

荷役機械との相互作用を考慮した 直杭式棧橋の地震時挙動

野口 俊介¹・太田 誠二²・高橋 勝³・風間 基樹⁴

- ¹正会員 電源開発株式会社 建設部(〒104 東京都中央区銀座6丁目15番地1号)
² 電源開発株式会社 建設部 同上
³ (株)開発計算センター 科学システム事業部(〒135 東京都江東区深川2-2-18)
⁴正会員 工博 東北大学助教授 工学部土木工学科(〒980 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉)

直杭式棧橋に上載している荷役用の大型荷役機械が大地震の際、棧橋にどのような影響を与えるかを確認するために、既設火力発電所のアンローダと揚炭棧橋を対象に、アンローダを上載した揚炭棧橋のモデルを作成し、兵庫県南部地震での観測波等を用いて解析を行った。三次元FEMで、その振動特性を確認した上で、二次FEM、一次元質点系での地震時応答解析を行うとともに、三次元・二次元FEMで静的震度を加えた場合との比較を行った。

Key Words: アンローダ, 直杭式棧橋, 固有値解析, 地震応答解析

1. はじめに

兵庫県南部地震(1995年)では、港湾の荷役機械とそれを支持する岸壁・棧橋が多なる被害¹⁾を受けた。従来棧橋は、構造形式が比較的簡単で、他の係船施設に比べ軽量であることより比較的耐震性に富んだ構造物と考えられていた。しかし、棧橋上に荷役作業に用いるコンテナクレーン、アンローダ等の大形荷役機械が上載している場合の大地震時の挙動について十分な検討はされていない。

そこで本報告では、既設火力発電所施設のアンローダと揚炭棧橋を対象に、FEMによる三次元モデル、二次元モデル、集中質量法による一次元モデルを用いて、以下の検討を行った。

- 1) 三次元モデルでのアンローダ、揚炭棧橋の固有値解析を行い、その振動特性を把握した。
- 2) 静的震度を二次元・三次元モデルに加えモデル化による解への影響を確認した。
- 3) 二次元モデルによりアンローダ-揚炭棧橋連成系での地震時応答解析を神戸での観測波等を用いて行った。
- 4) 一次元モデルにおいて、二次元モデルと同じ観測波を用いて地震応答解析を行い、応答値を確認した。

2. 解析条件

(1) 三次元モデル

揚炭棧橋の1ブロックは25m×25mをとり、法線方向に6列、法線直交方向に6列のφ900mmの鋼管杭が配置されている。1パースは9ブロックからなり、3番目のブロック内に納まるかたちで重量628.6tonの600t/hダブルリング式アンローダが1基設置してある。アンローダの形状はジブ最大半径を想定した。また、地盤の剛性は地盤ばねで表現した。なお、アンローダは棧橋上に引かれたレール上に設置されているため不連続であるが、アンローダ-揚炭棧橋間は剛結としてモデル化している。また、ブロック間はキーブロックによる接合により完全には剛結していないが、ブロック間は剛結として扱っている。

水平震度(K_h)は、兵庫県南部地震の際、ポートアイランドで観測された最大加速度679Galの観測波(以降ポ-トアイランド波)を工学基盤に入力し、一次元等価線形解析により地表面での最大加速度を求めた後、式(1)の換算式を用いて算出した。入力した地震動を図-1入力地震動(ポ-トアイランド波)に示す。また、ポ-トアイランド波のパワースペクトル図を図-2に示す。なお、三次元FEMモデル図を図-3示す。

$$K_h = \frac{1}{3} \left(\frac{\alpha}{g} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

ここに、 K_h ：水平震度、 α ：地盤加速度(Gal)、 g ：重力加速度(Gal)

