

大規模地震時における水中橋脚の挙動と動水圧の評価法

Seismic Behavior of Submerged Bridge Columns and Assessment of Dynamic Hydraulic Pressure under Strong Seismic Motion

星隈順一*, 運上茂樹**

Jun-ichi Hoshikuma, Shigeki Unjoh

*工博, 国土交通省土木研究所耐震研究室, 主任研究員 (〒305-0804 茨城県つくば市旭 1)

** 工博, 国土交通省土木研究所耐震研究室, 室長 (〒305-0804 茨城県つくば市旭 1)

This paper presents the seismic behavior of the submerged bridge columns subjected to large earthquake motion based on the three-dimensional finite element dynamic analyses with use of the fluid-structure model. An effect of the dynamic hydraulic pressure was assessed by means of the virtual mass based on the finite element analyses. The virtual mass derived from the finite element analyses was compared with existing models. It was found that the virtual mass estimated by Goto-Toki model reasonably coincided with the analytical results. Thus, Goto-Toki model would be applicable to the submerged bridge columns subjected to large earthquake motion. Furthermore, an existing static force model of the dynamic hydraulic pressure was examined in terms of applicability to seismic design for a large earthquake. The response acceleration profiles through the column height should be adequately modeled so as to create the rational static force representing the dynamic hydraulic pressure effect.

*Key Words: dynamic hydraulic pressure, submerged bridge columns, seismic behavior
seismic design*

キーワード: 動水圧, 水中橋脚, 地震時挙動, 耐震設計

1. はじめに

土木構造物に対する耐震設計では、地震の影響として、構造物の慣性力、地震時土圧、動水圧、地盤の液化化および流動化の影響を考慮することが一般的である。これらの地震の影響の耐震設計への反映のさせ方としては、一般に、動的解析法のように直接相互作用として考慮できる手法と、地震時保有水平耐力法等の静的解析法のように、地震による作用を静的な荷重に置き換えて考慮する手法の2つがある。耐震設計の実務で多用されている静的解析法においては、特にレベル2地震動のように強度の強い地震動に対しては、構造物材や地盤が弾性域を超えて非線形な挙動を示すため、その非線形性を考慮した地震荷重のモデル化が行われている。

しかしながら、動水圧に関しては、橋脚の全高に対して水と接している範囲が大きい高橋脚の場合等、動水圧の影響が有意となる条件の橋梁がもともと少なく、また、他の地震の影響と比較しても、橋梁の耐震設計上は動水圧の影響が支配的な要因となることも少ないことから、これまでレベル2地震動が作用した場合の動水圧の評価法についてはあまり検討されていない。

そこで、本研究では、動水圧の影響が大きくなると想定される橋脚構造と接水条件を仮定し、そのような水-

橋脚構造系に対して、流体要素を用いた三次元動的有限要素解析を行い、レベル2地震動が作用した時における水中橋脚の挙動について検討を行った。さらに、動水圧の影響を考慮した実務的な耐震解析法として、はり要素モデルに基づく動的解析法ならびに地震時保有水平耐力法に着目し、レベル2地震動に対する耐震解析法における動水圧の考慮のさせ方について述べた。ここで、はり要素を用いた動的解析法においては、動水圧の影響を取り入れる簡便な手法として適用されている付加質量モデルに着目し、既往の動水圧評価式に基づいて算定される付加質量と三次元動的有限要素解析による結果とを比較した。また、地震時保有水平耐力法への適用に関しては、動水圧の影響の静的な荷重へのモデル化について一考察を行った。

2. 解析対象とした水中橋脚と入力地震動

本解析では、できる限り動水圧の影響が大きくなるような水中橋脚を対象とするために、小判形断面の高橋脚を選定するとともに、接水深も大きくした。図-1に、解析対象とした橋脚の形状寸法を示す。水位は橋脚基部から20mの位置とした。なお、橋脚断面は、上部構造の分担重量を4900kNとして設計した。

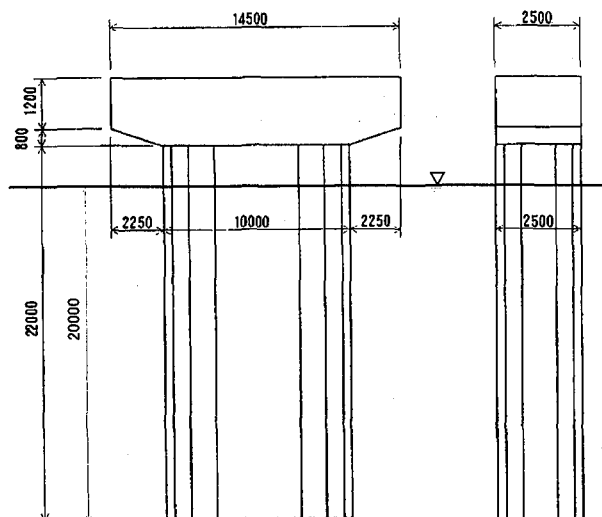


図-1 解析対象とした橋脚の諸元 (単位:mm)

