

(92) 剛壁に作用する地震時土圧の考え方について

運輸省港湾技術研究所 正会員 風間基樹

” ” 稲富隆昌

” ” 大塚幸治

1. まえがき 壁体に作用する地震時土圧の研究は古くから土質工学、耐震工学上のテーマの一つである。従来から、壁体に作用する地震時土圧を算定する方法としては、震度法をクーロン土圧に適用して求めた物部・岡部の地震時土圧公式が使用されてきた。しかし、近年土圧を受ける構造物は多様化し、また近い将来には大深度地下空間の有効利用のため、構造物はより大きな土圧を受ける所に建設されるケースが増すものと考えられる。したがって、壁体に作用する地震時土圧を再検討することは重要である。本研究は、筆者らの実施してきた模型振動実験結果から、地震時土圧に関する新しい知見を紹介し、剛壁に作用する地震時土圧について考察したものである。

2. 地震時土圧に関する模型振動実験とその考察

著者らは、振動時の土圧を計測出来る模型ケースンを製作し、ケーソン・地盤系の模型振動実験を実施してきた^{1)~3)}。図-1は、ここで説明する模型地盤の断面を示したものである。想定した構造物は、ケーソン式護岸(ケース1)と埋設剛体構造物(ケース3)であり、ケーソンの壁面は周辺地盤に比較して相対的にかたく剛壁と見なせる。また、構造物の重量が地震時土圧に及ぼす効果を検討するため、ケーソンの中詰め砂を除去した断面(ケース2、4)の実験も実施した。振動台に入力した波形は正弦波であり、応答が定常になるまで加振した。詳しい実験方法は文献1~3)を参照されたい。なお、本研究で使用する土圧に関する用語の定義は以下のとおりである。まず、振動が発生する前に作用している土圧を“静的土圧”、この静的土圧から振動中の動的変動分を“動的土圧”と定義する。“地震時土圧”は振動前の静的土圧に動的土圧を重ね合わせたものとする。

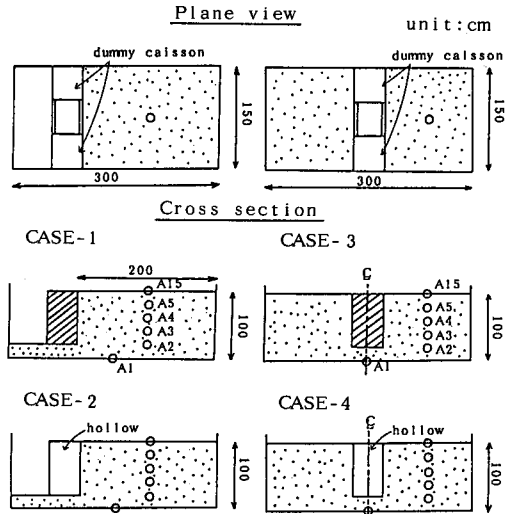


図-1 模型地盤の断面

2.1 動的土圧の周波数依存性 図-2は、ケース1、3の実験結果で、水平方向の動的土圧合力を入力振動数に対して示したものである。動的土圧合力は、入力振動数が地盤の共振振動数に近づくときと増大する。

また、入力加速度が大きいほど、土の材料非線形性を反映して、動的土圧は低振動数域から大きくなる。特徴的なのは、片側のみ地盤を有するケーソンに作用する共振時の土圧合力は、入力加速度が大きくなっても余り変化しないのに対して、両側に地盤を有するケーソンに作用する共振時の土圧合力は、入力加

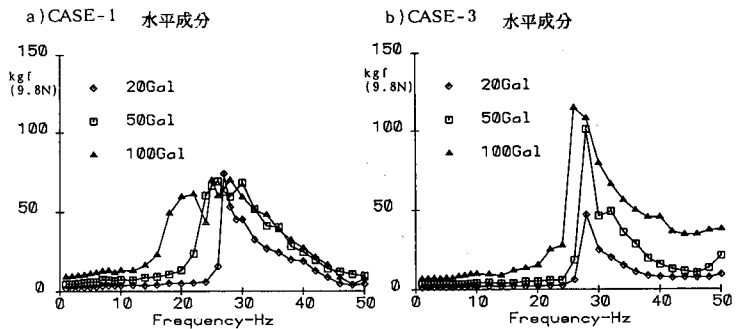


図-2 動的土圧合力の周波数依存性

速度の増大とともに大きくなることである。ケース1の場合、ケーソンは共振時に容易に変形すると考えられるので、この共振時の動的土圧合力の上限は壁体がある程度変形したときの限界値と考えられる。

