

連結式多重設置ケーソン構造の 地震時挙動に与える位相差の影響

松田 隆¹・穴倉知広²・飯田康博³

¹大林組技術研究所 土木構造研究室 室長（〒204-8558 東京都清瀬市下清戸4-640）

E-mail:matsuda.takasi@obayashi.co.jp

²大林組 東京本社土木設計部 主査（〒108-8502 東京都港区港南2-15-2品川インターシティーB棟）

E-mail:shishikura.tomohiro@obayashi.co.jp

³大林組 東京本社土木設計部 副主事（〒108-8502 東京都港区港南2-15-2品川インターシティーB棟）

E-mail:iida.yasuhiro@obayashi.co.jp

通常の設置型ケーソンに比べ軽量の低反力ケーソンの地震時応答特性に関して、位相差を考慮した数値解析による検討を行なった。ここでは、すべり安定性に関係するケーソンの応答加速度と支持機構に係る回転変位に注目し、それらに影響を与える項目を抽出しパラメトリックな解析を実施した。構法的には低反力型ケーソンを海上空港に適用する場合を想定し、それぞれのケーソンを桁で連結した。本報告は、連結式多重設置ケーソンにおける実体波の位相差の影響を地震応答解析用いて検討した結果を述べる。その結果、位相差の影響は、連結数、地盤剛性、連結力によって異なることが分かった。最終的には、L2地震動で地震の発生方向すなわち、地震動の伝播方向が特定できるような場合、各構造物を連結することで、応答が低減できることがわかった。

Key Words : *lightweight type moving recast caissons, offshore airport, seismic design, phase-contrast, and earthquake response analysis*

1. はじめに

低反力型ケーソンとは、従来岸壁等に用いられているケーソンに比べ薄い壁厚で構成されるもので、軽量構造のため接地圧は小さくなる。そのため、軟弱地盤上に設置する場合、常時安定性に必要な地盤支持力は従来型のケーソンに比べ小さくなる。その結果、原地盤で支持力が不足する場合、必要な地盤改良が低減できるメリットがある。その反面、接地圧が小さくなるため摩擦抵抗が小さくなることから、地震時に発生する水平力に対する滑動抵抗力も低下する。地震時の滑動安定性に関しては、水平支持力の低下と発生慣性力の低減を定量的に検討する必要がある。本研究では、低反力型ケーソンを連設して海上空港に適用する場合を想定し、隣接するケーソンを連結することが応答加速度に影響を与えることを検討した。具体的には、連結方向に対する実体波の位相差¹⁾の影響を、地盤側の要因と構造物側の要因から把握した。本報告では、低反力ケーソンの加速度・変位と地盤の反力に関する地震応答解析結果を述べる。

2. 地震応答解析モデル

(1) 解析対象

図-1に低反力型ケーソンの断面を示す。ここでは、原地盤最表層を水深17m位置にあるN値2の粘性土とし、地盤改良を施したうえでケーソンを設置することを仮定した。従来型ケーソンあるいは盛土構造では30～70%改良率のサンドコンパクションパイルが必要であるが、低反力ケーソンが軽量であるため改良率20%のサンドコンパクションパイルにおいても震度法によるレベル2地震動に対する設計は成立する。

ケーソンの幅奥行きおよび高さは30mで、外壁および中間壁の厚さは60cmである。ケーソン内は平均海水位位置まで海水を注水し、その位置まで中間隔壁を設置する。

各ケーソンは15m長、厚さ90cmのP C製の床版で連結するが、ケーソン外壁と床版は基本的にピン結合とした。すなわち、床版の曲げ変形はケーソンに影響しない構造とした。水平力の伝達に関しては、ケーソン側壁の耐荷力特性を考慮して、床版の水平変位を100%伝達させないようにした。具体的には

床版軸剛性の20%までを側壁に伝達させるダンパーを設置する構造となる。

(2) 解析モデル

地震応答解析は、2次元の梁ばねモデルによる位相差を考慮した時刻歴応答解析手法を用いた。図-2に地盤～構造物連成系の解析モデル（図では2連の場合）を示す。解析モデルは、ケーソン本体と桁をはり要素で、地盤をばね要素で、すべて線形要素を用いた。地盤ばねは、地盤改良による初期剛性の上昇と、1次元応答解析SHAKEによる強震時の地盤剛性の低下を考慮した。地盤ばねは、水平方向成分と鉛直方向成分を考慮し、3次元FEM解析により算定した。具体的には、ケーソン及びケーソン幅の5倍の地盤領域をモデル化し、水平方向と鉛直方向の並進変位が生じる荷重を与え、荷重変位関係を求めることで評価した。地盤のせん断剛性に関しては、1次