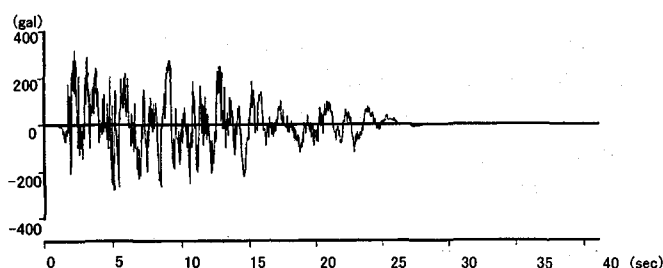
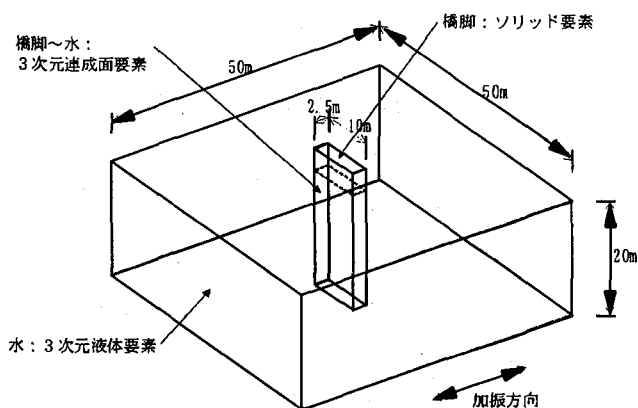


図-2 解析に用いた入力地震動

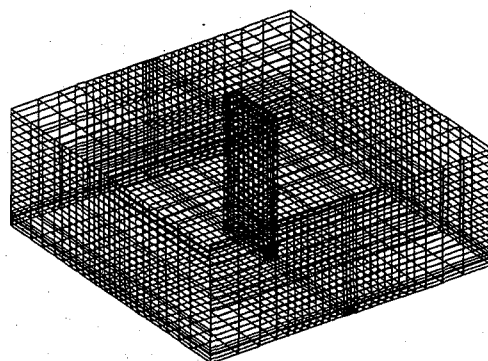
入力地震動としては、道路橋示方書V耐震設計編¹⁾(以下道示という)に規定するタイプⅠの地震動(Ⅰ種地盤)とした。これは、解析対象となる高橋脚では固有周期が長く、長周期領域において加速度応答スペクトルが大きい特性を有するタイプⅠの地震動の方が動水圧の影響が大きくなるためである。本解析に用いた入力地震動の時刻歴波形は図-2に示す通りである。なお、入力地震動は、橋脚の弱軸方向に対して入力した。

3. 三次元動的有限要素解析

三次元動的有限要素解析に用いた解析モデルを図-3に示す。ここで、橋脚躯体は三次元ソリッド要素、水は三次元液体要素でそれぞれモデル化している。ここで、流体の圧縮性は本解析モデルでは考慮していない。これは、動水圧に関する既往の研究によると、細長比が2以下の柱状構造物や固有振動数が0.5~2Hzの場合には、流体の圧縮性が動水圧に及ぼす影響はほとんどないことが明らかとなっているためである^{2),3),4)}。また、橋脚と水との接触面には、三次元連成面要素を組み入れている。これは、橋脚躯体のモデルであるソリッド要素は1節点あたり3自由度であるのに対して、流体要素では1自由度(流線方向)であり、このような自由度の違う異種の要素間での力のやりとりを行うために、自由度の変換を行う要素



(a)解析モデルの諸元



(b)モデルの要素分割
図-3 解析モデル

を設けたものである。なお、水底面は水平とするとともに、耐震設計上の地盤面よりも上方をモデル化の範囲とし、地盤はモデル化の範囲外とした。

橋脚の曲げ剛性は線形の降伏剛性とした。本来であれば、橋脚の曲げモーメント-曲率関係の非線形性を考慮すべきであるが、本解析では非線形の影響を直接モデルに考慮することができなかったため、降伏剛性を等価剛性として用いた。また、この時橋脚の等価減衰定数は、塑性ヒンジの断面領域¹⁾に相当する橋脚基部から高さ1.25mの範囲では0.12、その他の断面領域では0.05とした。固有値解析の結果によると、本解析対象橋脚における1次の固有周期は1.12秒である。なお、橋脚の断面は小判型を想定したが、本解析モデルでは、断面幅が等価な長方形断面としてモデル化している。

一方、水については、地震動の入力方向に対しては橋脚断面寸法の20倍に相当する50mの範囲をモデル化し、入力直角方向に対しても、入力方向と同様に50mの範囲をモデル化した。このモデル化の範囲については、解析領域の範囲をパラメータとして別途行われている検討結果をもとに、境界部における半無限性が再現できるように設定したものである。そして、解析モデル端面は、橋脚から十分離れていると考え、境界条件として全端面における水圧は0とした。これにより、解析境界で圧力が解放されるため、波の全反射は生じないようになっている

