

強震動を受ける栈橋上アンローダの模型振動実験

宮崎拓也¹・風間基樹²・福島英晃³・片山勝³・太田誠二³

¹正会員 工修 元東北大学大学院工学研究科土木工学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉06)

²正会員 工博 東北大学助教授 大学院工学研究科土木工学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉06)

³正会員 電源開発(株) 建設部設計室 (〒104-8165 東京都中央区銀座6-15-1)

強震動を受ける港湾の荷役機械の地震時挙動は、基礎構造物との相互作用が大きく関係すると考えられる。特に、地震時に荷役機械が滑動や浮き上がる場合の挙動は、耐震設計上の重要な検討項目であるが、その特性はほとんどわかっていない。本研究は、栈橋上のアンローダの滑動や浮き上がりに関する模型振動実験結果を報告する。模型は、栈橋およびアンローダの固有周期が実物のそれと相似になるように作成し、1994年三陸はるか沖地震八戸港、1995年兵庫県南部地震神戸ポートアイランドの地表観測波の水平1成分を振幅・時間間隔を調整し入力した。実験から、アンローダに滑動やロッキングが生じたときの挙動や残留ひずみ量、脚部部材に発生したひずみ、それらに及ぼす栈橋との相互作用の影響を検討した。

Key Words: *unloader, steel piled pier, strong motion, seismic behavior, structure interaction, residual displacement, model shaking table test*

1. 研究の目的

1995年兵庫県南部地震では、港湾施設のコンテナクレーンが大きな被害を受けた¹⁾。被害の形態としては脱輪、走行装置の破損と脚部の開きが確認された。脚部の広がりと共に付随して発生する脚部の曲げ座屈は岸壁の変位が原因になっていると推定されている。脚の浮き上がりや着地を繰り返した痕跡のあるクレーンもあるが、着地の衝撃で脚の圧縮座屈は確認されなかった。Scott²⁾は、コンテナクレーンの脚の股さき被害は海側の車輪が載っているケーソンが変位したことによって生じたと指摘している。この時、コンテナクレーンのロッキングはケーソンによる強制的な変位を逃がすことが出来るため、被害を軽減したと推定している。

これらの被害を受けて、コンテナクレーンなどの荷役機械の地震時被害の予測は、耐震工学上の重要なテーマになっている。本研究は、揚炭栈橋上のアンローダが強震を受けた時の地震時挙動を模型振動実験から調べたものである。アンローダの被災形態としては、脚が脱輪して海に転落する場合や脚部の局部座屈などが考えられる。本研究では、アンローダが滑りや浮き上がりを生じた時の挙動に着目し、栈橋との相互作用が残留変位や脚部材の発生応力に及ぼす影響を検討した。

2. 模型振動実験

(1) 対象構造物および模型諸元

本実験で想定している実構造物は、火力発電所揚炭栈橋と陸揚げ用のアンローダである。移動用のレールに垂直な方向と、水平な方向があるが、被害が想定されるのはレールに垂直な方向である。栈橋の高さが24m、1つのブロックの質量は1641t、水平方向固有振動数は3.0Hzである。アンローダは高さが19m、質量は720t、水平方向固有振動数は1.7Hzである。

模型を作成するに当たって考慮した相似則は支配方程式を用いて導いた^{3),4)}。模型材料の応力-ひずみ関係を相似にするためには、非常に弱い薄い材料を用いて栈橋やアンローダの模型を作成する必要があるが、実際にそのような模型を作成することは出来なかった。また、振動実験を複数回行うという観点からも、部材が塑性域に入るような実験をすることは困難である。そのため、実験では杭の自由長を合わせるという観点から栈橋模型とアンローダ模型の縦寸法比を実物と合わせ、固有振動数の相似を合わせるように質量を決定した。このとき、栈橋とアンローダはそれぞれ1質点系とみなせるような構造とした。この取り扱い、実物の強制加振実験⁵⁾や3次元の数値計算⁶⁾から、判断したものである。なお、