このように、動的土圧は地盤の一次共振振動数付近で増幅される。今、図-3のように高さHの壁体が比較的固い地盤上にあり、背後にせん断波速度Vsの地盤があると考え、背後地盤の一次共振振動数は概ねVs/4Hで表わされる。また、仮に実際の地震動の主な振動数成分を1~3Hz、背後地盤のVsを150~300m/s程度と考えれば、背後地盤

の共振振動数がちょうど地震動の主振動数成分と一致する領域は図中のハッチで示した領域となる。この領域は、1~3Hzの卓越を持つ地震動が来たとき、動的土圧が増幅される壁高と背後地盤のVsの関係を示している。軟弱な地盤中に壁高の高い構造物を建設する場合には、このような特性を十分考慮する必要があると考えられる。

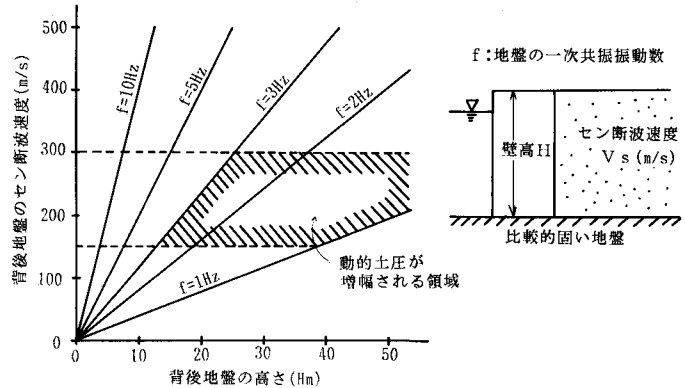


図-3 動的土圧が増幅される壁高と背後地盤Vsの関係

2.2 動的土圧に及ぼすケーソン重量の影響 図-4は、50Gal実験の動的土圧合力をケーソンの重量の大小で比較したものである。動的土圧は、ケーソン重量の大きい方(ケース1、ケース3)が、小さい(ケース2、4)方より大きい。これは、動的土圧がケーソンの慣性力の大きさによって変化することを示している。このような傾向は、吉川らが実施した模型振動実験結果と同じである⁴⁾。この結果は、ケーソンに作用する慣性力、

動的土圧、および動的な底面摩擦力が、釣り合っていることを考えれば当然の結果と思われる。すなわち、動的土圧は地盤のみの特性から考えるのではなく、地盤・構造物系全体として考える必要がある。

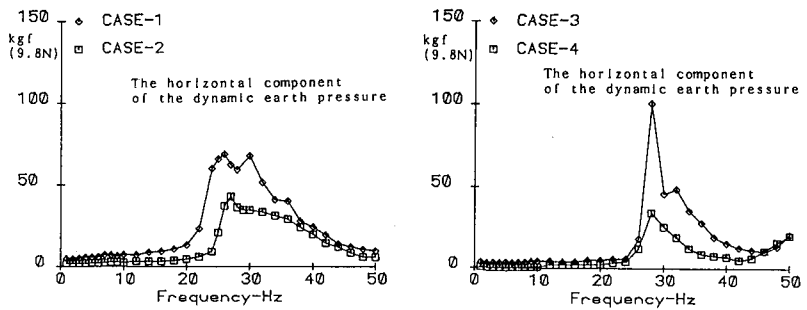


図-4 動的土圧に及ぼすケーソン重量の影響

2.3 慣性力と動的土圧合力の位相差ならびに動的土圧の分布形状 図-5は、同時刻に計測されたデータを用いて、ケーソンに作用する力の釣合および動的土圧の分布形状を検討したものである。同図は、50Gal実験の入力振動数が10Hzのときのケース1およびケース3の結果である。ケース1は、ケーソンの底面摩擦力が最大となる時刻、また、ケース3の場合は、動的土圧合力が最大となる時刻で検討した。図中の地盤とケーソンの変位、および両者間の相対変位は、加速度記録から求めた。また、相対変位の符号は縮む側を正とした。まず、ケーソンに作用する力の釣合を見ると、動的土圧合力と底面摩擦力の向きは、慣性力に対して逆向きである。すなわち、動的土圧と摩擦力は、ケーソンの慣性力に対して、抵抗側に作用していることを表している。また、上下方向の動的土圧合力は、ケーソンの回転運動に抵抗するように作用している。なお、慣性力と動的土圧合力の位相差について時刻歴波形から検討したところ、他の振動数ならびに他の実験ケースでもほぼ逆位相であった。仮に、このことがあらゆる場合に成立するとすれば、

動的土圧はケーソンの慣性力に抵抗するため、ケーソン岸壁等の合理的な地震時安定計算法が提案できると考えられる。しかし、ケーソンの底面および側面と接する地盤の剛性の大きさ、あるいはケーソン上の構造物の存在によっては、ケーソンの慣性力と動的土圧の位相関係が今回の実験結果と異なる可能性もある。したがって、どのような場合にケーソンの慣性力と動的土圧が逆位相になるのかを明らかにする必要がある。次に、動的土圧の深さ方向の分布形状をみると、三角形分布ではなく、概ね、ケーソンと地盤の相対変位に対応していることがわかる。また、底面の動的土圧分布はケーソンの回転変形に対応している。