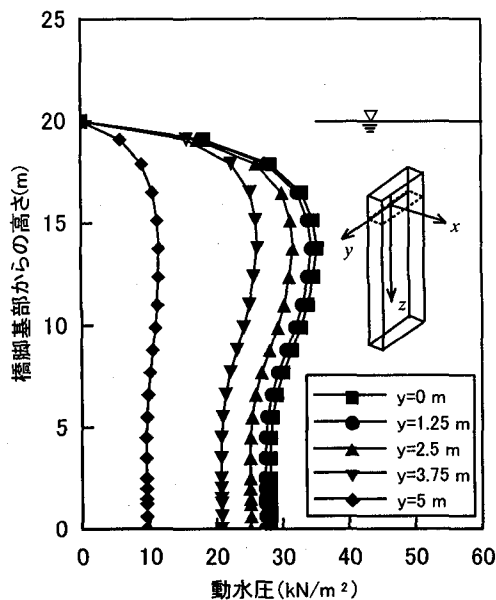


図-4 動水圧の高さ方向分布

る。水平面内の動水圧がこのような分布となるのは、構造物が振動することによって生じる流体の相対的な流れの影響によるものと考えられる。すなわち、本解析系においては、水の抵抗が構造物の抵抗よりも小さいために、受圧面の端部（橋脚角部）付近では橋脚を避けるような流れとなり、圧力が橋脚に伝達されことなくその周辺の水に解放されることによって、受圧面中央と比較すると動水圧が小さくなっているものと考えられる。

4. 動水圧の深さ方向分布

図-4 は、三次元動的有限要素解析により求められた橋脚側面に作用する最大動水圧の深さ方向分布を示したものである。ここで、Y 軸は断面内における入力直角方向の軸を示しており、Y=0 が側面中心位置、Y=5.0m が橋脚隅角部位置にそれぞれ相当している。

これより、動水圧は水位面から水深 6m の範囲では単調に増加し、それ以深では、水深が深くなるにつれて動水圧がやや減少する傾向が見られる。また、受圧面内での動水圧分布を見ると、受圧面中央で最大となり、その側方に行くにつれて、2 次曲線的に動水圧が低下していることがわかる。

5. 付加質量

5.1 付加質量の振動数依存性

付加質量とは、柱状部材に作用する動水圧の影響を簡便に表すためにその柱部材に付加させる仮定の質量のことであり、その付加させた仮定の質量の振動によって生じる慣性力が動水圧による影響と等価となるように付加質量が設定される。そこで、本三次元動的有限要素解析により求められた橋脚の応答ならびに動水圧の挙動から、

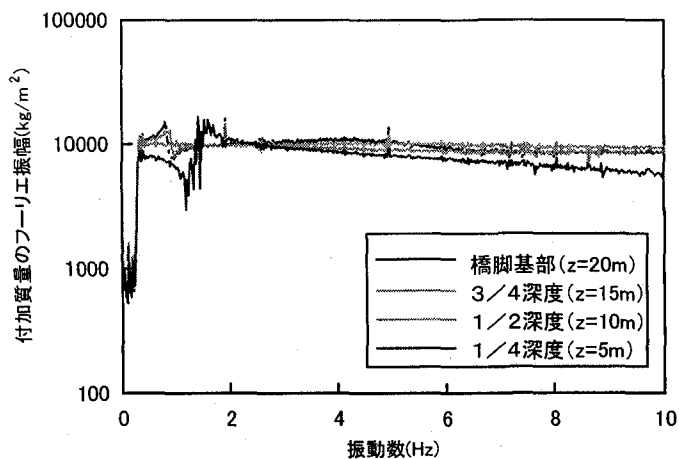


図-5 付加質量のフーリエ振幅

付加質量の解析値を算出した。付加質量は、橋脚の両側面に作用する動水圧の差分をその点における応答加速度で除すことにより求められる。しかしながら、本解析では橋脚は剛体ではなく変形の影響が考慮されているため、動水圧と応答加速度の間には位相差が生じることがあり、動水圧は作用しているが応答加速度は非常に小さくなるような時刻には、計算上、付加質量が発散してしまうことになる。これは、動的には減衰に寄与する方向に作用していることを意味していると考えられるが、ここでは、このような位相差の影響を除去するために、動水圧ならびに応答加速度の時刻歴波形に対してそれぞれフーリエ変換を行って振幅と位相を分離し、フーリエ振幅から付加質量を評価することとした。すなわち、水深 z の断面の振動数 f Hz の付加質量のフーリエ振幅は、単位面積あたりの動水圧および応答加速度の時刻歴波形に対するフーリエ振幅から式(1)により求めた。

