

京都大学工学部 正 員 土岐 憲三
 京都大学大学院 学生員 〇廣橋 徹

1. はじめに

今後、湾口部や海峡部において長大橋梁の建設が考えられるが、このような橋梁の基礎は水深50mを超える大水深地点に設けられることになり、耐震性の確保とともに設計の合理性・経済性が求められる。本研究では、大水深地点での地震時動水圧について水の圧縮性を考慮に入れた数値計算を行い、また付加質量を運動方程式中の外力項に加えることの是非について考察する。さらに、水中における減衰効果を評価する。

2. 直立した剛体円柱に作用する動水圧

円柱が水中で加速度運動を行うとき水から受ける力が動水圧である。水の内部摩擦（粘性）を無視すると波動方程式から理論解が求められており、それによれば動水圧は円柱の絶対加速度に比例する。また、水の圧縮性を考慮しない場合には動水圧は振動数に依らず一定となるが、水の圧縮性を考慮すると振動数の関数となり、さらにcut-off frequencyより高い振動数では動水圧と円柱の加速度に位相差が生じる。水の圧縮性の影響の大小については、水深が深いほど、また振動数が高いほどその影響が大きくなることが指摘されており¹⁾、大水深下では水の圧縮性を考慮に入れて動水圧を算定する必要があると考えられる。

そこで、半径20.0mの剛体円柱が水深70.0mの地点で受ける動水圧を水の圧縮性を考慮して数値計算し、仮想質量係数（付加質量係数）の形で表したものが図-1、図-2であり、動水圧と円柱の加速度の位相差を示したものが図-3である。図-1から動水圧が振動数に大きく依存し、振動数が0 Hzの場合（水の圧縮性を考慮しない場合に相当）より増大することがわかる。一方、動水圧の鉛直分布形状も振動数により変化し、高振動数ではなかぶくれの形状となっていることが図-2から理解できる。また、図-3によるとcut-off frequencyより高い振動数では加速度と動水圧の間に位相差が生じ、振動数が高くなるにつれて位相差も大きくなっており、これにより減衰効果が生じると考えられる。

図-1から動水圧が振動数に大きく依存し、振動数が0 Hzの場合（水の圧縮性を考慮しない場合に相当）より増大することがわかる。一方、動水圧の鉛直分布形状も振動数により変化し、高振動数ではなかぶくれの形状となっていることが図-2から理解できる。また、図-3によるとcut-off frequencyより高い振動数では加速度と動水圧の間に位相差が生じ、振動数が高くなるにつれて位相差も大きくなっており、これにより減衰効果が生じると考えられる。

3. 付加質量の取扱い

円柱が受ける動水圧をその加速度で除することにより付加質量が得られる。空中と水中にお

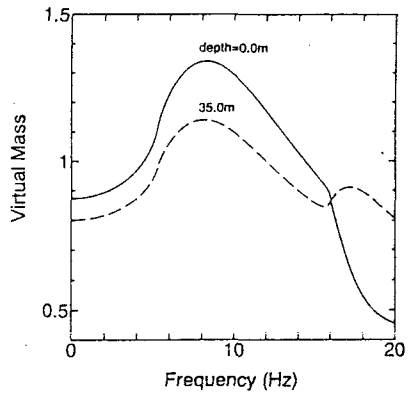


図-1 動水圧の振動数特性

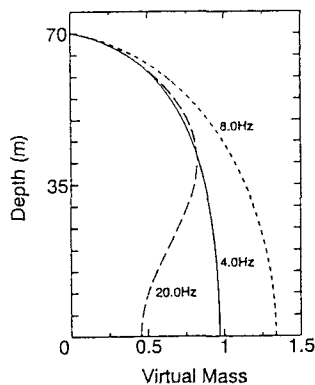


図-2 動水圧の鉛直分布

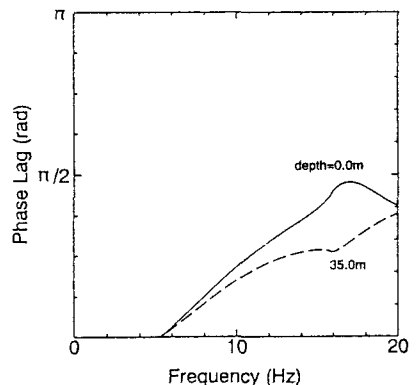


図-3 動水圧と加速度の位相差

ける固有振動数の変化を説明しやすく、また動水圧の取扱いが容易になることなどから、付加質量の概念は広く用いられているが、運動方程式中の外力項に付加質量を加えることの是非が問われており²⁾、土中の場合には、これを考慮することは誤りであると考えられている。