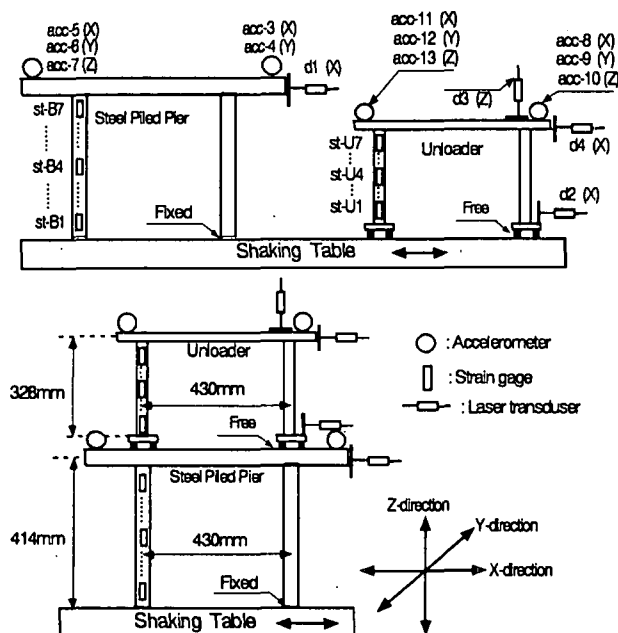


図-1 振動実験に用いた模型およびセンサーの配置

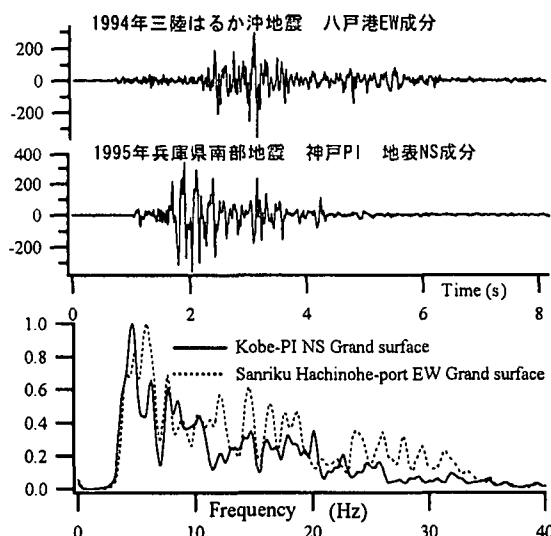


図-2 入力地震動の時刻歴と振動数特性 (模型スケール)

時間の相似比は1/4.5となった。したがって、入力地震動の時間スケールも1/4.5倍している。

(2) 実験条件

模型はアンローダ単独、栈橋単独、栈橋+アンローダの三種類であり、アンローダの脚は振動台もしくは栈橋上のモルタル版の上に載せただけのfreeな状態とした。アンローダの脚には鉄道模型用の車台を取付けた。図-1に模型およびセンサーの配置を示す。

振動実験に用いた入力地震動波形は、1995年兵庫県南部地震で観測されたポートアイランド波 (地表NS成分) と1994年三陸はるか沖地震で八戸港で観測された波 (地表EW成分) である。地震動の振幅レベルは、約2Gまでの7段階とした。図-2に入力した地震動の時刻歴とフーリエ振幅スペクトルを示す。

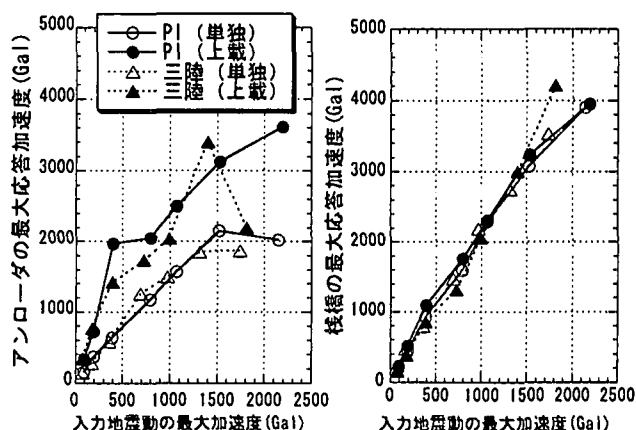


図-3 栈橋、アンローダの最大加速度応答

3. 振動実験の結果及び考察

(1) 栈橋およびアンローダの最大加速度応答

図-3は、アンローダおよび栈橋の最大加速度応答を示したものである。栈橋は振動台にボルトで固定されているため弾性的な挙動を示し、振動台に対して約2倍の増幅を示している。また、アンローダの有無によって、変化していないことから、重量比がアンローダ1:栈橋3.6程度の場合には、栈橋の最大加速度に及ぼすアンローダとの相互作用の影響は小さいと言える。一方、アンローダの最大加速度は、滑りやロッキングが生じる入力レベル (後出・図-6参照) あたりから増加割合が小さくなる。また、アンローダ単独の場合より、栈橋上に載った場合の方が応答が大きくなっており、栈橋の加速度応答の増幅の影響を受けることがわかる。