$$m(z, f) = \frac{p_1(z, f) - p_2(z, f)}{a(z, f)} \quad (1)$$

ここに、 $m(z, f)$: 水深 z の断面における振動数 f Hz の付加質量のフーリエ振幅

$p_1(z, f), p_2(z, f)$: 水深 z の断面の両側における振動数 f Hz の動水圧のフーリエ振幅

$a(z, f)$: 水深 z の断面における振動数 f Hz の応答加速度のフーリエ振幅

図-5 は、橋脚側面中央部における付加質量のフーリエ振幅を示したものである。これより、0.3Hz 以上の振動数領域では、単位面積あたりの付加質量は概ね 10000 kg/m^2 で一定となっており、振動数依存性が小さいことを示している。一方、0.3Hz 以下の振動数領域では、付加質量が急激に小さくなっているが、本橋脚では 1 次の固有振動数が 0.89Hz であり、このような低振動数領域の影響はないと考えられる。また、付加質量のフーリエ振幅の振動数依存性は水深の影響も受け、特に水表面に

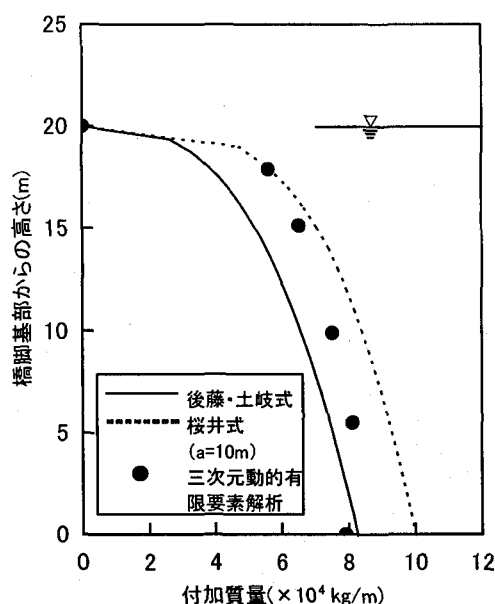


図-6 既往の評価式との比較

近い位置ほどその影響が大きいが、接水高の1/2点以深では、安定したスペクトルとなっている。

5.2 既往の動水圧評価式との比較

既往の動水圧の評価式としては、桜井式²⁾ ならびに後藤・土岐式^{3), 5), 6)} が代表的である。桜井式では、橋脚が円形断面の剛体で基部固定という条件のもと、付加質量の理論解の近似式を次式により提案している。

$$m(z) = \rho_0 \pi R^2 \left(1 - \frac{z}{h}\right)^{R/h} \quad (2)$$

ここに、 $m(z)$: 橋脚基部から高さ z における付加質量

ρ_0 : 水の密度

R : 橋脚断面の半径

h : 水表面から橋脚基部（水底面）までの深さ

また、後藤・土岐式によると、剛体と仮定した矩形断面橋脚に対する付加質量は次式のように導かれている。

$$m(z) = \rho_0 A_0 \frac{b}{a} \left(1 - \frac{b}{4h}\right)^3 \sqrt{\frac{z}{h}} \quad (3)$$

ただし、 $b/h \leq 2$

ここに、 A_0 : 橋脚の断面積

a : 振動方向に対する橋脚断面の長さ

b : 振動直角方向に対する橋脚断面の長さ

そこで、上記提案式による付加質量の評価値と本解析から算定された付加質量を比較してみることとした。前述の図-5では、橋脚側面中央部の節点における付加質量のフーリエスペクトルを示したが、接水している全ての解析節点で単位面積当りの付加質量のフーリエスペクト

ルを算定し、それらを同一高さの水平面にある節点毎に足し合わせるにより、その断面における付加質量のフーリエスペクトルを求めた。そして、この断面毎の付加質量のフーリエスペクトルを、振動数領域(0.5~10Hz)に着目して平均し、その平均値をその断面における付加質量とした。このようにして求めた付加質量と、式(2)ならびに式(3)による評価値を比較すると図-6の通りである。

これより、三次元動的有限要素解析の結果は、水深の浅い領域で若干の差異が見られるものの、後藤・土岐式による評価値と比較的に近似していることがわかる。一方、桜井式では、正方形断面橋脚に対しては、式(2)中の πR^2 を $4a^2$ (a :断面寸法)に置き換えることにより適用できることが報告されているが²⁾、本解析条件のように、長方形断面の場合に対する a の値の取り方が明確ではない。そこで、ここでは、 a の値として動水圧の受圧面の幅をとることとし、 $a=10\text{m}$ として付加質量を算定した。 a の値の取り方について仮定を設けているため、あくまでも参考比較にしかならないが、桜井式では、水深の浅い領域では、三次元動的有限要素解析の結果と比較的に近似しているが、水深が深くなるにつれて、全体的に付加質量を大きく評価する傾向がある。