いま、1自由度の並進振動の相対変位についての運動方程式を考えると、付加質量 M を外力項に加えるか否かで次の2つの運動方程式が考えられる。

$$(m+M)\ddot{y} + c\dot{y} + ky = -(m+M)\ddot{\phi}$$

$$(m+M)\ddot{y} + c\dot{y} + ky = -m\ddot{\phi}$$

付加質量は動水圧のことにほかならないから、前者によれば、動水圧は構造物の絶対加速度に比例するが、後者では構造物と地動の相対加速度に比例することになる。土中の場合とは異なり、水底のごく近傍以外では水は地盤とともに動かず静止していると考えられ、このとき動水圧は絶対加速度に比例する。つまり、付加質量を外力項に加えることは誤りとはいえず、付加質量を外力項に加えない場合に得られる応答低減効果は期待できないことになる。しかし、ここでいう動水圧は水の内部摩擦を無視して得られたものであり、実際には水の有する内部摩擦により構造物の動きに応じて水も動き、それにより応答が低減されることも考えられる。

4. 水中における減衰

水の内部摩擦を無視して得られた動水圧式によれば円柱が水中を等速運動する場合には水から力を受けないが、実際には水は内部摩擦を有するため円柱はその抵抗力を受ける。しかし、水の内部摩擦を考慮した流体の運動方程式の理論解を得ることは一般には難しく、水の粘性による抵抗力を速度の2乗に比例するものとして抗力係数を用いて表されることが多い。

図-4は別の機関により実施された模型振動実験による結果と理論解析を比較したもので、半径0.4m、質量248.8kgの剛体円柱が水深0.65m、ばね定数281647.0N/m、空中での減衰定数0.045なるもとで並進振動する場合の共振曲線である。水の粘性による抵抗を考慮しても空中より水中におけるほうが応答が大きくなっていることがわかる。これは、減衰定数は $c/2\sqrt{mk}$ で表されるが、水中においては空中より c が増加する一方で、付加質量のため m も増加し、後者の増加の方がはるかに大きいため減衰定数が水中では空中よりも小さくなるためと考えられる。すなわち、水の粘性による減衰効果は非常に小さく、さらに水中においては空中よりも応答が増大することがあり注意が必要である。

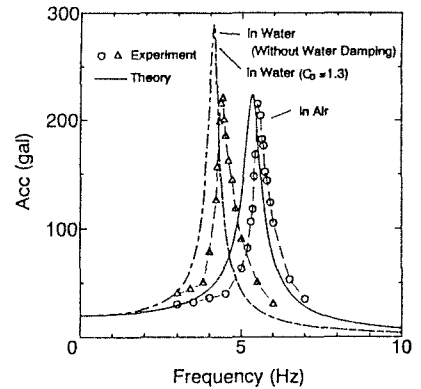


図-4 水中での共振曲線

5. まとめ

大水深下では水の圧縮性を考慮に入れた動水圧の算定が必要である。この時動水圧は加速度と位相差をもち、振動数に依存するため付加質量としての扱いは複雑になる。また、水中では付加質量を運動方程式中の外力項に導入することは誤りとは言えず、その詳細な実験的・理論的研究が必要である。さらに、水の粘性による減衰効果は非常に小さく、この点に期待した耐震設計の合理化は困難であると考えられる。

参考文献

- 1) 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,土木学会論文集第100号,1963
- 2) 大塚久哲・岩崎秀明・岩崎敏男・大野善雄：大水深を有する橋脚・基礎の地震時付加質量に関する基礎的考察,土木学会第49回年次学術講演会概要,1994