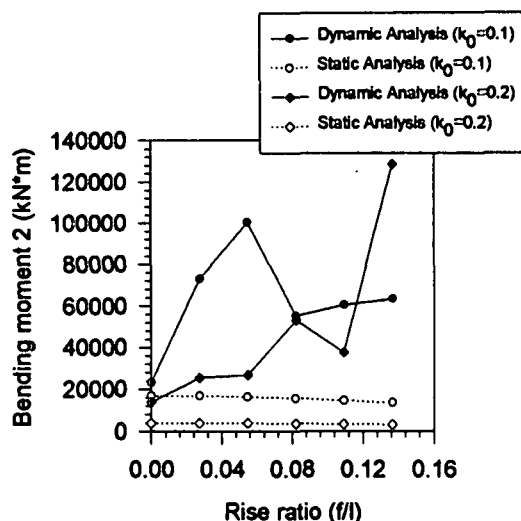


図 6. ライズ比と鉛直面内最大曲げモーメントの関係

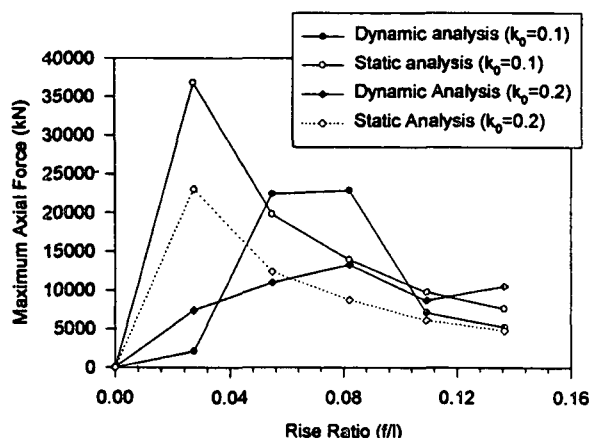


図 7. ライズ比と最大軸力の関係

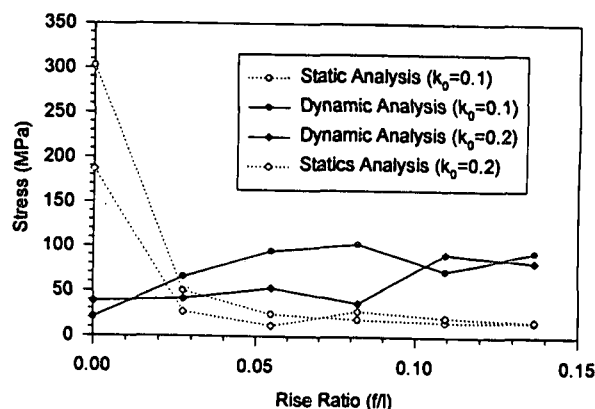


図 8. ライズ比とトラス弦材の最大応力の関係

4. まとめ

以上、水平アーチ形状を有する独立浮体基礎橋梁に関して、アーチ形状をあらわすライズ比をパラメーターとして波浪応答解析をおこなった。その結果、静解析においてはアーチアクションにともなう応力低減効果が確認されたものの、浮体基礎の付加質量を考慮した波浪応答解析（動解析）においては、必ずしもアーチアクションの効果は顕著でなく、むしろ水平アーチ構造の方が断面力応答が大きくなる場合があるという結果が得られた。現実には、風、潮流、潮位差に対する追従性といった他の設計要因も大きいため、これらの条件も勘案した上で最適な構造形式を選択する必要があるが、波浪応答の観点からは、浮体基礎の付加質量の効果が水平方向の動的応答においても極めて大きな影響を及ぼすことが明らかとなったため、構造形式選択の設計初期段階から流体との相互作用を考慮した動的応答解析を導入することが重要であると考えられる。

参考文献

- 1) G. Solland, S. Haugland and J.H. Gustavsen: The Bergsoysund floating bridge, Norway, Structural Engineering International, pp. 142-144, 1993.
- 2) 渡邊英一, 宇都宮智昭, 高須賀丈広, 伊藤恭平: 独立カラム型浮体基礎橋梁の波浪応答に及ぼす浮体基礎形状の効果, 海洋開発論文集, Vol. 11, pp. 333-338, 1995.
- 3) W.-S. Park, C.-B. Yun and C.-K. Pyun: Infinite elements for evaluation of hydrodynamic forces on offshore structures, Computers & Structures, Vol. 40, pp. 837-847, 1991.
- 4) W.-S. Park, C.-B. Yun and C.-K. Pynn: Infinite elements for 3-dimensional wave-structure interaction problems, Eng. Struct., Vol. 14, pp. 335-346, 1992.