

(84) 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

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

ケーソン式護岸に代表されるような剛な重力式の構造物の地震時の安定性は、構造物に作用する慣性力と地震時の土圧および底面の摩擦力の釣合によって評価される。通常、その安定性の評価手法は、震度法あるいは修正震度法に基礎をおくことが多い。しかし、大型地中構造物や根入れの深い構造物に対して、これらの評価手法をそのまま使用すると非常に大きな断面となり、経済性が大きくそこなわれる場合がある。すなわち、これら構造物に対しては、震度法による現象の単純化が実際の現象を十分に説明できないことを示唆している。この原因は、特に、構造物に作用する慣性力と地震時土圧が別々のプロセスで決定され、実際に構造物—地盤系が動的相互作用を行った結果としての外力になっていないところにあると考えられる¹⁾。地震時の土圧に関して言えば、従来の模型実験の多くは構造物や地盤の固有振動数に対して比較的低い振動数領域で行われ、背後地盤の振動の影響が小さい領域の実験である。また、最近の動的解析手法の発達にもかかわらず、地震時土圧を対象とした数値解析もほとんどないのが実状である。このことは、構造物が地震力を受ける以前の静的な釣合状態がよくわかっていないことや、塑性平衡状態を考えた地震時土圧と、動的解析法による振動土圧との対応がつけにくいことにも原因がある。

本報告では、以上の点を説明するための第一ステップとして、動的な土圧を計測できる模型ケーソンを使用したケーソン—地盤系の模型振動実験の結果を報告する。

2. 模型ケーソン

写真-1に、実験に用いた模型ケーソン(800H×500D×439W:mm)を示す。模型ケーソンには土圧合力を計測するための、アルミニウム製の受圧板が設置され、3ヶ所の2軸の荷重計により支持されている。また、土圧分布を計測するための土圧計が受圧板の中心に深さ方向に7個、ケーソン底面に3個、それぞれ据え付けられている。振動実験においては、荷重計は受圧板の慣性力も計測してしまうが、受圧板の慣性力はデータ処理の段階で除去される。この点についての著者らの検討によると、受圧板の慣性力は低い振動数ほど誤差なく除去できることと、計測された土圧合力に比較して受圧板の慣性力は十分小さい(数%以下)ことが明らかにされている²⁾。また、受圧板を含むケーソン全体が十分剛体的運動をすることも確かめられている。

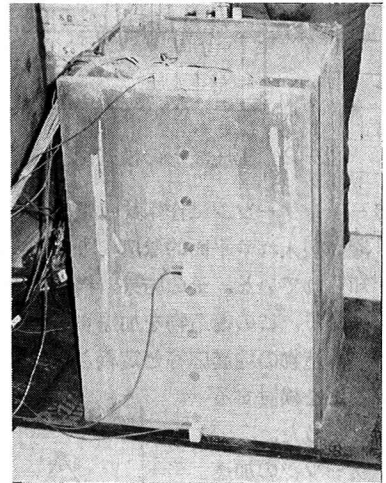


写真-1 模型ケーソン

3. 実験方法および実験結果

剛なケーソンに作用する外力の特性を把握するための基本的なケースとして、図-1に示す2つのケースの実験結果を説明する。模型Aは、ケーソンの片側のみに地盤を有する重力式護岸、模型Bはケーソン前面にも地盤がある埋設構造物を想定している。模型地盤は、ケーソン立て込み後、20cm程度上方からまき出すことにより作製した。地震時土圧を対象とする実験では、計測される土圧は一般に図-2のようになる。既往の実験結果によると、地震時土圧成分のうち残留土圧成分も相当大きく、特に低い振動レベルにおいてその傾向が強い事が報告されている³⁾。そこで今回は、まず弾性的な動的土圧の特性を明らかにするために、地盤完成後、200Gal、30Hzで30秒間振動させ、本実験時にはなるべく残留土圧が発生しない

ように初期設定した。この締め固めによる地盤の沈下分は、砂を天端まで補足した。こうして作製された締め固め後の模型地盤の物性を表-1に示す。また、模型ケーソン底面には摩擦係数増加のための厚さ3cmのゴムマットを敷いた。これは、模型ケーソンが容易に滑動しないようにするためのもので、摩擦係数は0.84以上を有するものである。振動台入力波はすべて正弦波で10波とし、5Hzから5Hzおきに90Hzまで与え、それぞれの入力加速度レベルが20, 50, 100, 200Galであるステージテストとした。高い振動数まで実験を実施したのは、地盤の振動特性の影響と幾何学的動的相互作用について検討するためである。