一次元等価線形解析の結果、地表面での最大加速度(α)は803Galであった。これより、水平震度を0.31とした。

(2) 二次元モデル

二次元FEMモデルは、通常、単位厚での部材特性を用いるが、アンローダが三次元的構造であることより、三次元モデルを栈橋法線方向に重量を変えないように、二次元平面に投影した。このモデル化に合わせて栈橋、地盤も栈橋法線方向1ブロックの奥行きを考慮した。具体的には、鋼管杭は、一列(6本)分の剛性を1本の鋼管杭に与え、地盤は1ブロックの奥行き(25m)の部材特性を用いた。鋼管杭は非線形履歴復元力特性を有するが、線形材料として扱った。アンローダも線形材料としている。アンローダ-栈橋間は三次元モデル同様剛結とした。図-4に二次元解析モデルの概要図を示す。また、図-5に二次元FEMモデル図を示す。

地震応答解析はモーダル法を用いた。地盤材料は等価線形とした。入力地震動は、前記ポ-トアイランド波に加え、ポ-トアイランド波の最大加速度を振幅を変えずに、300Galに正規化した地震波(以降ポ-トアイランド(300波)と大船渡で観測された最大加速度137Galの地震動(以降大船渡)の3波を工学基盤で入力し、解析モデル底部まで引き戻した波形を用いた。