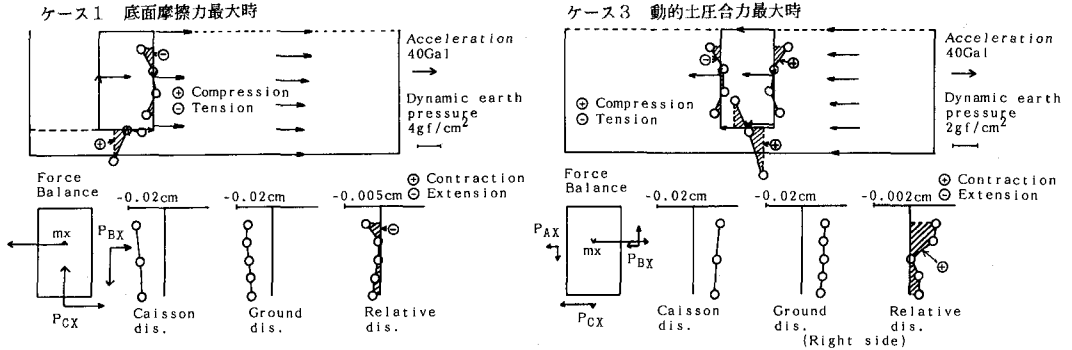


図-5 ケーソンに作用する力の釣合、動的土圧の分布形状と地盤とケーソンの相対変位の関係(10Hz)

3. 物部・岡部式の適用性についての考察 前述の実験結果を見ると、実際の地震時土圧現象はどうも物部・岡部の考えたものとは異なるように思われる。なぜなら、動的土圧の分布形が明らかに三角形分布と異なること、ケーソンの重量の大きさによって動的土圧が異なることなどは、物部・岡部の考え方では説明できないからである。ここでは、物部・岡部式で算定される土圧合力と実験値を比較し、同式の適用性について考察する。

図-6は、100Gal実験の結果で、静的土圧合力、ならびに静的土圧に動的土圧を重ね合わせた地震時土圧合力を入力振動数に対して示したものである。ケース3の結果は、ケー

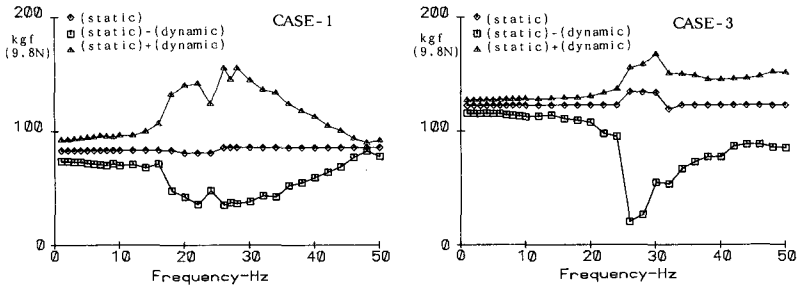


図-6 地震時土圧の周波数依存性 (100Gal実験)

ソン右側面に作用する土圧合力である。実験による地震時土圧は、同一の入力加速度でも、このように振動数に大きく依存する。これは、背後地盤の加速度応答に応じて動的土圧が増幅されたと考えられる。そこで、ケース1の場合について横軸にケーソンの中間深さと同一レベルの背後地盤の応答加速度をとって、地震時土圧合力を整理したものを図-7に示す。図中では、加速度の作用方向を考慮した。図を見ると、地震時土圧合力は背後地盤の応答加速度の大きさに対応して変化している。同一入力加速度のデータを比較すると、低い入力加速度ほど初期勾配が大きい。これは、裏込め地盤内の加速度分布の相違あるいは裏込め地盤内の応力状態の相違によると思われる。次に同図の横軸は加速度であるが、別の見方をすれば裏込め地盤に発生したひずみの大きさと見なすことができる。物部・岡部式で与えられる土圧は、裏込め地盤に大きなひずみが発生したときの極限の土圧と考えられるので、横軸の負側を主動側、正側を受働側と考えれば、同図の両側に物部・岡部式による土圧合力を記入できる。この物部・岡部式による値と実験値を比較すれば、主動側の実験値の中には物部・岡部式による地震時主動土圧合力より小さなものがある。逆に、受働側においては実験値は同式より極端に小さく、今回の実験程度の加速度では地震時受働状態に