なお、初期の砂の詰まり具合によっては残留土圧成分も無視できなくなり、非線形性の強い現象になる。

また、ケーソン底面の摩擦特性や支持機構の違いにより、ケーソン-地盤系の振動性状も異なってくることが予想される。これらの点については、別途実験を実施し別の機会に報告したい。

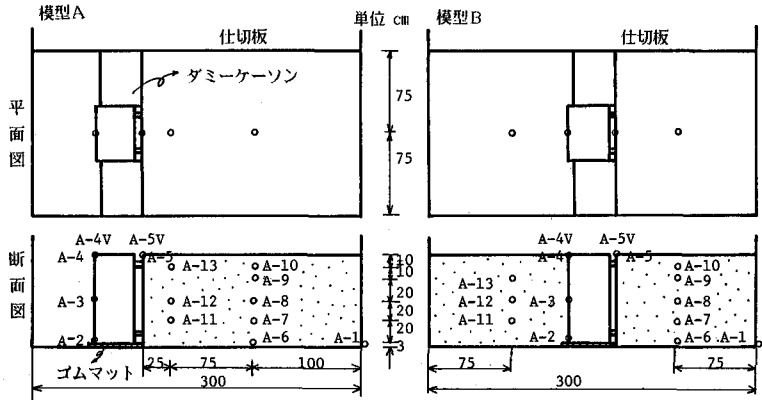


図-1 模型の平面図及び断面図

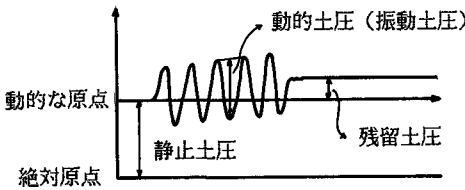


図-2 土圧波形の模式図

項目	模型A	模型B	
		前面側	受圧板側
比重	2.7	2.7	
単位体積重量	1.627t/m ³	1.566	1.601
相対密度	0.724	0.549	0.651
間隙比	0.659	0.724	0.686
せん断波速度	104.6m/sec	—	103.4

表-1 模型地盤の物性

3-1. ケーソンに作用する慣性力

深い根入れや平面的な広がりのある構造物は、空間的に位相差を有する地動を拘束する性質があることが知られている。その結果、構造物を加振するのに有効な地震動は、構造物周辺地盤の地震動と異なるものになる。この構造物を加振するのに有効な地震動は、“有効入力地震動”と呼ばれ、物理的には質量の無い構造物の地震応答と定義される⁴⁾。本実験においては、高い振動数までの入力を与えることによりこの効果を検討することとした。

ケーソンの加速度応答は、ケーソンを剛体とみなし、ケーソン中心における並進水平運動と回転運動に分離した⁵⁾。図-3は、ケーソンの水平並進運動と回転運動

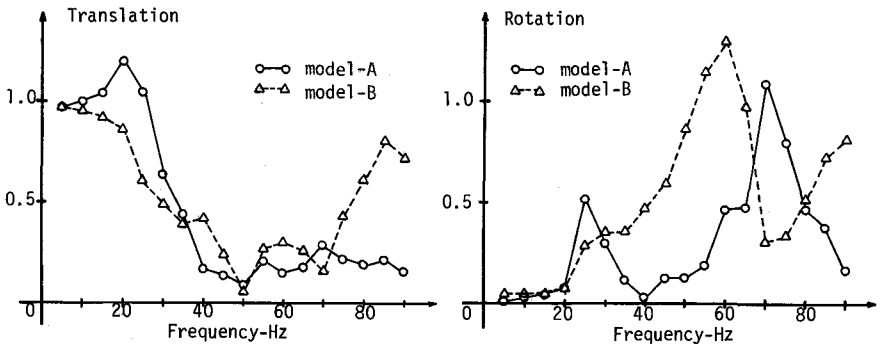


図-3 砂地盤表層に対する模型ケーソンの応答倍率

(回転に伴うケーソン上端の水平加速度)の砂層表面に対する応答倍率を示している。前面にも地盤を有する模型Bの加速度の応答性状は、既往の有効入力地震動の特性^{1), 4)}と一致している。このことは、ケーソン自身の質量がケーソンの応答性状に及ぼす影響が小さいことを意味している。一方、前面に地盤の無い模型Aの応答は、水平運動および回転運動ともに地盤の共振振動数付近で増幅され、地盤の表層よりも大きな応答を示す場合もある。特に、水平成分では地盤の一次の、また回転成分では地盤の二次の共振振動数の影響が大きい。これら両断面の違いは前面の地盤の有無に起因することは明白である。図-4は、水平並進の加速度にケーソン質量を乗じ、慣性力に直したものである。ケーソンの慣性力は、地盤の共振振動数付近で増幅され、入力加速度レベルが大きいくほど低振動数域から慣性力が大きくなり明らかに地盤の非線形性の影響を受けていると言える。また、前面に地盤のない模型Aにおいては、小さな加速度レベルと大きな加速度レベルとで慣性力の最大値に大差が無いのが特徴である。