6. はりモデルを用いた動的解析法における動水圧のモデル化に関する考察

前述した三次元動的有限要素解析で用いた橋脚構造ならびに接水条件に対して、解析モデルとしてより実務的なはりモデルを適用して動的解析を行い、その解析精度について、三次元動的有限要素解析結果との比較により検討を行った。ここで、動水圧の影響は橋脚躯体に仮定の分布質量を付加させることにより考慮するものとし、その付加質量は、前述した検討結果を基に、後藤・土岐式による評価値(図-6中の実線)を適用した。動水圧の影響を付加質量として考慮する場合、運動方程式は次の通りとした。

$$(M+m)(\ddot{x}+a)+c\dot{x}+kx=0 \quad (4)$$

ここに、 M : 質量

m : 付加質量

c : 減衰係数

k : 橋脚の曲げ剛性ばね

$\ddot{x}, \dot{x}, x$: 加速度、速度、変位

a : 入力加速度

なお、入力地震動は、三次元動的有限要素解析と同様に図-2に示した波形を用いた。また、橋脚の剛性ならびに減衰定数は、三次元動的有限要素解析の条件と一致させるものとし、降伏剛性による線形でモデル化するとともに、減衰定数については、塑性ヒンジとなる断面(橋脚基部から1.25mの高さまでの断面)では0.12、その他