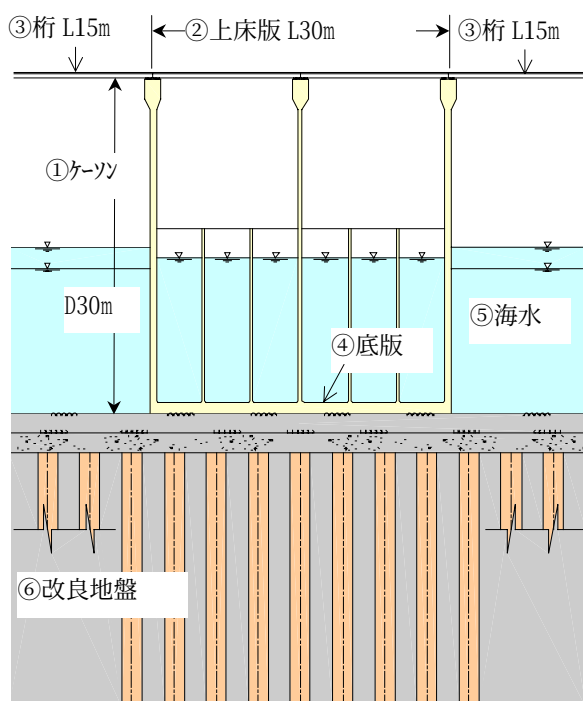


図-1 低反力ケーソン断面構成

元地震応答解析時の等価剛性を用いた。周辺海水は付加質量で考慮したが、連設の影響は無視した。基本とするモデルでは10連設とし、その連設ケーソンの全長は435mになった。

(3) 解析パラメーター

地震応答は入力を含む地盤側の影響と、桁～ケーソン接合方法など構造側の影響で決まる。地盤側の影響は、支持地盤の剛性としての地盤改良率と、入力地震動の位相差すなわち実体波の群速度量とした。構造側の影響はケーソンの連設数とケーソン間の桁～ケーソン接合部の剛性とした。接合部剛性の基本を桁剛性の20%とした。

入力地震動は、工学的基盤GL-60mで規定したレベル2を用いた。GL-60m位置での最大加速度は280Galであり、海底面までは1次元の重複反射理論により算定し、その結果、海底面最大加速度は390Galとなった。この位置での加速度応答スペクトルを図-3に示す。位相差は比較的深い基盤層のS波伝播速度によって生じると仮定した。ここでは、ある程度の表層物性の影響を受けると仮定し、800m/secの伝播速度（ケーソン間の位相差は0.056秒）を基本とした。解析ケースでは、450～2400m/secの範囲で伝播速度の影響を検討した。