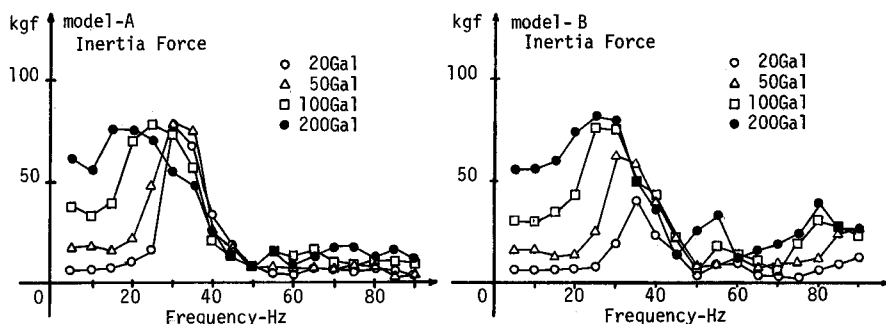


図-4 模型ケーソンに作用する慣性力の振動数依存性

3-2. ケーソンに作用する動的な土圧合力

模型ケーソンに作用する動的な土圧合力の振動数依存性を示したのが図-5である。図中には、静的な土圧合力も、参考のため示してある。動土圧合力は、慣性力の形と類似し

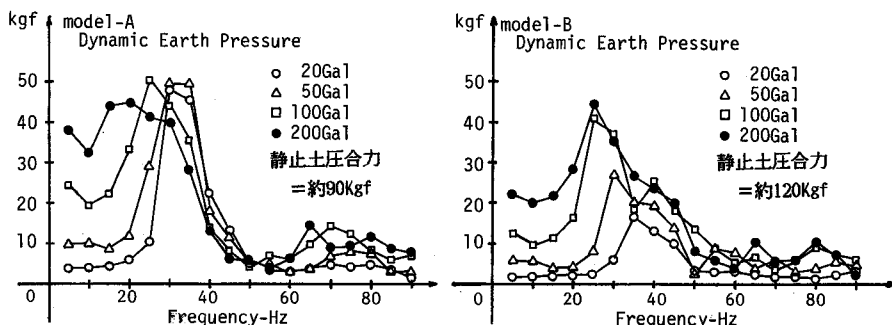


図-5 模型ケーソンに作用する動的土圧合力の振動数依存性

ており周辺地盤の振動特性の影響と地盤の非線形性を受けていると言える。また、その値は静的土圧合力に比して、最大で約60%ほどであり、無視できるオーダーではない。ちなみに、静止土圧合力と動的土圧合力とを加えて、土圧係数を逆算すると、その値は模型Aでは0.163~0.549(静止状態0.356)、模型Bでは0.418~0.631(静止状態0.471)となる。物部・岡部式において砂の内部摩擦角 $\phi = 40^\circ$ (三軸試験による)、壁面摩擦角 $\delta = 15^\circ$ 、震度 $kh = 0.1$ とした場合の主働土圧係数の値は0.24であるから、模型Bにおいては、主働状態には達していないことがわかる。また、模型Aでは主働土圧よりも小さな土圧になる場合もある。なお、模型Aにおいては、慣性力の特徴と同じく小さな加速度レベルと大きな加速度レベルとで、動的な土圧合力の最大値に大差が無い。

図-6は、慣性力と動土圧合力の時刻歴を重ねて描いたものである。これらは各振動数について検討されたが、ここではその代表として模型Aの100Gal実験の5Hz, 25Hz, 65Hzの結果を示す。図を見ると、5Hz, 25Hzにおいては、慣性力と動的土圧合力は逆位相になっている。しかし、65Hzにおいては過渡的な現象が現れ、定常と思われるところでは、5Hz, 25Hzに見られるほど明瞭に逆位相ではなくなっている。しかし、そ

