

地震時保有水平耐力法による動水圧の評価

星隈順一¹・運上茂樹²

¹正会員 工博 建設省土木研究所 耐震研究室 主任研究員（〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地）

²正会員 工博 建設省土木研究所 耐震研究室 室長（〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地）

1. まえがき

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。地震時保有水平耐力法による橋梁の耐震設計においても、これらの地震による作用を静的な荷重に置き換えて耐震解析が行われている。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、構造部材や地盤が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あまり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地震時における水中橋脚の挙動について検討を行った。また、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。さらに、地震時保有水平耐力法による耐震設計での動水圧の影響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、地震時に慣性力を分担する上部構造部分の重量を4900kNとして設計した。

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）に規定されるタイプIの地震動とした。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地震動の方が本解析の目的に合致するためである。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。

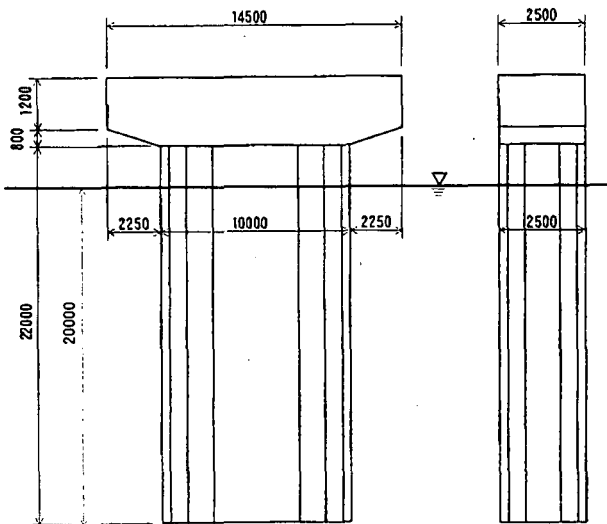


図-1 解析対象とした橋脚の諸元

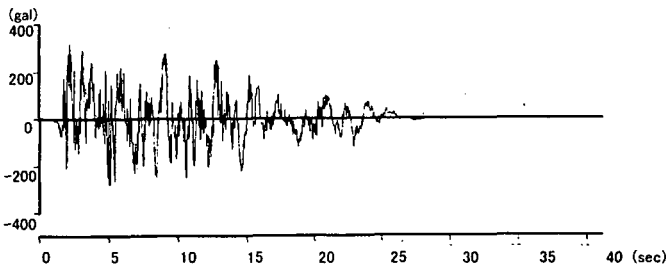
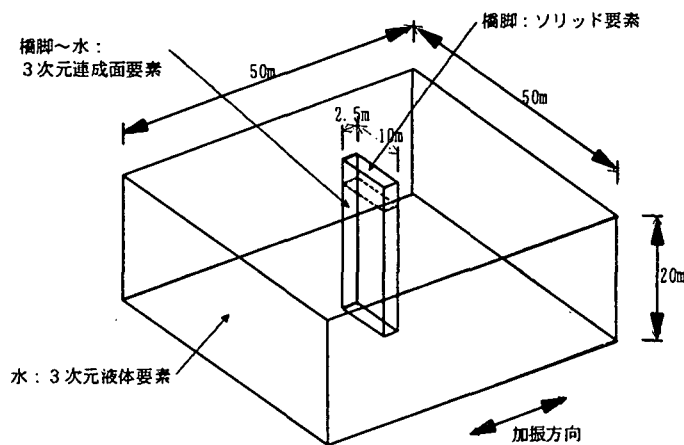
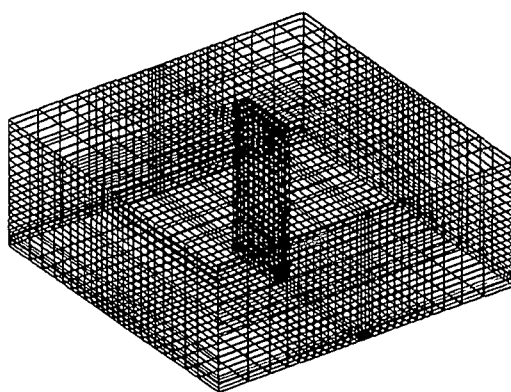