(2) 栈橋単独、アンローダ単独の場合の振動性状

図-4は、アンローダ単独の場合、栈橋単独の場合 (下部固定) の実験結果の一例を示したものである。図中の変位波形は非接触レーザー変位計の記録から求めているが、振動台との相対変位を示している。また、アンローダの並進成分 (Sway-X) と重心位置からの回転に伴う加速度成分 ($\ddot{h}\theta$) は、アンローダ上の左右両端の加速度記録から求めたものである。同図の右端の伝達関数から、アンローダ単独の固有振動数は7.0Hz付近、栈橋単独の固有振動数は13.0Hz付近、回転動 (着地時の衝撃) の固有振動数は37.5Hz付近にあることがわかる。また、上下の相対変位時刻歴から3回の小さな浮き上がりの後、1cm程度の浮き上がりがあり、そのとき水平方向にも滑ったことがわかる。このとき、上下方向の加速度計は、アンローダが着地する際の衝撃に伴う加速度を捕らえている。また、この着地の際にアンローダ脚部の軸ひずみが

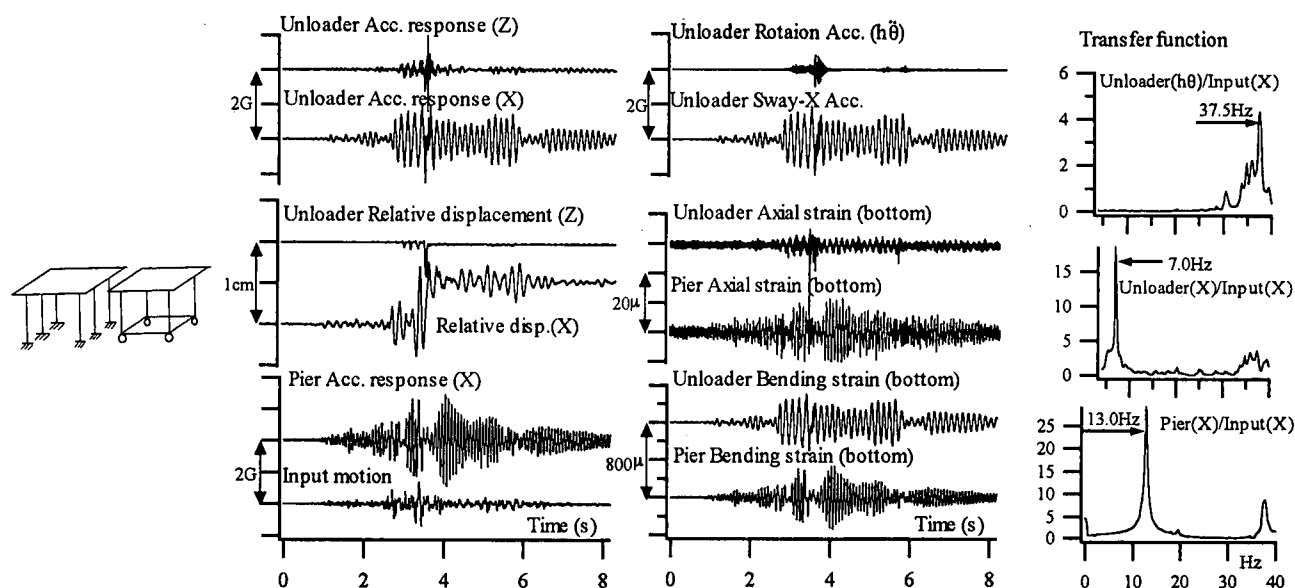


図-4 アンローダが浮き上がり・滑動するときの応答（アンローダ単独，栈橋単独，三陸波の場合）

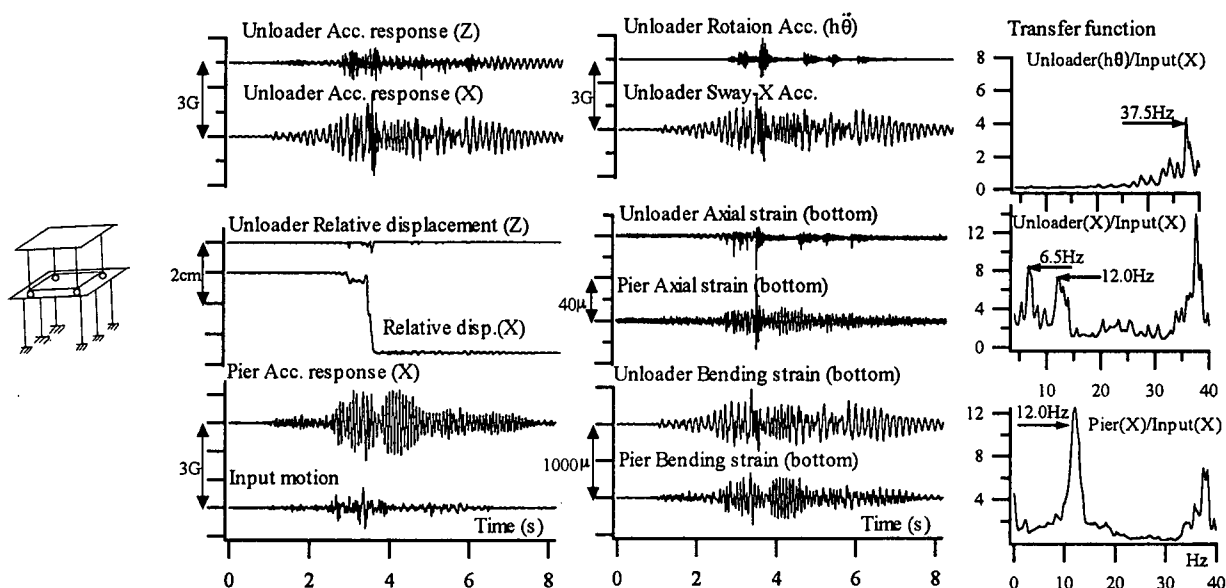


図-5 アンローダが浮き上がり・滑動するときの応答（アンローダが栈橋上に載っている場合，三陸波の場合）