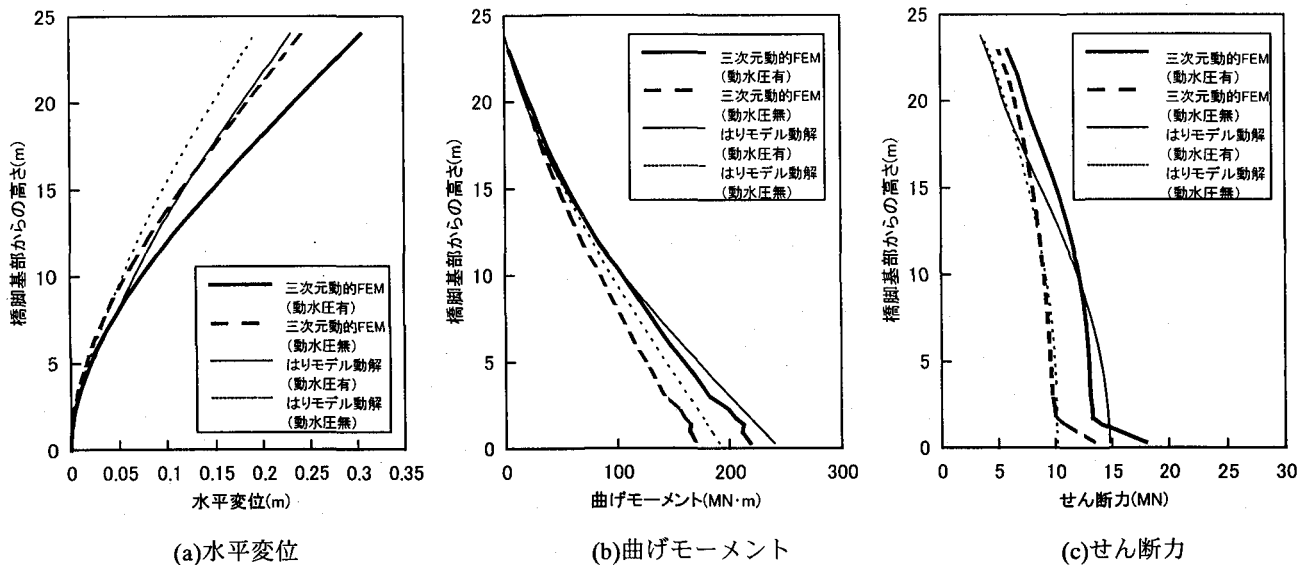


図-7 基部における曲げモーメントが最大となる時刻における地震応答値の比較

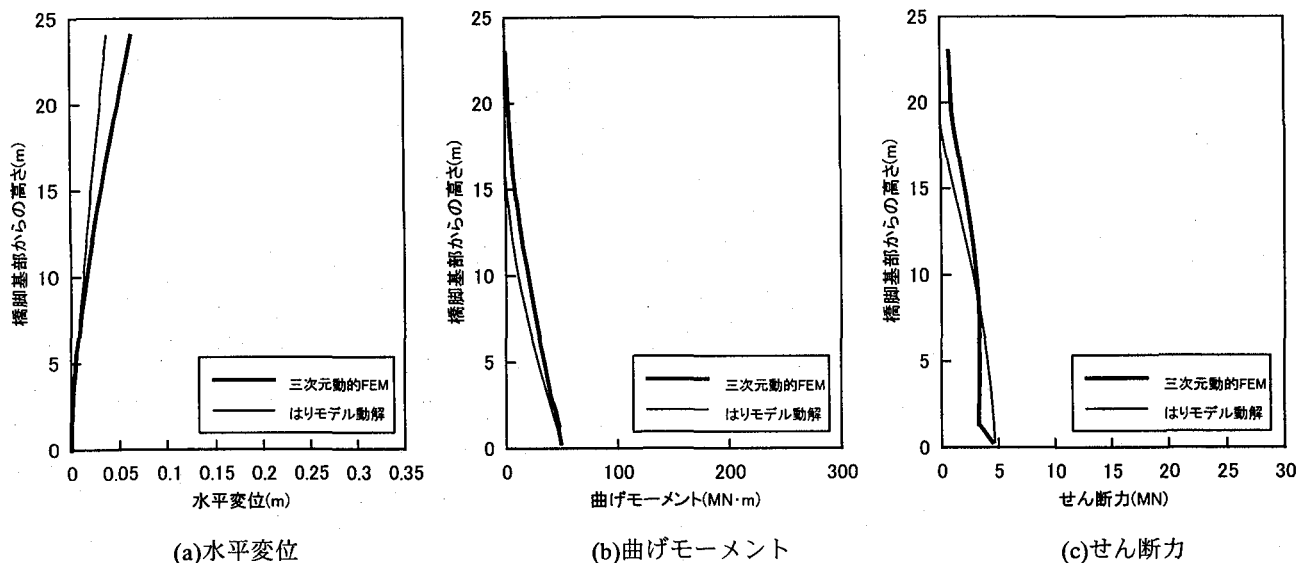
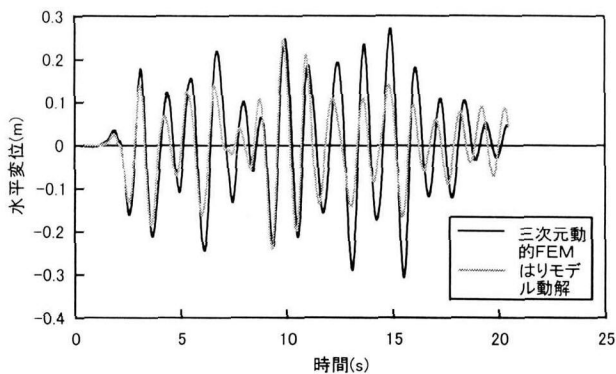


図-8 基部における曲げモーメントが最大となる時刻における動水圧による地震応答増分値の

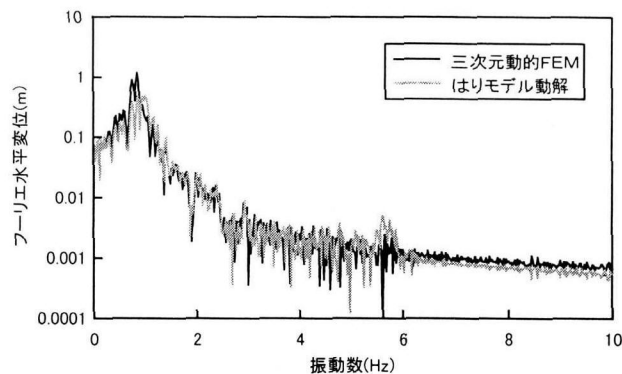
の断面では0.05とした。

図-7は、橋脚基部に生じる曲げモーメントが最大となる時刻における水平変位、曲げモーメント、せん断力の深さ方向分布について、三次元動的有限要素解析とはりモデルによる動的解析の結果を比較して示したものである。ここで、三次元動的有限要素解析の結果を二次元値に変換するために、それぞれの指標に対して以下の処理を行った。すなわち、水平変位については、動水圧受圧面の水平方向に対してほぼ一定であったことから、この方向に対する平均値として評価した。曲げモーメントについては、橋脚躯体のモデルであるソリッド要素に生じた鉛直方向の応力度に要素の断面積を乗じ、各断面で橋脚中央を図心として加振方向に積分することにより求めた。また、せん断力は、橋脚躯体要素に生じたせん断応力度に要素の断面積を乗じて求めた。これより、はりモ

デルによる解析値は、水平変位で比較すると三次元動的有限要素解析結果よりも小さく、逆に曲げモーメントは大きく評価されていることがわかる。ここで、両者の解析値に差が生じる原因としては、動水圧の影響のモデル化手法の違いだけでなく、橋脚自体のモデル化の違いによる影響も含まれていることに注意する必要がある。そこで、両者の解析法に対して、それぞれ動水圧の影響がない場合の解析も行い、動水圧の影響を考慮した場合の解析値から差し引くことにより、動水圧の影響のみによる水平変位や断面力の増分を比較した。その結果を図-8に示す。これより、動水圧の影響による増分として比較すると、橋脚に生じる水平変位は、はりモデルではやや小さめに評価しているが、曲げモーメントやせん断力の断面力については、両解析法による応答値は比較的良好一致していることがわかる。



(a)時刻歴応答波形



(b)フーリエスペクトル

図-9 橋脚天端における水平変位の比較

また、図-9は両解析法によって求められた橋脚天端における時刻歴応答変位波形とそのフーリエスペクトルを比較して示したものである。これより、全体的に三次元動的有限要素解析による結果の方が応答変位が若干大きくなっている。これは、本橋脚の固有振動数（0.89Hz）付近では、フーリエスペクトルに若干の差異があったためと考えられるが、振動数領域全体を見ると、両解析手法に基づいて求められる応答変位のフーリエスペクトルはよく一致しており、はり要素と付加質量モデルを併用したモデルにより、水中橋脚の振動特性を比較的良好にモデル化できていると言える。

