

動水圧を考慮した壁構造物の動的応答解析

大成建設（株）技術センター	社会基盤技術研究部	正会員	○織田	幸伸
大成建設（株）技術センター	社会基盤技術研究部	正会員	本田	隆英
大成建設（株）技術センター	社会基盤技術研究部	正会員	小俣	哲平

1. 目的

衝撃的な波力に対する構造物の安全性を評価する場合、瞬間的に働く衝撃力を定常力として作用させることは、一般に過大評価となる。一方、流体力の周期特性と固有周期に近い場合には過小評価となる可能性もある。構造安全性を精度良く評価するには動的応答解析が必要となるが、解析の効率化のため、構造物を剛体として流体解析し、その流体力を外力として構造解析をする場合、構造物の運動により生じる動水圧を考慮する必要がある。そこで本研究では、振動する壁構造物の表面に働く動水圧に関する水理実験を実施し、構造物の動的応答解析においてこれを考慮する方法について検討した。

2. 水理実験

図-1 に示す高さ 0.275m, 厚さ 8.25mm のアルミ板にひずみゲージと圧力計を設置し、下端を固定し、頂点部分を引っ張った状態から瞬間的に開放することにより、自由振動水理実験を行った。板の片側前面には水を貯め、水深を $h=0, 10\text{cm}, 20\text{cm}$ として動水圧の特性を確認した。

図-2 に、ひずみ ε (伸張が+) と動水圧 P の計測結果を示す。気中 (水深 0) に比較して、水がある場合には固有周期が長く減衰が大きくなり、特に水深 0.2m の時に顕著であることが分かる。ひずみと動水圧を比較すると、逆位相の時系列となっていることが分かる。これは、壁が変形することによる、水平変位の加速度によって生じた動水圧が働いているためと考えられる。図-3 に、 $h=0.2\text{m}$ の場合の各作用高さにおけるひずみと動水圧の計測結果を示す。ひずみは、下端が大きく上端ほど小さい、自由振動のひずみ特性を示している。一方動水圧は、水平加速度の大きい P1 ではなく P3 が最も大きく、また鉛直方向の圧力差は小さいことが分かる。図-4 に、図-3 の $t=0.021, 0.03\text{ s}$ の時の動水圧鉛直分布を示す。水平加速度の大きくなる上端部ではなく、水位に対し 1/2~3/4 程度の高さの動水圧が最も大きくなっている。