図-2 解析に用いた入力地震動



(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

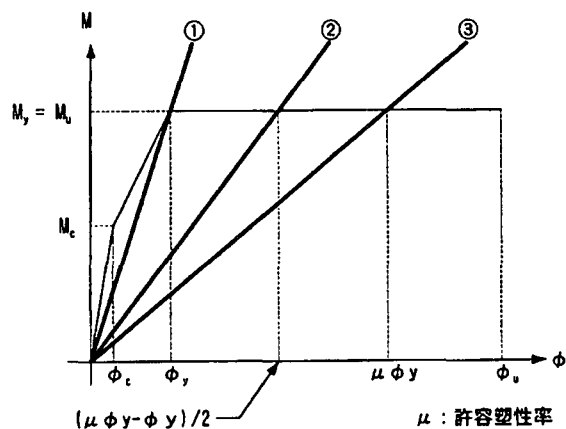


図4 橋脚の曲げ剛性

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、橋脚躯体はソリッド要素、水を三次元液体要素でそれぞれモデル化している。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自由度であるが、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、図4に示す3ケースとした。本来であれば、橋脚の曲げモーメントー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考慮できなかったことから、降伏剛性（図中の①）、道示により算出される許容塑性曲率の1/2に相当する曲率時における剛性（図中の②）、許容塑性曲率に相当する曲率時における剛性（図中の③）の3ケー

スの等価剛性を設定した（以下、それぞれケース1、ケース2、ケース3という）。固有値解析の結果によると、ケース1、ケース2、ケース3における1次の固有周期は、それぞれ1.12秒、1.17秒、1.35秒である。なお、橋脚の断面は小判型を想定しているが、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、水は、境界部における半無限性を考慮するために、地震動の入力方向には橋脚断面寸法の20倍の50mをモデル化の範囲とし、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。なお、解析モデル端面では、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。

4. 動水圧の深さ方向分布

図5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。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線となり、圧力が橋脚に伝達される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

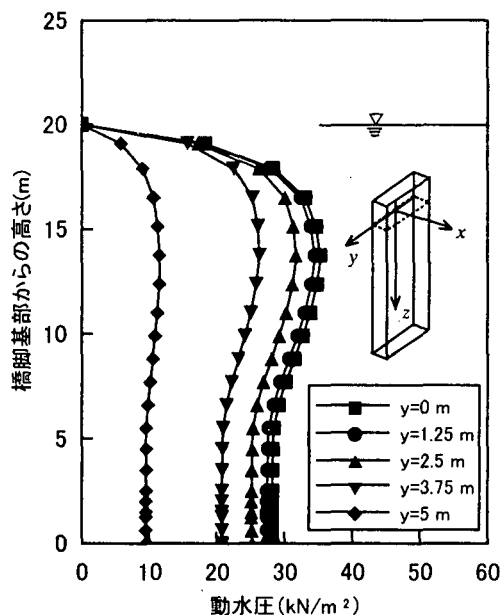


図-5 動水圧の高さ方向分布

小さくなっているものと考えられる。

また、今回の解析では、橋脚基部の曲げ剛性をパラメータとしたが、曲げ剛性の違いが動水圧や水中橋脚の応答加速度に及ぼす影響は小さかった。これは、橋脚基部の曲げ剛性を変化させても橋脚の固有周期特性は大きく変化しなかったためである。したがって、以下では、ケース1の曲げ剛性の条件を対象として検討結果を示すことにする。

5. 付加質量

(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質量のことであり、その付加させた質量によって生じる慣性力の影響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、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、本解析では橋脚の変形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。そこで、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フーリエ変換を行い、振幅と位相を分離して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

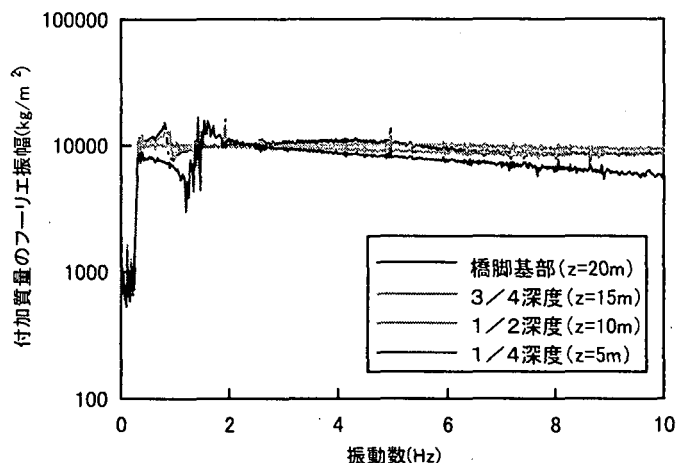


図-6 付加質量のフーリエ振幅

の時刻歴波形に対するフーリエ振幅から式(1)により求められる。

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

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-6は、ケース1の曲げ剛性(降伏剛性)に対して、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10000kg/m²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。これは、この振動数領域の動水圧が小さくなっていることによるものであるが、そうなる理由についてはよくわからない。想定される要因としては表面波の影響等が考えられるが、これについてはさらに検討が必要である。ただし、本橋脚では1次の固有振動数が0.7Hz以上であるため、このような低振動数領域の影響は生じていないと考えられる。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。