達していない。このように今回の実験では、裏込め地盤の加速度が200Gal以上になっても物部・岡部が想定したような状態にはならなかったと言える。

次に、単純に物部・岡部式が地震力を静的な力に置き換えていることを考慮し、低振動数領域の実験値と同式で算定される値を比較してみる。なお、実験によるとケーソンの慣性力と動的土圧の位相は逆位相となる。そこで、物部・岡部式と比較する地震時土圧は、静的土圧から動的土圧を差し引いた土圧を考慮することとした。この地震

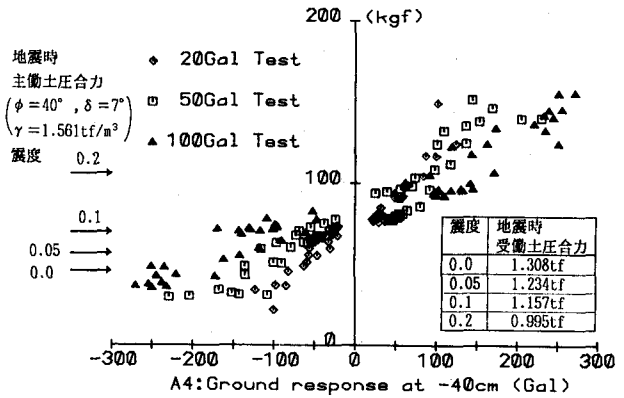


図-7 背後地盤の応答加速度と地震時土圧合力の関係

時土圧は、静的土圧が常に同じとすれば、地震力が大きくなるほど小さくなる。これは現行の地震時主働土圧と全く逆の傾向を示すことになる。したがって、すべての震度に渡って物部・岡部式と実験値を比較することはできないので、ここでは一つの例として100Gal実験における実験結果を物部・岡部式と比較することとした。図-6から、10Hz以下の低振動数における土圧合力は、ケース1の場合、70~74Kgf、ケース3の場合、約117Kgfである。この値を物部・岡部式と比較したのが図-8である。物部・岡部式で実験結果と同じ土圧を算出するためには、ケース1の場合、震度を0.09~0.13、ケース3の場合は0.20~0.24に選ばなければならないことがわかる。実験の入力加速度を重力加速度で除して求めた震度は、0.1である。したがって、物部・岡部式は、ケース1の場合、比較的妥当な結果を与えるが、ケース3の場合には対応しない。

これは、模型ケーソン前面の地盤の有無よりもむしろ、振動前に作用している静的土圧の相違によるところが大きいと考えられる。

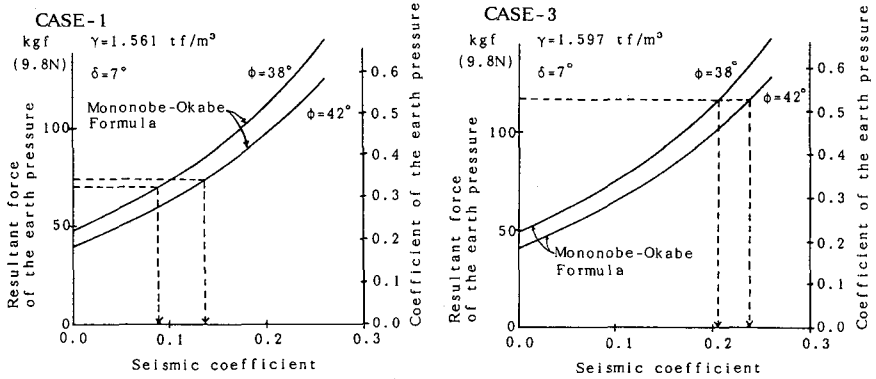


図-8 10Hz以下の主動側の地震時土圧合力の実験値と物部・岡部式との比較

4. 結論およびあとがき

ケーソン・地盤全体系の模型振動実験から、剛壁に作用する地震時土圧について考察した。実験結果の考察により、地震時土圧は塑性平衡状態を考えた土圧より静的土圧に動的土圧を重ねたものとして取り扱う方が一般性があると考えられる。また、その際には、土圧を地盤・構造物全体として取り扱う必要がある。なお、動的土圧の大きさは地盤状態によって影響を受けると考えられるため、静的状態の設計で使用すべき土圧との整合性を含めて、地震前の地盤状態をどのように評価するかが重要と考えられる。

参考文献 1) 風間他：剛体ケーソンに作用する動的土圧に関する模型振動実験、第22回土質工学研究発表会、1987年。2) 風間他：剛体ケーソンに作用する慣性力と動土圧に関する模型振動実験、(第2報)、第23回土質工学研究発表会、1988年。3) 風間他：剛体ケーソンに作用する慣性力と動土圧に関する模型振動実験、第19回地震工学研究発表会、1987年。4) 吉川他：ケーソン基礎の動的挙動解明のため模型実験、土と基礎、Vol. 37, No.4, 1989年。