震度法は三次元解析と同じ水平震度($K_h=0.31$)を用いた。

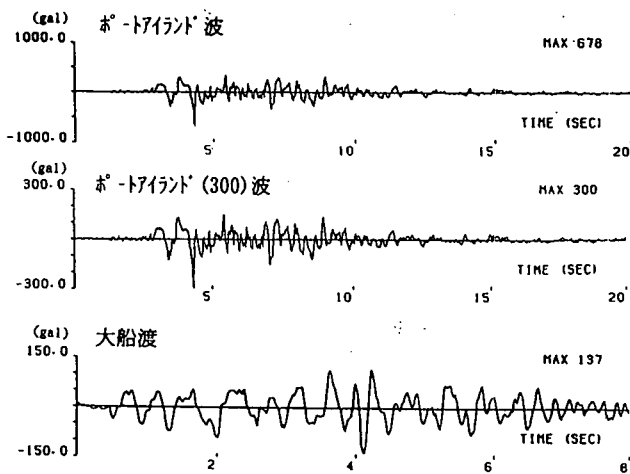


図-1 入力地震動

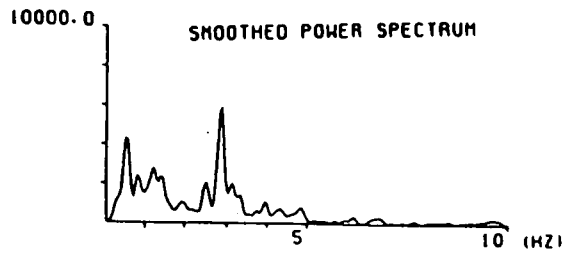


図-2 ポ-トアイランド波のパワースペクトル

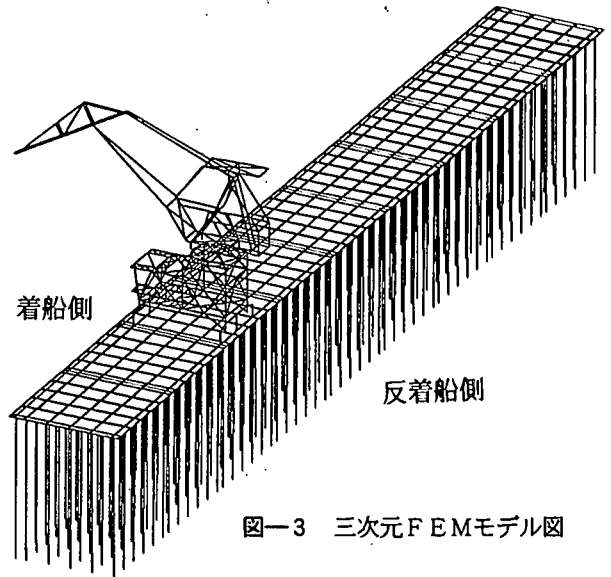


図-3 三次元FEMモデル図

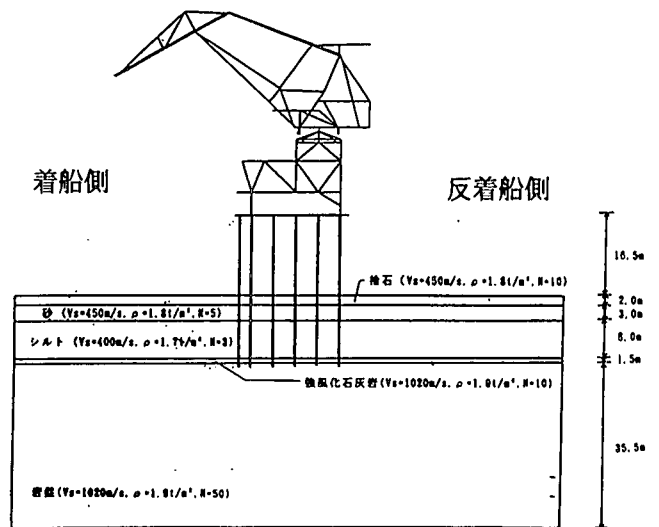


図-4 二次元モデル概要図

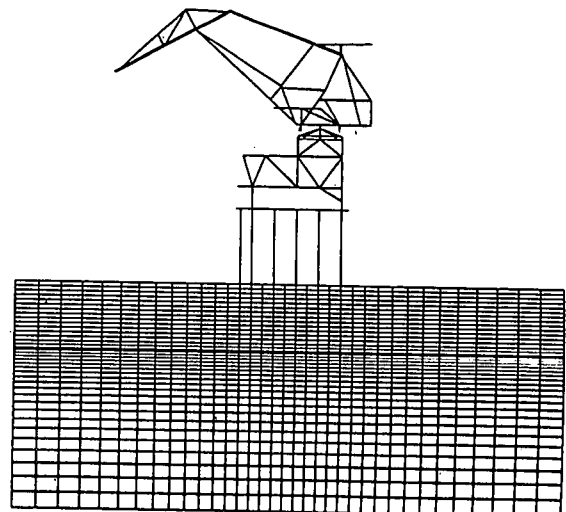


図-5 二次元モデル図

(3) 一次元モデル

一次元モデルは集中質量法により1自由度2質点系として地震時応答を計算した。アンローダは総重量を重力加速度で除して質量とし、剛性は固有振動数と質量より算出し、線形とした。揚炭棧橋は1ブロックでの質量を用いた。剛性は鋼管杭36本分とし、降伏荷重、降伏変位は港研方式による杭の横抵抗の計算式²⁾より算出した。非線形履歴復元力特性を考慮するため式(2)に示す関係式を用いた。

$$\frac{Y}{Y_c} = \frac{F(Y)}{F_Y} + \alpha \left[\frac{F(Y)}{F_Y} \right]^r \quad (2)$$

$$\frac{Y \pm Y_0}{2Y_c} = \frac{F(Y) \pm F_0}{2F_Y} + \alpha \left[\frac{F(Y) \pm F_0}{2F_Y} \right]^r$$

ここに、 F_Y ：降伏荷重、 Y_Y ：降伏変位、
 Y_c ：完全弾塑性系の降伏変位、 F_0 ：折返し点の荷重の絶対値、 Y_0 ：折返し点の変位の絶対値、
 α ：正の定数、 r ：3より大きい奇数の定数

なお、定数 α と r は、直杭棧橋では一般的に $\alpha=0.3$ 、 $r=3$ となることが確認されている³⁾。入力地震動は、ポトアイランド波、ポトアイランド(300)波、大船渡を工学基盤に入力し、一次元等価線形解析で求めた地表面での応答波形を用いた。

また、二次元モデルとの比較のため鋼管杭を線形材料とした場合の地震時応答解析も行った。

3. 解析結果

(1) 固有値解析

三次元モデルにおいて、アンローダだけのモデル、揚炭棧橋だけのモデル、アンローダ-揚炭棧橋連成でのモデルの固有値解析を行った。棧橋法線直交方向の固有振動数を表-1に記す。アンローダと揚炭棧橋の固有振動数はともに、約1.1Hzと同じ振動特性を有している。