大きくなっていることがわかる。さらに、栈橋脚部下端およびアンローダ脚部下端の曲げひずみ応答はそれぞれ栈橋およびアンローダの水平応答波形に相似な時刻歴になっていることから、下端の曲げひずみ応答は上部構造物の慣性力に支配されていることもわかる。

(3) 栈橋-アンローダ系の振動性状

図-5は、栈橋上にアンローダを載せた場合の応答波形の一例を示したものである。波形の並びは図-4と同じである。ただし、アンローダの相対変位は栈橋に対するものである。この場合、連成振動によってアンローダの1次固有振動数は7.0Hzから6.5Hzに変化し、12.0Hz付近に栈橋の固有振動数の影響が現れる。また、栈橋の固有振動数も、13.0Hzから12.0Hz

付近に移動している。しかし、回転動（着地時の衝撃）の固有振動数は同じである。上下方向の相対変位から、8回程度の浮き上がりがあったようであり、回転運動の加速度記録にも衝撃的な加速度が計測されている。また、水平方向の滑りは、そのうちの最も大きな衝撃を計測したあたりで発生しており、アンローダ単独の場合とほぼ同じ時刻で発生している。すなわち、入力地震動のうちアンローダに滑りを生じさせた箇所は3.5秒付近の同じ場所であり、栈橋の有無には無関係である。しかしながら栈橋によって、残留滑り量は2倍強に大きくなっており、しかも生じる方向は逆向きである。また、栈橋脚部下端およびアンローダ脚部下端の曲げひずみ応答がそれぞれ栈橋およびアンローダの水平応答波形に相似な時刻歴になっていることは同じである。