3. 動的応答解析における動水圧の考慮

鉛直壁が一様に水平変位する場合の動水圧の評価式としては、Westergaard の式が一般的であるが、ここでは鉛直方向に変位量が異なる

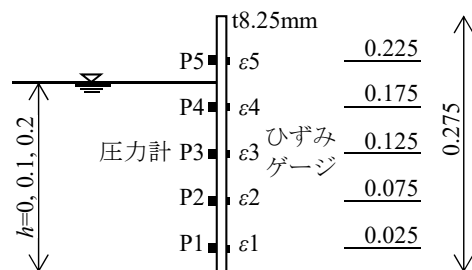


図-1 水理実験の概要

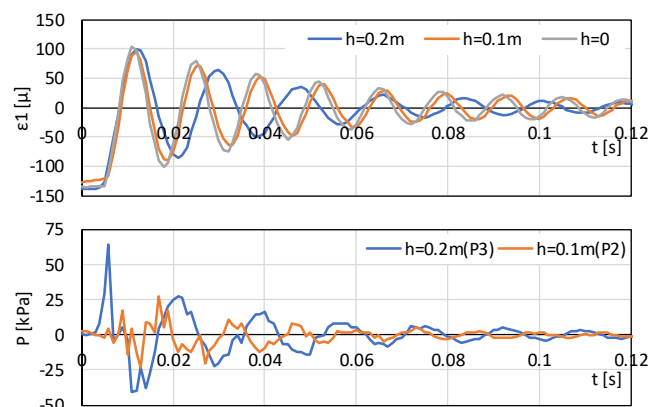


図-2 ひずみと動水圧の比較

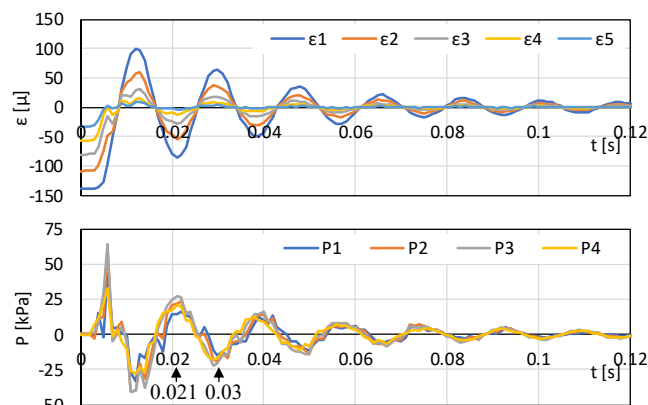
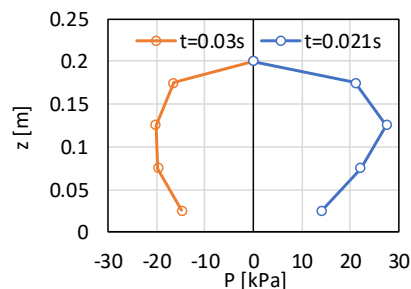
図-3 各作用高さのひずみと動水圧 ($h=0.2\text{m}$)

図-4 動水圧の鉛直分布

キーワード 動水圧, 動的応答解析, 衝撃波圧, 境界要素法, 固有周期

連絡先 〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町 344-1 大成建設（株）技術センター TEL 045-814-7234

ため、境界要素法により動水圧を算定する。 P : 圧力, ρ : 水の密度, α_n : 境界の法線方向加速度とし、境界条件を自由水面で $P/\rho=0$, 固定境界で $(1/\rho)\partial P/\partial n=-\alpha_n$ とすると、変数 P/ρ に対する境界要素法により非圧縮を仮定した動水圧の算定が可能である¹⁾。対象壁の境界を n 個に要素分割し、加速度をある 1 つの要素のみに与え、その他の要素で全て 0 とする (図-5) と、その要素が加速することにより働く動水圧を算定することが出来る。 図-6 に例として、下から 5 番目と 15 番目の要素 ($n=20$) にそれぞれ加速度 α が生じた場合の動水圧分布を示す。加速要素の位置に最大圧力が生じているが、その上下にも壁全体に圧力が生じることが分かる。

図-7 に、図-4 の動水圧分布を解析した結果を示す。入力として壁の水平加速度が必要となるが、ここでは、ひずみの鉛直分布計測結果の 2 階積分により、壁の変位形状を時系列で求め、この時間変化から各高さ (要素) での水平加速度を算出した。この各要素の加速度について、図-6 に示したような動水圧を算定し、これらを足し合わせることで、壁全体に働く動水圧を求めた。図-7 の算出結果は、動水圧の鉛直分布を適切に評価しており、本解析手法により、壁構造物が変位した際の動水圧が精度良く再現できることが確認された。

動水圧は加速度に比例することから、動的応答解析においては付加質量マトリクスとして運動方程式に考慮することが出来る。要素高を Δh とし、 j 番目要素が加速度 α_j で動いた際に i 番目要素に働く動水圧を p_{ij} とする。高さ h , 加速度 α_j で正規化し、高さ:1, 要素高さ: $\Delta h/h=1/n$, 加速度:1 とし p^*_{ij} を予め境界要素法により算定する。ここで、 $p^*_{ij} = p_{ij}/\rho\alpha_j h = p_{ij}/\rho\alpha_j n\Delta h$ である。加速度に掛かる係数 $P_{ij} = \rho n p^*_{ij} \Delta h$ が付加質量マトリクスとなるが、 $n p^*_{ij}$ は $n p^*_{ij} = p_{ij}/\rho\alpha_j \Delta h$ であるから、境界要素法における分割数によらず、これと異なる分割数 m による応答解析に対しても、内挿処理により付加質量マトリクス P_{ij} を求めることが出来る。

