第I部門　　モード法による浮体橋の波浪応答シミュレーションプログラムの開発

京都大学　学生員 ○岡藤　孝史　京都大学工学研究科　フェロー 渡邊英一
京都大学工学研究科　正会員　宇都宮智昭　独立行政法人土木研究所　正会員　平原伸幸
独立行政法人土木研究所　正会員　麓　興一郎

1. 研究目的

浮体橋の応答解析を行う際、係留系の非線形復元力特性を正確に考慮するためには、時刻歴応答解析法を用いる必要がある。また一方で、Radiation 流体力の周波数依存性を表現するには、運動方程式において流体力のメモリー効果を考慮する必要がある。本研究の目的は、メモリー効果を考慮した単独円筒浮体の波浪動揺シミュレーションプログラム[1]をさらに発展させ、浮体橋の弾性変形も考慮できる波浪応答シミュレーションプログラムを開発することである。

2. 解析手法

流体力のメモリー効果を考慮した以下の運動方程式が、高木・新井ら(1996)[2]によって示されている。

$$\sum_{j=1}^{N}\left[\{m_{ij}+\mu_{ij}(\infty)\}\ddot{x}_j + B_{ij}\dot{x}_j + \int_0^t L_{ij}(\tau)\dot{x}_j(t-\tau)d\tau + C_{ij}x_j\right] + G_i(x_i) = F_i(t) \qquad (i=1,2,\ldots,N) \tag{1}$$

ここで、x_i:節点変位, m_{ij}:質量, $\mu_{ij}(\infty)$:周波数無限大時の付加質量, B_{ij}:線形減衰係数, $L_{ij}(\tau)$:メモリー影響関数, C_{ij}:静的復元力係数, $G_i(x_i)$:非線形係留力, $F_i(t)$:外力, N:総自由度数である。本研究では、この運動方程式を用いて解析を行う。式(1)中の周波数無限大時の付加質量$\mu_{ij}(\infty)$、メモリー影響関数$L_{ij}(\tau)$は以下の式より求まる。但し、$\mu_{ij}(\omega)$:付加質量, $\lambda_{ij}(\omega)$:造波減衰である。

$$\mu_{ij}(\omega)-\mu_{ij}(\infty) = -\frac{2}{\pi}\int_0^{\infty}\lambda_{ij}(\omega')\frac{d\omega'}{\omega^2-\omega'^2} \tag{2}$$

$$L_{ij}(\tau) = \frac{2}{\pi}\int_0^{\infty}\cos\omega\tau\lambda_{ij}(\omega)d\omega \tag{3}$$

本研究では、モード法を用いて運動方程式を解く。各モード毎の固有ベクトル集合を$[\phi]$(モーダル・マトリクス)、モード応答振幅を$\{\zeta\}$とすると、$\{x\}=[\phi]\{\zeta\}$と表せる。これを式(1)に代入し、さらに両辺の各項に左から$[\phi]^T$をかけると、次式が導かれる。但し、式(1)において非線形係留の項、及びメモリー効果の項を右辺に移項して、見かけ上の外力とみなした。

$$[\phi]^T[m+\mu(\infty)][\phi]\{\ddot{\zeta}\}+[\phi]^T[B][\phi]\{\dot{\zeta}\}+[\phi]^T[C][\phi]\{\zeta\} = -[\phi]^T\{G(x)\}+[\phi]^T\{F(t)\}-\int_0^t[\phi]^T[L(t)][\phi]\{\dot{\zeta}(t-\tau)\}d\tau \tag{4}$$

ここで$[\phi]^T[m+\mu(\infty)][\phi]=[I]$と正規化し、また$[\phi]^T[B][\phi]$が対角マトリクスであると仮定すると、式(5)は次のようにモード毎の別個の方程式系として表現できる。(式(4)の右辺$=\{H(t)\}$と置き直し、M 個のモードを使用する)

$$\ddot{\zeta}_k + 2h\omega_k\dot{\zeta}_k + \omega_k^2\zeta_k = H_k(t) \qquad (k=1,2,\ldots,M) \tag{5}$$

ここで、ω_k:固有値, h:減衰率である。このようにモード法を適用した運動方程式に Newmark−β法(β=0.25)を組み合わせ、時刻歴応答解析を行う。なお、解析時にはメモリー効果の項の積分は、L 及び$\dot{x}$が微少区間Δt内で時間に対して線形に変化していると仮定して計算している。この時$\{\dot{x}(t+\Delta t)\}$を含む項が発生するが、この項は右辺で外力としては扱えず、また非対角成分を含むため左辺に移項すると式(6)のように別個の方程式系にできなくなる。そこで$\{\dot{x}(t+\Delta t)\}$を含む項に対して Newmark−β法を適用すると、$\{\dot{x}(t+\Delta t)\}$を含む項は取り除かれ、新たに$\{\ddot{x}(t+\Delta t)\}$を含む項が生じる。そして$\{\ddot{x}(t+\Delta t)\}=\{\ddot{x}(t)\}$と近似する。この近似による応答解析結果の精度変化について 1 自由度(Heave 運動)の円筒浮体モデルで検証を行ったが、近似前後で差異は見られなかった。