このような考察を踏まえると、はり要素と付加質量モデルを併用した動的解析によっても、三次元動的有限要素解析の結果に近似した結果を得ることができ、設計実務上は十分な精度で動水圧の影響を考慮することができるものと考えられる。

7. 静的荷重へのモデル化に関する考察

道示¹⁾や鉄道標準⁷⁾では、動水圧の評価法として、橋脚高さ方向に分布する動水圧を、式(5)で算出される1点集中荷重に置き換えて、それを式(6)により算出される高さに静的に作用させる簡便な手法が示されている。本手法は、動的解析を行わずに、動水圧の影響を静的荷重として考慮する便法である。

$$\frac{b}{h} \leq 2 \quad P = \frac{3}{4} k_h w_0 A_0 h \frac{b}{a} \left(1 - \frac{b}{4h} \right) \quad (5)$$

$$h_g = \frac{3}{7} h \quad (6)$$

ここに、 P ：橋脚に作用する全動水圧

k_h ：橋脚の設計水平震度

w_0 ：水の単位体積重量

h_g ：橋脚基部（水底面）から動水圧の合力作用点までの高さ

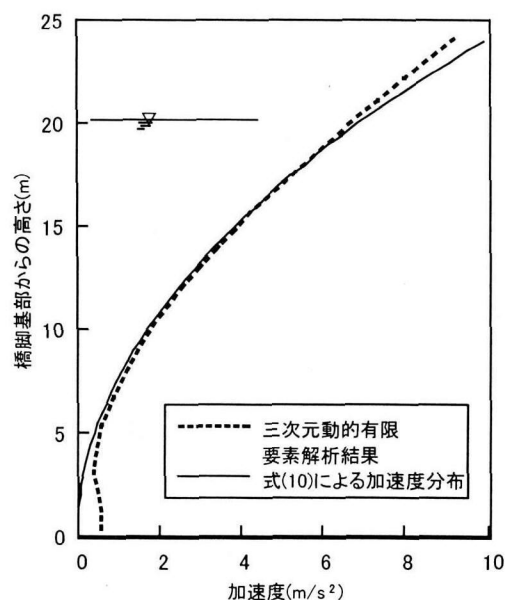


図-10 加速度分布のモデル化

式(4)による動水圧の評価法は、式(7)に示される後藤・土岐式による動水圧を橋脚高さ方向に積分して導かれたものである⁸⁾。

$$p(z) = k_h w_0 A_0 \frac{b}{a} \left(1 - \frac{b}{4h} \right) \sqrt[3]{\frac{z}{h}} \quad (7)$$

ここで、式(7)は、基本的には橋脚が剛体運動を行うことが前提となっていることに注意する必要がある。式(5)による動水圧の影響の耐震設計への反映のさせ方は、従来は、加速度応答スペクトルで200～300gal程度のレベル1地震動に対する耐震設計のみで適用されてきた。しかしながら、レベル2地震動に対する耐震設計で、動水圧の影響を静的な荷重に置き換える場合には、一般に橋脚の変形の影響を無視することはできず、橋脚自身の応答加速度が高さ方向に一定であるとは言えないため、式(5)をそのまま適用することは合理的でない。したがって、動水圧の影響を受ける水中橋脚に対して、静的解析法により耐震設計する場合には、橋脚高さ方向に対する水平

震度の変化を考慮して動水圧を評価する必要があると考えられる。

動水圧の影響によって橋脚基部に生じる曲げモーメントは、水平震度の高さ方向に対する変化を考慮すると次式で表される。

$$M_w = \int_0^h p(z) \cdot (h - z) dz \quad (8)$$

ここに、 M_w ：動水圧によって橋脚基部に生じる曲げモーメントの増分

$p(z)$ ：式(7)により算出される動水圧

z ：鉛直方向軸で、水表面位置を $z=0$ 、橋脚基部を $z=h$ とする。

式(8)に式(7)を代入すると、次式のように整理される。

$$M_w = C \int_0^h \left\{ k_h(z) \cdot \sqrt[3]{\frac{z}{h}} \cdot (h - z) \right\} dz \quad (9)$$

ただし、 $C = w_0 A_0 \frac{b}{a} \left(1 - \frac{b}{4h} \right)$

式(9)による橋脚基部に生じる曲げモーメントの増分の推定精度を検討するために、前述した三次元動的有限要素解析の結果との比較を行った。ここで、式(9)では、水平震度の高さ方向分布のモデル化が重要であるが、本研究では、橋脚に生じる加速度分布が近似できるように、次式に示す二次曲線によりモデル化した。