(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), 4), 5)}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

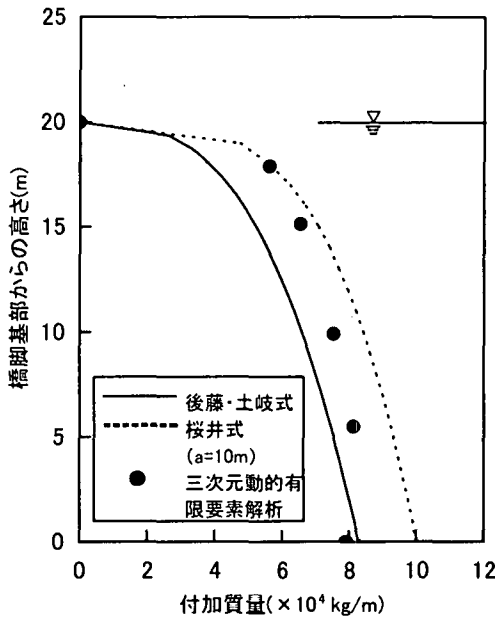


図-7 既往の評価式との比較

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、上記の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にした。前述の図-6では、橋脚側面中央部の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ことで、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-7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、振動直角方向に対する橋脚断面の長さ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、水深の浅い流域では、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、深くなるにつれて付加質量を大きく評価している。

6. 地震時保有水平耐力法への適用の考察

道示では、動水圧の評価法として、後藤・土岐式を基本として、橋脚高さ方向に分布する動水圧を、式(4)で算出される1点集中荷重に置き換えて、それを式(5)により算出される高さに作用させる手法が示されている¹⁾。

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

$$h_g = \frac{3}{7} h \quad (5)$$

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

式(4)による動水圧の評価法は、式(6)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⁶⁾。

$$p(z) = k_h w_0 A_0 \frac{b}{a} \left(1 - \frac{b}{4h}\right)^3 \sqrt{\frac{z}{h}} \quad (6)$$

ここで、式(6)は、基本的には橋脚が剛体運動をすることが前提となっていることに注意する必要がある。式(4)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(4)をそのまま適用することはできない。したがって、動水圧の影響を受ける水中橋脚に対して、地震時保有水平耐力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。

$$M_w = \int_0^h p(z) \cdot (h - z) dz \tag{7}$$

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

$p(z)$: 式(6)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(7)に式(6)を代入すると、次式のように整理される。

$$M_w = C \int_0^h \left\{ k_h(z) \cdot \sqrt[3]{\frac{z}{h}} \cdot (h - z) \right\} dz \tag{8}$$

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

式(8)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(8)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。

$$k_h(z) = k_{h0} \left(\frac{z}{h} - 1 \right)^2 \tag{9}$$

ここに、 k_{h0} : 橋脚頭部の水平震度

図-8は、式(9)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(9)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(9)を式(8)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。

$$M_w \approx 0.134 C k_{h0} h^2 \tag{10}$$

式(10)により算出される動水圧によって橋脚基部に

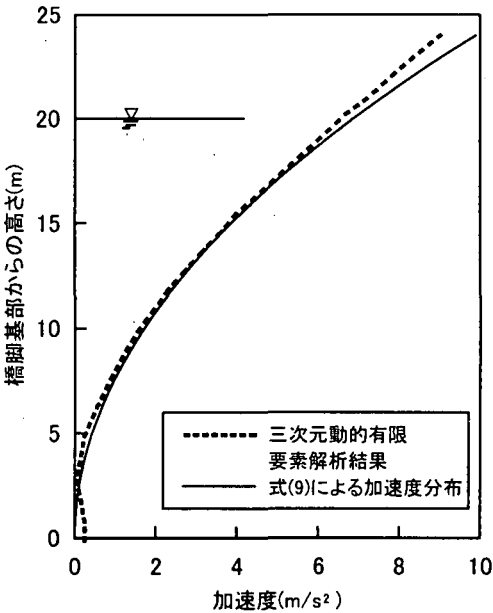


図-8 加速度分布のモデル化

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

評価手法	三次元動的有限要素解析	式(10)による算定値	式(4)及び式(5)による算定値
曲げモーメント(kN・m)	31716	31657	77220

生じる曲げモーメント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とは、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(4)ならびに式(5)により算定される曲げモーメントの値も併記した。これより、式(10)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(4)ならびに式(5)で動水圧の評価をすると、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(10)は水平震度を式(9)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(10)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。本研究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。

7. 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、地震時保有水平耐力法による耐震設計での動水圧の影響のモデル化についても検討を加えた。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。

- 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) 地震時保有水平耐力法により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(8)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) 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
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 福永勲：地震時動水圧、基礎工、Vol. 18、No.6、pp.20-22、1990年6月