図-2 に示した実験の再現結果を、図-8 に示す。ここで構造物応答は、実験模型の剛性や板厚、高さを反映した、はり-質点系モデルにより解析した。また減衰としてレーリー減衰を適用しており、気中 ($h=0$) の実験結果から算出した減衰比より求めた α 減衰を与えた。図-2 と比較すると、 $h=0.1\text{m}$ ではわずかに固有周期が気中より長く、 $h=0.2\text{m}$ では顕著に固有周期が伸びる特徴を良く再現しており、構造物の振動特性を考慮した解析が可能であることが確認された。ただし減衰率については、実験結果の方が大きい。動水圧は運動方程式の加速度項にしか影響せず、減衰項 (速度項) には寄与しないが、動揺解析における造波減衰のように、速度項に係る圧力が壁の変位により生じている可能性が考えられ、減衰特性の詳細な検討が今後必要である。

4. まとめ

水理実験により、構造物前面に水がある場合は動水圧の影響により固有周期が長くなり、また水位によってその応答特性が変化することを確認した。これを構造物の動的応答解析に反映するための手法を、境界要素法に基づき構築し、その有効性を検証した。ただし減衰特性については、さらなる詳細な検討が必要である。

参考文献

- 1) 上部達生, 工藤勝巳, 永田 信: 混成式防波堤に作用する動水圧の模型振動実験, 港湾技研資料, No. 641, 1989.

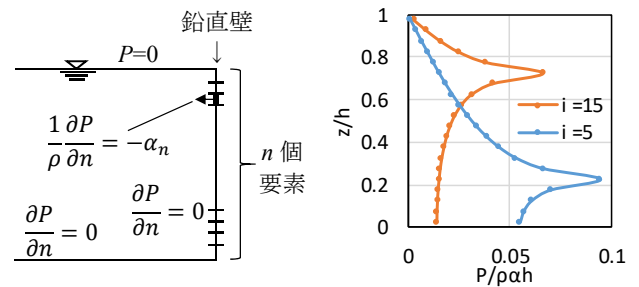


図-5 境界要素法モデル

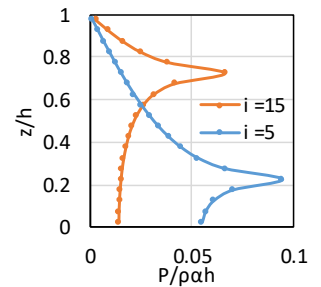


図-6 動水圧の鉛直分布

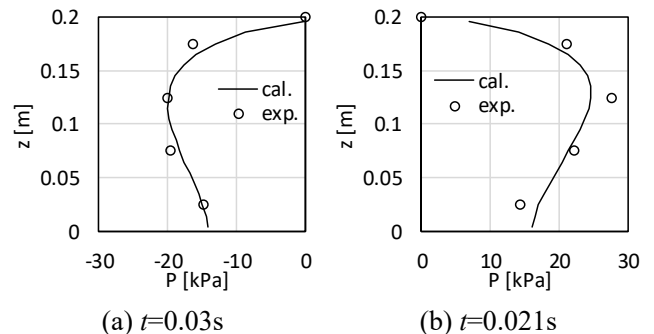


図-7 動水圧の算定結果 ($h=0.2\text{m}$, $t=0.021\text{s}$)

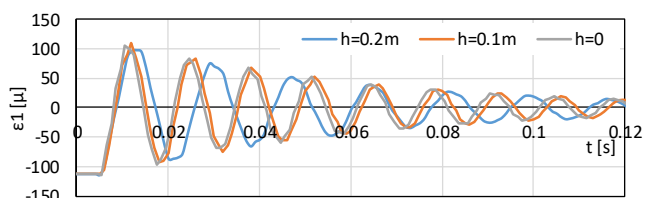


図-8 自由振動の応答解析結果