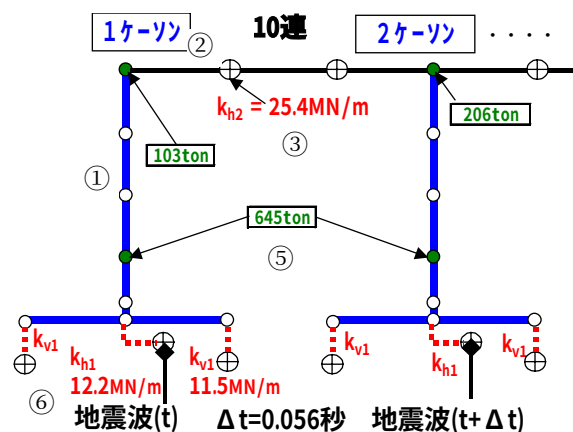


図-2 解析モデル

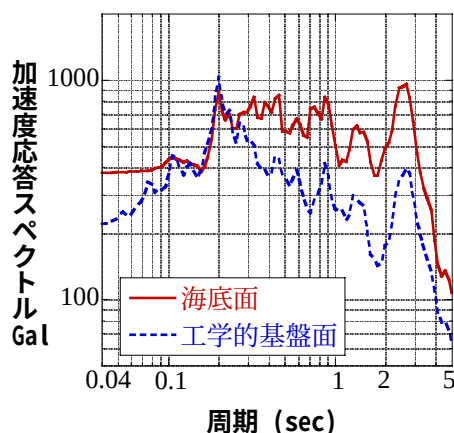


図-3 入力地震動特性

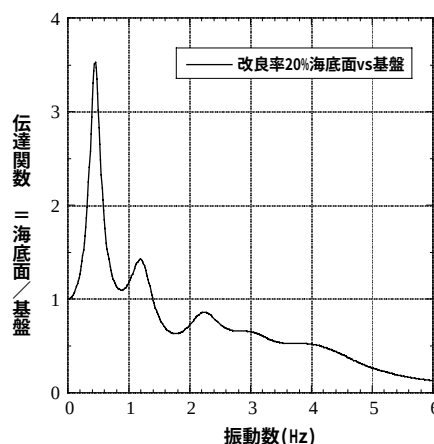


図-4 地盤の伝達関数

図-4に工学的基盤に対する海底面の強震時の伝達関数すなわち表層の共振振動数を示す。0.4Hz, 1.2Hzにピークがあり、後述するケーソンの固有振動数からは離れている。

3. 解析結果

(1) 位相差入力の影響

図-5に単設ケーソンに対する頂部加速度と頂部及び底版の変位の最大応答比を示す。最初に地震動が作用する1番ケーソンの応答が一番小さくなり、その位置での加速度に関しては単設の場合の50%程度の応答になっている。地震波到達が遅くれる（=ケーソン番号が大きくなる位置）に従い単設に対する加速度低減率は小さくなる。頂部変位も加速度の低減傾向と同様で、地震波が到達する順番に低減率は大きくなっていく。最大変位低減率は10%程度であり、加速度に比べ低減率は小さい。底版変位の低下率もさらに小さくなり、単設の応答よりははや小さくなるに留まる。

