

(55) 兵庫県南部地震によるコンテナ岸壁とガントリークレーンの地震応答解析

運輸省 港湾技術研究所 正員 田中 祐人

正員 稲富 隆昌

正員 飯塚 栄寿

1. まえがき

兵庫県南部地震により、淡路島や神戸市近辺の各港湾施設は大きな被害を受けた。埋立地盤である神戸市のポートアイランドや六甲アイランドでは、コンテナ岸壁やガントリークレーンの被害が著しかった。その原因は、直下型地震による水平・鉛直方向の強震動や液状化の影響、さらに海・陸側のクレーンレール基礎の違いなど、種々の要因が考えられる。

本文では、これらの原因究明の序として、コンテナ岸壁と一般的なガントリークレーンの組合せを例に、岸壁のみのモデルと岸壁・クレーンを一体化したモデルで地震応答解析を実施し、岸壁やクレーンの動的挙動ならびに両者における連成の影響を検討する。

2. 解析方法

解析の対象には、神戸市開発局が設置している地震計に最も近いポートアイランド西側のコンテナ岸壁(ケーン式)を選定した。その岸壁と地震計の平面的な位置関係を図1に、岸壁の断面を図2に示す。神戸港のコンテナ岸壁は大半がケーン式であり、海側レールは上部工に設置されている。陸側レールは杭基礎の場合と地盤改良土上の基礎の場合があるが、ここでは一般的な例として神戸港で最も設置数の多い地盤改良土上の基礎とした。

兵庫県南部地震の本震で観測された岸壁直角方向(EW)の地震波を、図3の破線に示す。図4は深さ方向の4カ所(KP+4, -12, -28, -79m)に設置した地震計の深度位置、ならびに岸壁とクレーンを一体化したモデル図を示す。クレーンをモデル化する際には、2次元の梁・質点系モデルが面内における3次元モデルと同等の動的特性を有するように、クレーンの側面図¹⁾を参考にしながら一般的なクレーンのデータを用いた。また、クレーンと岸壁との接続条件の例として、鉛直・水平成分には走行装置やレール下のPC軌道桁の剛性を見込んだ並進バネ $K_v=K_h=1.0 \times 10^6$ (tf/m/m) を、回転成分には回転を拘束しない程度の回転バネ $K_\theta=1.0$ (tf・m/rad/m) を設定した。

解析には、地盤と構造物の相互作用を考慮できる2次元FEM連成振動解析プログラム(FLUSH)を用いた。この解析では、半無限地盤を反映するため左右端に伝達境界を設け、また下端を剛基盤とした。解析に使用した地震波はKP-79EWの30秒間(図3参照)であり、解析の最高周波数を10Hz、収束誤差を5%とした。初期せん断剛性 G_0 、ポアソン比 ν などの地盤物性はPS検層のデータを、拘束圧によるせん断ひずみ依存性 $G/G_0, h \sim \gamma$ に関

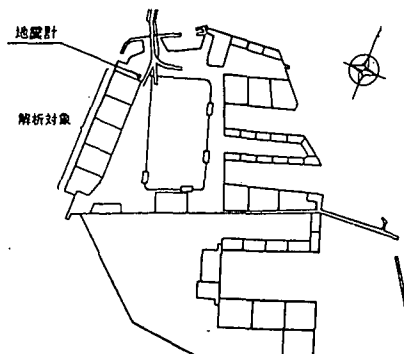


図1 コンテナ岸壁と地震計の位置

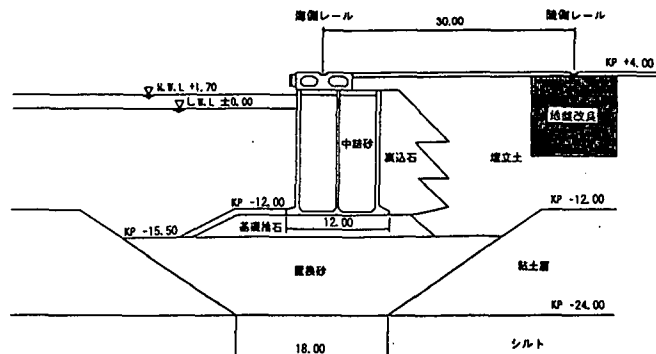


図2 コンテナ岸壁の断面

しては埋立地の液状化ハンドブック²⁾を参照した。陸側レール下の地盤改良土は、N値換算で30程度のせん断剛性を持つものと仮定した。

3. 解析結果と考察

(1) コンテナ岸壁の応答

埋立地盤の水平加速度に対する解析波形(右側伝達境界:実線)と観測波形(破線)の比較を図3に示す。各深度とも、地震計のノイズによる影響もあり最大加速度は一致していない。しかし、解析波形は初期微動部分を除き観測波形の位相をよく表している。また、深度が浅くなるに従って加速度波形が長周期化しており、地盤の軟化が進行していることがわかる。

クレーンの陸側レール(実線)と海側レール(破線)における水平加速度の解析波形を図5に示す。この図からも明らかなように、陸・海側レールとも同位相で振動しており、最大値($t=4.78\sim 4.8$ sec)ではケーソンよりも埋立土のせん断剛性に近い陸側の方が、若干大きくなっている。また、海側、陸側レールとも、埋立土に比べ剛性の高いケーソンや地盤改良土上の基礎に支持されているため、地盤表面(KP+4EW)に比べ加速度が増幅している。図6には、基盤入力加速度に対するこの解析で得られた海側レールの応答加速度の伝達関数を示す。兵庫県南部地震によるこの岸壁では、 $f=0.73\text{Hz}(T=1.4\text{sec})$ に加速度の卓越応答周波数があることがわかる。