Takashi OKAFUJI, Eiichi WATANABE, Tomoaki UTSUNOMIYA, Nobuyuki HIRAHARA, Koichiro FUMOTO

3. 検証及び解析結果

Fig.1 を解析モデルとする浮体橋について時刻歴応答解析が行えるよう、プログラムを作成した。以下に示す数値例では、係留系は線形バネとして近似している。最初に、流体力を境界要素法による流体力解析プログラムにより算出し、式(2)、(3)を用いて周波数無限大時の付加質量係数、及びメモリー影響関数を求めておく。

まずは、強制波力として規則波(正弦波)が入射する場合について解析を行う。波の振幅は 1.0(m)、入射角は橋軸直角方向で、各浮体基礎に同位相で入射するとする。検証は時刻歴応答の振幅が周波数応答の振幅と一致することを利用して行った。周波数応答の振幅は、汎用有限要素解析プログラム NASTRAN を用いて算出した。節点 508 番について、Fig.2 に橋軸直角方向の、Fig.3 に鉛直方向の検証結果を示した。Fig.2、Fig.3 より両者はほぼ一致していると言える。

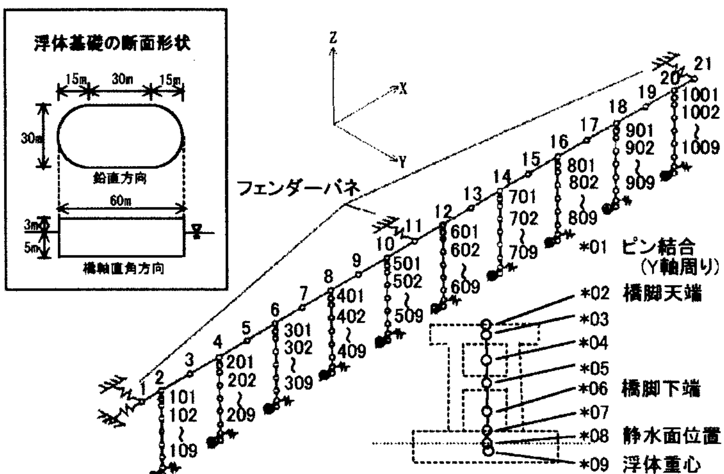

Fig.1 浮体橋の解析モデル

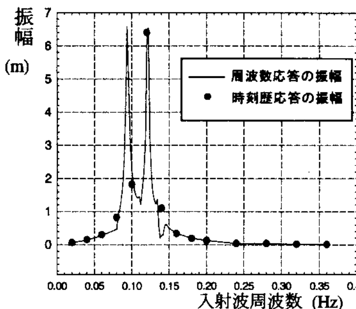

Fig.2 解析結果の検証(節点 508,橋軸直角方向)

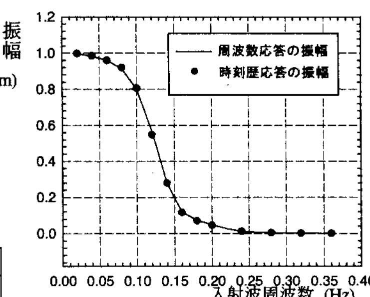

Fig.3 解析結果の検証(節点 508,鉛直方向)

Table 1 不規則波を与えられた時の応答解析結果の検証

	節点 508 番，鉛直方向	節点 508 番，橋軸直角方向
時刻歴応答解の分散値	0.01513	0.3724
周波数応答解の分散値	0.01549	0.3781
相対誤差	2.32 (%)	1.51 (%)

次に、強制波力として不規則波が入射する場合について解析を行う。波の入射角は橋軸直角方向で、各浮体基礎に同位相で入射するとする。不規則な変動外力は多数の周波数成分がランダムな位相で重なり合ったものであると考え、波力のパワースペクトルから不規則変動の時系列を作成する方法を用いる。本研究では、波のスペクトルには Bretschneider&光易の式によるものを用いる。有義波高 1.0(m)、有義波周期 6.0(s)とした。検証は、時刻歴応答解の分散の値と周波数応答解の分散の値が等しくなることを利用して行った。Table 1 に節点 508 番における鉛直方向、及び橋軸直角方向についての検証結果を示す。Table 1 より、両者の値はほぼ一致しているといえる。

3. 結論及び今後の課題

以上の場合において、作成したプログラムにより時刻歴応答解析を正しく行えると考えられる。今後、係留系を非線形のバネとした場合、各浮体基礎にかかる波力の位相差を考慮する場合、風荷重・変動漂流力を考慮する場合等について時刻歴応答解析を行えるようプログラムを拡張する必要がある。なお本研究は、独立行政法人土木研究所公募型委託研究「浮体橋の波浪･風作用下での動揺解析手法」の開発の一部として実施されたものである。

(参考文献)

1)渡邊英一, 宇都宮智昭, 吉澤直, 松永昭吾, 伊藤恭平, 平原伸幸, 麓 興一郎 : メモリー効果を考慮した浮体の時刻歴波浪応答解析, 構造工学論文集, Vol.48A, 2002

2)高木又男, 新井信一 : 船舶・海洋構造物の耐波理論. 成山堂, 1996, pp 567-575