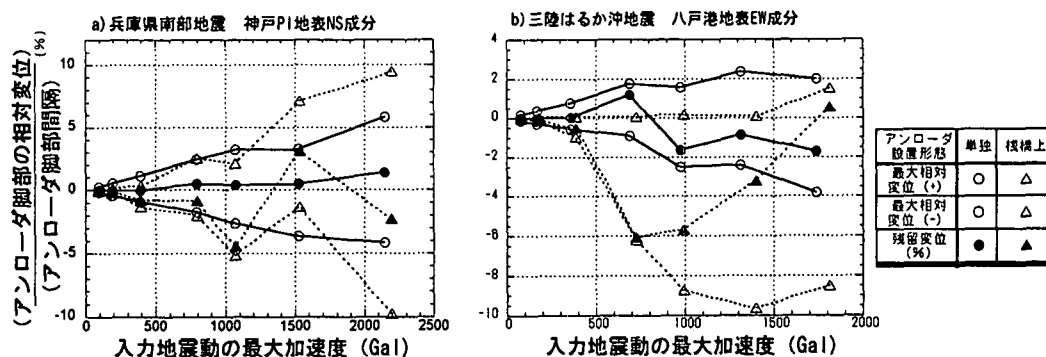


図 - 6 アンローダの水平相対変位変位量および残留変位量と入力レベルの関係

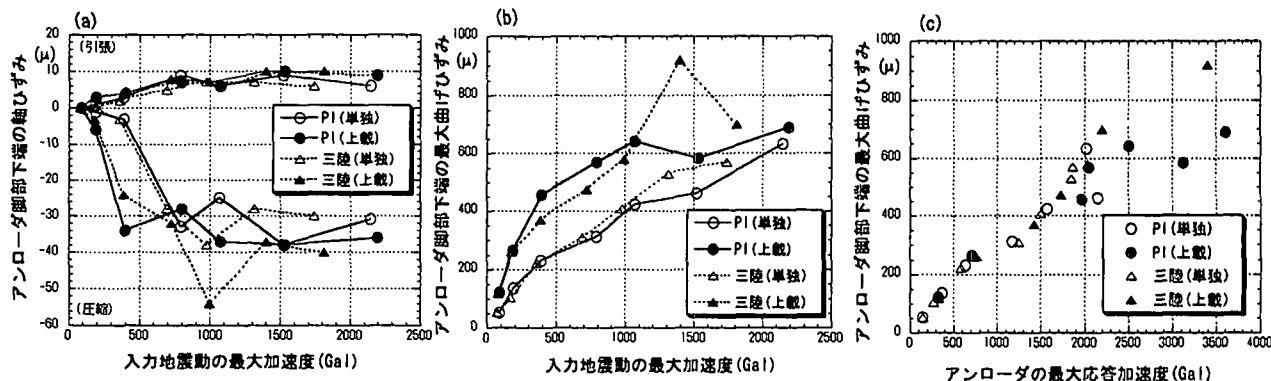


図 - 7 アンローダおよび橋脚部の曲げひずみと軸ひずみ応答

(4) アンローダの最大変位応答、および残留変位

図-6は、アンローダ脚部の最大相対変位応答および残留変位量と入力レベルの関係を示したものである。最大相対変位量とは、振動中に経験した最大の相対変位であり、残留変位量とは加振終了時に停止した位置を意味している。図では滑りの方向を区別すると同時に、変位量はアンローダの脚部の振動方向間隔で正規化して示した。最大水平変位応答は、入力のレベルが上がるとそれに応じて増加する傾向がある。また、その最大値は約10%に達している。

一方、アンローダの残留変位量は、入力レベルの増加とともに単調に大きくならない不規則な変化を示している。これは、振動後の停止位置が地震波の最大値指標だけで決まらないことを意味している。

(5) アンローダ脚部の杭のひずみ応答

図-7は、アンローダ脚部下端の最大ひずみ応答を示したものである。軸ひずみ応答は、アンローダが浮き上がるときに発生している最大値に対応していることから、引張側はアンローダの自重による応力が開放された場合のひずみ（約10 μ ）を意味し、圧縮側は着地時の衝撃的なひずみ応答の最大値（約40 μ ）を示している。すなわち、着地時には自重によって生じる応力の約4倍の応力が作用したことになる。一方、曲げひずみ応答は、先にも説明したように、入力加速度ではなくアンローダの慣性力に比例していることがわかる。

4. 結論

アンローダの滑りやロッキングに着目し、橋脚との連成効果を考慮した模型振動実験を行った。その結果、地震時のアンローダの滑り変形量を求めるためには、橋脚との連成を考慮する必要があること、脚部材の曲げ応力の算定には上部工の加速度応答の精度のよい推定が重要であること、脚部軸応力は浮き上がり後の着地時の衝撃によって自重の4倍程度の応力が作用する可能性があることなどがわかった。

参考文献

- 1) 港湾荷役機械設備耐震設計調査委員会：兵庫県南部地震における神戸港コンテナクレーンの被害、港湾荷役、第40巻、第2号、pp. 203-208, 1995.
- 2) Ronald F.Scott: Crane response in 1995 Hyogoken nanbu earthquake, Soils and Foundations, Vol.37, No.2, pp81-87, 1997.
- 3) 風間基樹, 稲富隆昌, 大塚幸治：遠心力場における模型振動実験装置の開発, 港湾技研資料 No. 607, 1988.
- 4) Iai, S: Similitude for shaking table test on soil-structure-fluid model in 1g gravitational field, Soils and Foundations, Vol.29, pp.105-118, 1989.
- 5) 稲富隆昌, 林聡, 山下生比古：大型荷役機械を上載する橋脚の振動性状, 港湾技研報告, 第12巻, No. 2, 1973.
- 6) 野口俊介, 太田誠二, 高橋勝, 風間基樹：荷役機械との相互作用を考慮した直杭橋脚の地震時挙動, 第24回地震工学研究発表回, pp. 893-896, 1997.