(2) 震度法

三次元モデル、二次元モデルにおいて、式(1)で換算したポトアイランド波での静的震度($K_h=0.31$)を加えた場合の杭頭での変位量を表-2に示す。三次元モデルで7.28cm、二次元モデルで9.25cmであり、二次元モデルは三次元モデルの約1.27倍の杭頭変位量を示した。また、静的震度の作用方向(着船側と反着船側)についても検討したが、今回用いたモデルでは作用方向による杭頭変位の違いは見られなかった。

表-1 法線直交方向の固有振動数

| | 固有振動数(Hz) |
|--------------|-----------|
| アンローダ | 1.094 |
| 揚炭棧橋 | 1.090 |
| アンローダ-揚炭棧橋連成 | 1.033 |

表-2 静的震度作用時の杭頭変位量

| | 杭頭変位量(cm) |
|-----------|-----------|
| 二次元FEMモデル | 9.25 |
| 三次元FEMモデル | 7.28 |

表-3 各入力地震動における最大杭頭変位量

| | ポトアイランド波 (cm) | ポトアイランド(300)波 (cm) | 大船渡 (cm) |
|----------------|------------------|-----------------------|-------------|
| 二次元解析 | 13.3 | 5.82 | 2.26 |
| 一次元解析 (線形) | 17.0 | 7.0 | 2.1 |
| 一次元解析 (非線形) | 19.0 | 8.0 | 2.2 |

(3) 地震応答解析

二次元モデル、一次元モデルで鋼管杭を線形とした場合、一次元モデルで鋼管杭を非線形とした場合での杭頭における応答変位時刻歴図を図-6~図-8に示す。また、各入力地震動による最大応答変位を表-3に示す。

二次元モデルでの最大応答変位は、二次元モデルに静的震度を加えた場合の1.43倍であった。

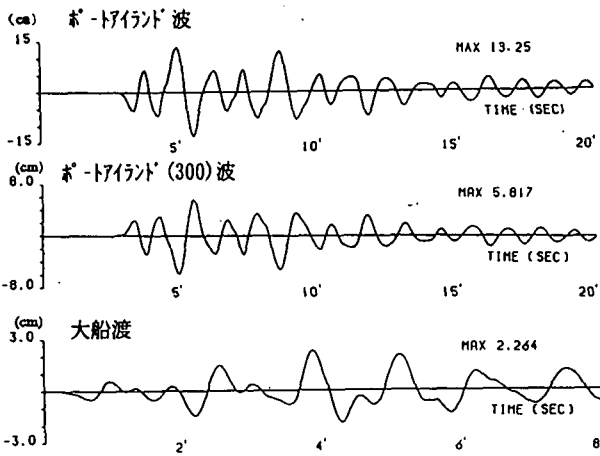
一次元モデル(線形)での最大応答変位は、二次元モデルの最大応答変位を基準にすると、ポトアイランド波で1.28倍、ポトアイランド(300)波で1.20倍、大船渡で0.93倍であった。

一次元モデル(非線形)での最大応答変位は、一次元モデル(線形)の最大応答変位を基準にすると、ポトアイランド波で1.12倍、ポトアイランド(300)で1.14倍、大船渡で1.05倍であった。