の場合の振幅は小さい。以上は、加速度レベルや断面の違いに係わらず同様な結果であった。65Hzに見られるような過渡的な現象は、50Hz付近から出現している。その意味では、波数10波では50Hz以上の振動数では十分に定常状態に達しているとは言えない。この点については、さらに詳しい検討が必要である。

3-3. 動的土圧の分布形

受圧板前面にとり付けられた、土圧計によりケーソンに作用する動的土圧の分布形を検討した。

図-7は、深さ方向の動的土圧の振幅を100Gal実験の10, 20, 30, 40Hzについてプロットしたものである。動的な土圧振幅は、三角形分布ではなく、表層付近も大きいことがわかる。図の様な土圧振幅の分布は、ケーソンの回転運動にも大きく関係していることが推測される。なお、ここには紙面の都合で示せなかったが、同一時刻のデータから土圧の分布形を検討したところ、土圧の分布形状はケーソンと地盤の相対的運動で説明できることがわかった。

4. あとがき

本文では、ケーソン-地盤系の模型実験結果を説明し、動的な土圧や慣性力の基本的特性を説明した。結果を見ると、動的な土圧と慣性力は密接な関係があり、両者を別々の立場で議論できないこと、弾性的な土圧も相当大きいことが確認された。しかし、慣性力と動的な土圧は互いに相殺する方向に作用している場合も多く、経験的に震度法で安定計算した構造物が設計で考慮した程度の地震動を受けても被災するケースが少ないという事実と矛盾するものではない。しかし、土圧を受ける部分が鉛直方向に深い構造物や軟弱地盤中の構造物に作用する動的な土圧は、地盤の動特性に大きく影響がされることが予想されるので、注意を要する。

〔参考文献〕1) 風間基樹・稲富隆昌, "根入れのある剛体構造物の地震時安定性に関する解析的研究", 港湾技術研究所報告, Vol.25, No.3, 1986年9月, pp.71~124. 2) 風間基樹・稲富隆昌・大塚幸治, "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6月. 3) 石井靖丸・林聡・荒井秀夫・土田肇, "振動中における乾燥砂の運動性状に関する研究(第三報~第五報)", 港湾技術研究所報告, 10巻11号, 1960年. 4) 原田隆典・久保慶三郎・片山恒雄, "地震波の有効入力の考え方とその実測例による検討" 第15回地震工学研究発表会, 1979年, 7月, pp.149~152. 5) 風間基樹・今村俊博・稲富隆昌, "地震時の地中埋設剛体構造物の回転運動に関する一考察, 第40回土木学会年次学術講演会, 1985年9月, pp.677~678.

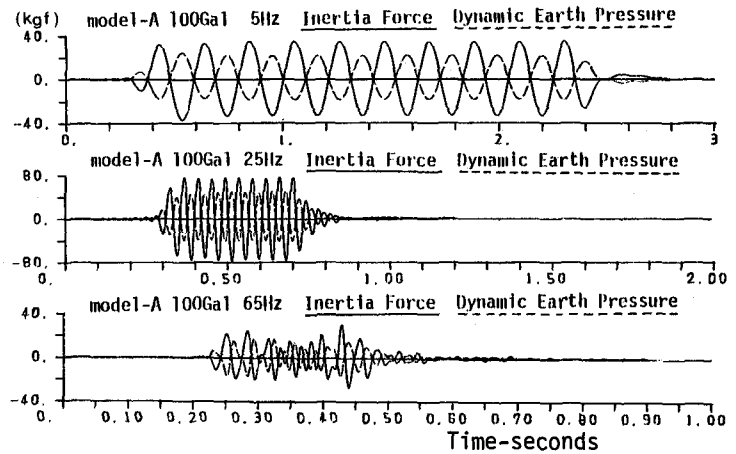


図-6 慣性力と動的土圧合力の位相特性

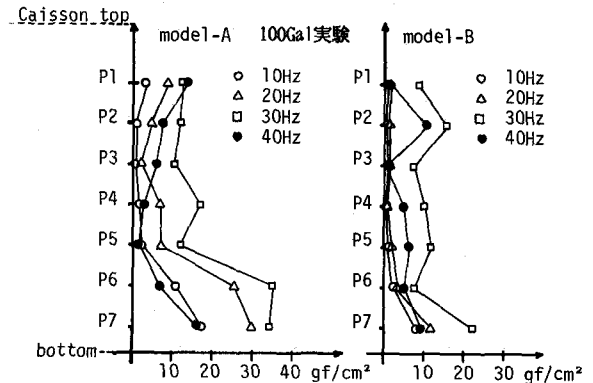


図-7 動的土圧の振幅の深さ方向の分布