図-6に各ケーソンの底版に対する頂部の伝達関数を示す。1番ケーソンでは1次ピーク振動数は単設

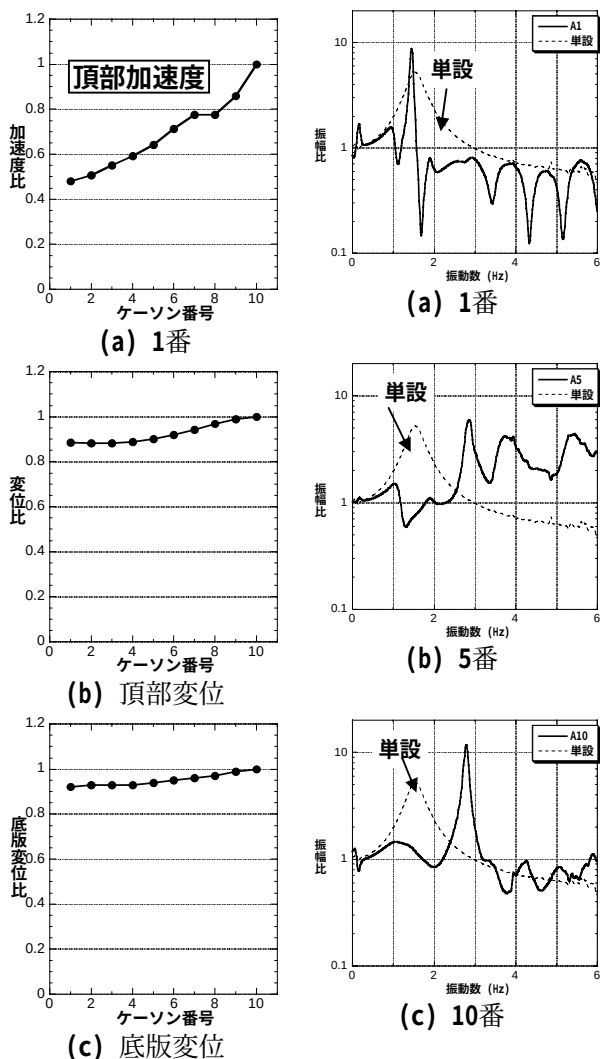


図-5 単設に対する倍率

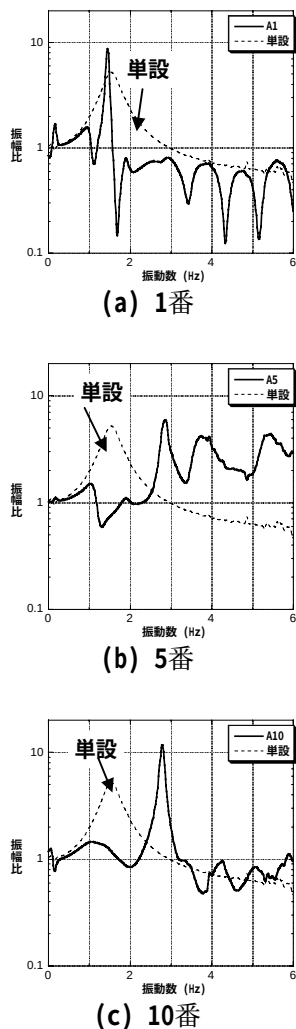


図-6 頂部/底版伝達関数

の場合の1.54Hzと同様であるが、その振動数での振幅は単設よりやや大きくなっている。1次ピークより高い振動数での応答が小さくなっていることが特徴的である。5番ケーソンではピーク振動数がほぼ3Hzと単設の倍振動数となり、6Hz以下の振動数領域で複数のピークが現れることが特徴的である。10番ケーソンでも5番ケーソンで見られた3Hz付近のピーク振動数が保たれ、その振幅は更に大きくなっている。ただし、低振動数領域での振幅が小さくなる。検討対象地域では、表層に軟弱な層が存在していることから入力地震動に高い振動成分が極度に大きくなることは考えがたく、そのため低振動数領域での増幅が小さくなることは、加速度の低減効果にとって有利と考えられる。

(2) 構造物側の影響因子

図-7は桁間を接続するばね剛性の大きさをパラメーターにした頂部加速度の単設ケーソン応答に対する比を示す。図からは、桁間ばねが強くなるに従い、単設の加速度応答に比べ連設ケーソンの加速度応答が小さくなるのが分かる。特に、桁間ばね剛性が大きくなるとケーソン番号の大きい、すなわち、地震波が後に到達する位置での低減率が大きくなる。この観点からは、床版とほぼ同程度の剛性を有すばねでケーソンを連結させることが、連設全体系の加速度応答を低下させることになる。

図-8は連設数をパラメーターとした頂部の最大応答加速度を示している。図から、連設数が多くなるに従い、頂部の応答加速度が低下することがわかる。すなわち、構造物が長大になるに従い位相差入力の影響を受け、応答加速度が低下することになる。ただし、地震波到達が遅くなる（ケーソン番号が大きくなる）と応答が大きくなるのは連設数に関係なく、全体の応答を低下させるには連結する剛性が影響すると考えられる。