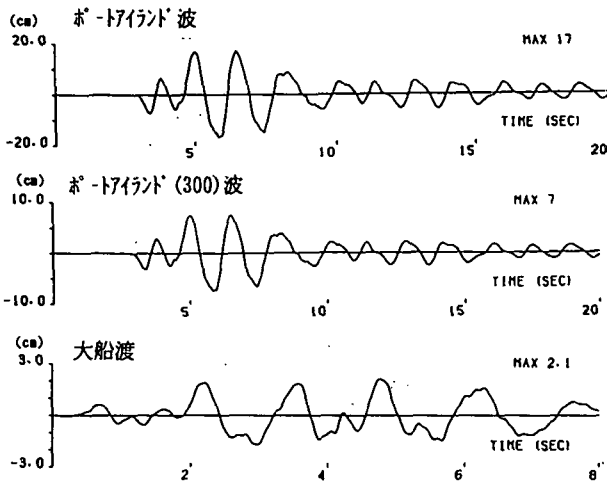
4. 結論

本報告で対象としたアンローダ、揚炭棧橋において、以下の点を確認した。

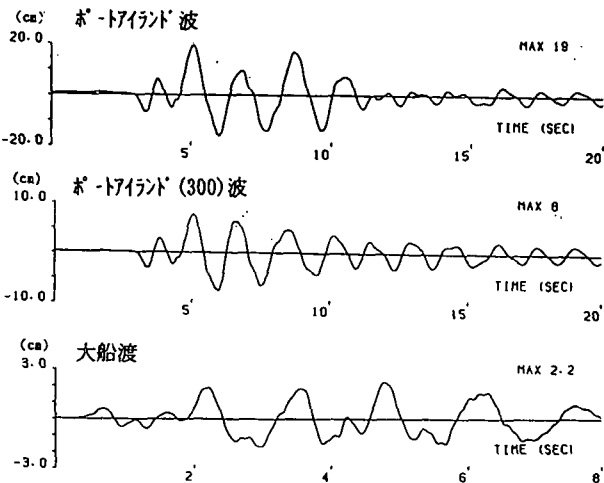
- 1) 固有値解析の結果、アンローダ、揚炭棧橋ともに約1秒の固有周期であり、相互作用が懸念される。
- 2) 三次元モデルと二次元モデルに静的震度を加えた場合、杭頭変位で二次元モデルが三次元モデルの1.27倍の変位量を示した。これは、次元の違いによる影響もあると思われるが、三次元モデルは、1パス



図一六 杭頭での変位時刻歴図 (二次元モデル)



図一七 杭頭での変位時刻歴図 (一次元モデル：線形)



図一八 杭頭での変位時刻歴図 (一次元モデル：非線形)

を、二次元モデルは1ブロックをモデル化しており、主に隣接ブロックの有無による影響と思われる。

- 3) 二次元モデルにおいて、地震応答解析の杭頭変位は、静的震度を加えた場合の1.43倍であった。地震応答解析の重要性を再確認した。
- 4) 二次元モデルと一次元(線形)モデルの地震応答解析での杭頭変位は、入力地震動の最大加速度の比較的小さい大船渡では、ほぼ同じ結果を示した。また、ポトアイランド波で1.28倍一次元モデルが大きい結果を示した。この傾向は、次元の違い、アンローダの挙動の影響等考えられる。
- 5) 一次元モデルの鋼管杭を線形、非線形とした地震応答解析では、入力地震動の最大加速度の比較的小さい大船渡ではほぼ同じ杭頭変位を示した。また、ポトアイランド波で1.14倍非線形が大きい結果を示した。これは、大船渡では線形領域内に納まっているものと思われる。

5. あとがき

本報告で実施したような、栈橋上に荷役機械を考慮した解析は、希少だと思われる。このモデルにおいて一般的に行われている震度法、質点系での地震応答解析を行った。今後は、アンローダ-揚炭栈橋間の不連続性等を考慮した解析を行い、地震時の挙動を把握するとともに、実構造物での挙動も確認する所存である。

参考文献

- 1) 藤本 健幸:兵庫県南部地震による港湾施設の被害考察 (その2)被害状況-港湾荷役施設-港湾義技術資料, No. 813, 1995
- 2) 運輸省港湾局 監修:港湾の施設の技術上の基準・同解説, 日本港湾協会, 1989
- 3) 山本 隆一, 林 聡, 土田 肇, 山下 生比古, 小蔵 紘一郎:網直杭栈橋の耐震性に関する研究, 港湾技研報告, 第9巻1号, 1970
- 4) 稲富 隆昌, 高木 保志, 風間 基樹:網直杭式栈橋の地震観測と動的解析, 港湾技研資料, No. 615, p46, 1988
- 5) 稲富 隆昌, 林 聡, 山下 生比古:大形荷役機械を上載する栈橋の振動性状, 港湾技研報告, 第12巻2pp. 3p-p. 32, 1973