$$k_h(z) = k_{h0} \left(\frac{z}{h} - 1 \right)^2 \quad (10)$$

ここに、 k_{h0} ：橋脚頭部の水平震度

図-10 は、式(10)に基づく橋脚高さ方向の加速度分布と三次元動的有限要素解析により求められた橋脚基部に最大曲げモーメントが発生する時刻における橋脚躯体の加速度分布を比較したものである。これより、本解析条件に対しては、式(10)で加速度分布をよくモデル化できていることが確認される。式(10)を式(9)に代入して積分を行うと、動水圧によって橋脚基部に生じる曲げモーメントは次式のように求まる。

$$M_w \approx 0.134 C k_{h0} h^2 \quad (11)$$

式(11)により算出される動水圧によって橋脚基部に生じる曲げモーメントの増分と三次元動的有限要素解析により求められた動水圧によって橋脚基部に生じる曲げモーメントの増分を比較すると、表-1 の通りである。ここで、三次元動的有限要素解析により求められた動水圧によって橋脚基部に生じる曲げモーメントの増分は、橋脚基部の曲げモーメントが最大となる時刻における各断面における動水圧に橋脚基部からの高さを乗じ、その値を高さ方向に積分して求めたものである。また、表中には、式(5)ならびに式(6)により算定される曲げモーメントの

表-1 動水圧の影響によって橋脚基部に生じる曲げモーメントの増分

評価手法	三次元動的有限要素解析	式(11)による算定値	式(5)及び式(6)による算定値
曲げモーメント(kN・m)	31716	31657	77220

増分値も併記した。これより、式(11)による算定値は三次元動的有限要素解析による結果とよく一致しており、動水圧の影響を精度よくモデル化できていることを示している。一方、式(5)ならびに式(6)で動水圧の評価をする、水平震度を橋脚高さ方向に一定としているために、動水圧による影響を過大評価していることがわかる。

なお、式(11)は水平震度を式(10)のようにモデル化した場合の推定値である。本研究では、三次元動的有限要素解析により得られた加速度分布に近似するように水平震度分布をモデル化したため、表-1 において式(11)による推定値が三次元動的有限要素解析の結果と一致すること自体は想定され得ることである。ここで結論付けられることは、従来の動水圧の評価式はレベル2地震動に対する地震時保有水平耐力法にはそのまま適用できないこと、また、レベル2地震動に対する動水圧の評価では、橋脚躯体の応答加速度の高さ方向分布を精度よくモデル化すれば、動水圧の影響を静的な荷重モデルとして置き換えることができることである。

8. 結論

本研究では、レベル2地震動が作用した時における水中橋脚の挙動について三次元動的有限要素解析により検討を行うとともに、はり要素を用いた動的解析において動水圧の影響を取り入れる簡便な手法として用いられている付加質量モデルについて考察した。さらに、静的解析法による耐震設計での動水圧の影響の静的荷重へのモデル化についても考察を加えた。本研究により得られた知見をまとめると、以下の通りである。なお、本研究では、橋脚の弾塑性履歴特性や地盤の非線形性までは考慮していない。したがって、ここに示す事項は、あくまでも本解析の条件の範囲内で得られた結論である。

- 1)橋脚に作用する動水圧をその点における加速度で除して求められる付加質量は、橋脚の振動数領域では振動数依存性が顕著ではなかった。
- 2)三次元動的有限要素解析により求められた付加質量は、後藤・土岐式による推定値と比較的一致した。
- 3)橋脚躯体をはり要素としてモデル化し、さらに後藤・土岐式に基づいて算出される付加質量を橋脚躯体の質量に加算して動的解析を行えば、レベル2地震動に対しても、設計実務上は十分な精度で動水圧の影響を考慮することができる。

4) 静的解析法に基づく耐震設計において、動水圧の影響を静的な荷重にモデル化する場合には、橋脚躯体の応答加速度の高さ方向分布を適切に評価しなければならない。これを適切にモデル化できれば、後藤・土岐の動水圧式に基づき、式(9)のように動水圧の影響による断面力の増分を評価することができると考えられる。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：道路橋示方書Ⅴ耐震設計編、1996年12月
- 2) 桜井彰雄：水中に立てられた柱状構造物の振動、土木技術、第16巻6号、pp.11-17、1961年6月
- 3) H. Goto, K. Toki : Vibrational Characteristics and Aseismic Design of Submerged Bridge Piers, Proceedings of the Third World Conference on Earthquake Engineering, Vol. 2, 1965
- 4) 加藤浩司、高橋俊彦：大水深橋梁基礎に作用する地震

時動水圧の簡易評価法、海岸工学論文集、第44巻、No.2、pp.016-1020、1997年

- 5) 後藤尚男、土岐憲三：水中橋脚の振動と耐震設計に関する基礎的研究、土木学会論文集、No.100、pp.1-8、1963年12月
- 6) 土岐憲三、手塚昌信：水中橋脚に働く動水圧の近似式について、土木学会第20回年次学術講演会講演概要Ⅰ、1965年6月
- 7) 鉄道構造物等設計標準・同解説、耐震設計編、1999年10月
- 8) 福永勲：地震時動水圧、基礎工、Vol. 18、No.6、pp.20-22、1990年6月

(2000年9月14日受付)