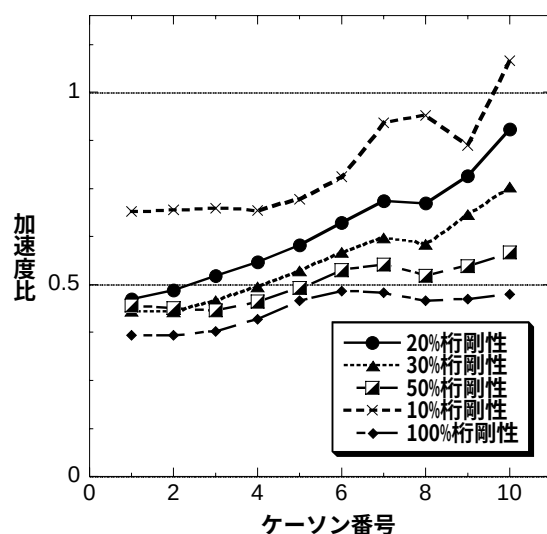


図-7 桁間ばね剛性の影響

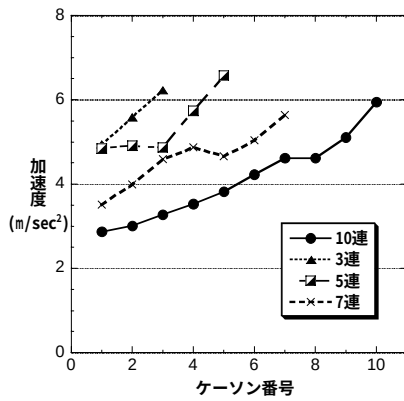


図-8 連結数の影響

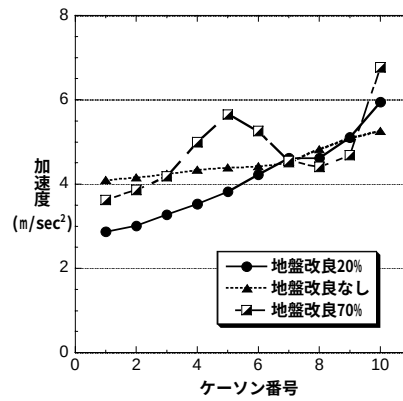


図-9 地盤改良剛性の影響

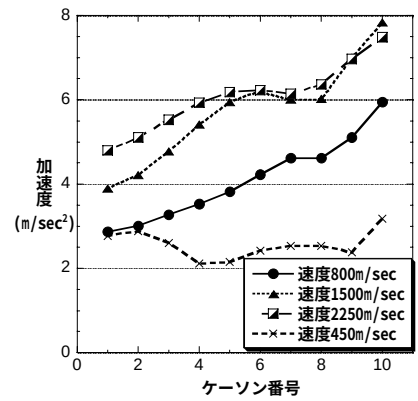


図-10 基盤S波速度の影響

(3) 地盤側の影響因子

図-9に地盤改良による地盤剛性をパラメーターとした頂部の最大応答加速度を示している。地盤改良率20%を標準とした場合、0%は20%改良のほぼ半分の地盤せん断剛性を、70%はほぼ倍の地盤せん断剛性を有することになる。解析の結果、1～7番ケーソンにおいて20%改良の加速度応答が小さくなる。これは、地盤改良が無く地盤剛性が小さい場合、ケーソンの連結効果による加速度応答低減率は小さくなるが、小さい地盤剛性のため加速度応答倍率自体が小さくなっていると考えられる。これに対して、70%改良で地盤剛性が大きくなった場合、ケーソンの連結効果は大きいなり、各ケーソンの応答の差は無くなるが加速度応答自体は、増幅特性の関係で大きくなるためと考えられる。

図-10は位相差を生じさせる実体波の伝播速度をパラメーターとした場合の頂部の最大応答加速度を示している。図から、基盤のS波速度が大きくなり位相差が小さく(1500 m/secでケーソン間の位相差は0.03秒, 2250m/secで同0.02秒)なると、応答加速度は約800Galに達する。すなわち、単設の場合に近づき連結の効果は低減する。これに対して、通常的设计で設定する工学的基盤としてのS波速度450m/sec程度で表層の位相差が生じると仮定した場合、連結の効果による加速度低減率は大きくなると

ともに、ケーソン位置に関係無くほぼ一様に低減するのが特徴的である。

4. おわりに

連設ケーソンに位相差をもった地震動を入力した場合の応答特性を解析的に検討した。その結果、連結の剛性が強いほど、連結数が多いほど、位相差が大きいくほど単設に比べ応答が小さくなることがわかった。設置地盤の剛性に関しては、低い剛性では連結効果が小さくなるが、応答の低減効果と地盤剛性に定量的な関係は見られなかった。

これらの検討は地震波が構造物に作用する際の位相差とその方向が明確になる場合に考慮が可能となる。そのため、L2地震動のように断層が仮定できる地震に有効であり、一般的な立地に対する適用に関しては更なる検討が必要であり、当該地点での地震伝播特性の調査とデータの蓄積が必要になる。

参考文献

- 1) 岡井他:地上式LNG貯槽の多点強震観測記録の分析とその考察,p178,土論集No.675,2001.4

(2003. 10. 6 受付)

RESPONSE ANALYSIS USING PHASE CONTRAST INPUT MOTION FOR CONJUNCT MULTIPLE CAISSONS

Takashi MATSUDA, Tomohiro SHISHIKURA and Yasuhiro Iida

A response analysis taking account of the phase contrast input motion for low weight type caissons. In this case 10 caissons are interconnected by RC base plates. Results from the analysis, response accelerations and displacements are decreased in proportion to the number of caissons, rigidity of interconnection member and the phase contrast time interval.