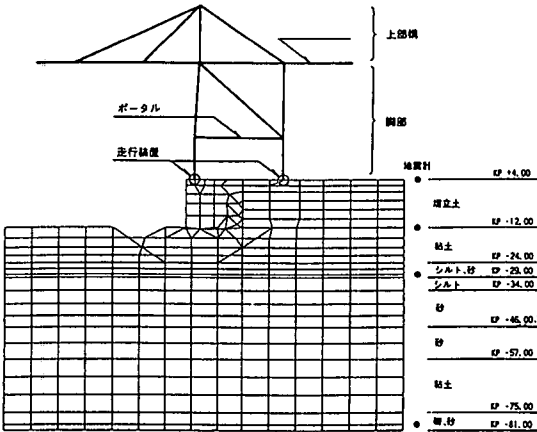


図4 岸壁とクレーンを一体化したモデル

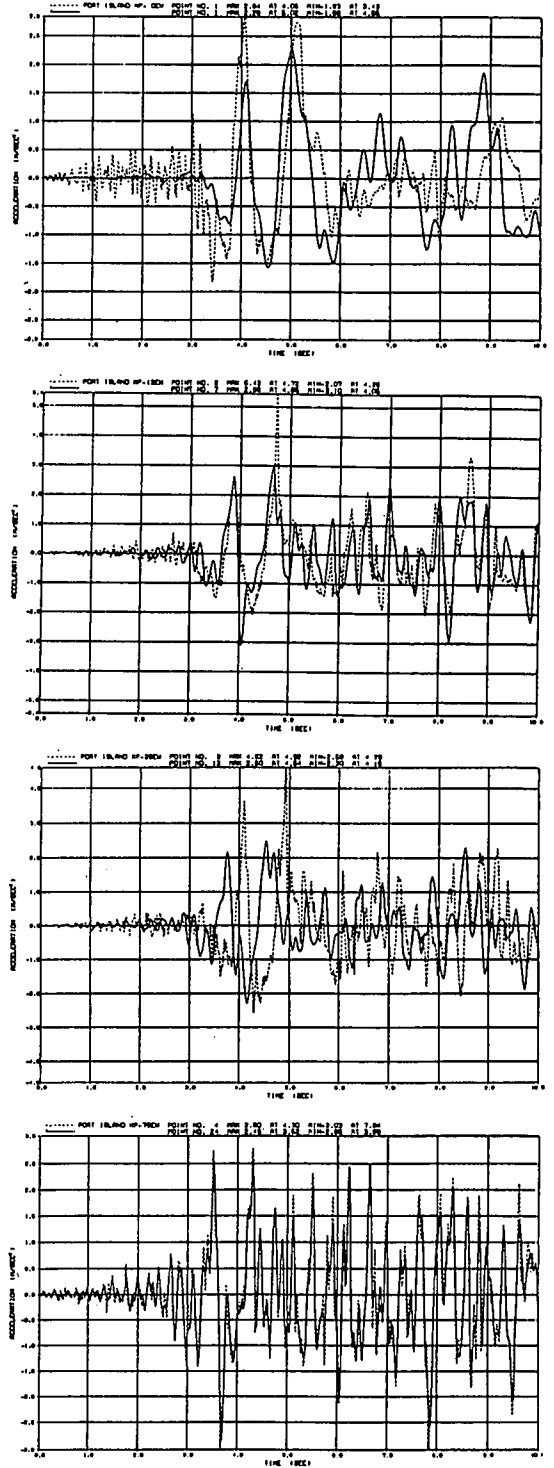


図3 観測波形(破線)と解析波形(実線)
上からKP+4EW,-12EW,-28EW,-79EW

海側レールの応答変位が最大になる時刻($t=4.95\text{sec}$)の変形を図7に示す。最大の応答は海側へのはらみだしであり、その変形量は海側レール位置で14cm程度、陸側レール位置で11cm程度であった。ケーソンの慣性力によりその下のマウンドが圧縮変形し、ケーソンが海側に少しロッキングするため、海側レールの方が大きくなったと考えられる。また、ケーソンの海側変位により埋立地盤が引張られ、埋立地盤が大きくせん断変形している。

(2) ガントリークレーンの応答

岸壁とクレーンを一体化した図4に示すモデルで、地震応答解析を行った。解析方法でも述べたように、岸壁とクレーンを回転拘束しない並進バネで接続した。また、せん断ひずみによる地盤の軟化現象を等価線形法で評価するが、クレーンのせん断剛性は線形を保つとして計算している。

クレーン脚部の応答加速度が最大になる時刻($t=11.00\text{sec}$)の加速度ベクトルを図8に示す。この図より、ポータルより上部の部材にはほぼ同じ加速度が水平に作用していることがわかる。これはポータルより上側の脚部剛性が高いためと考えられる。脚部の時刻歴応答加速度波形によると、脚部は $t=6\text{sec}$ 近辺からクレーンの固有周期で加速度が増幅し始め、 $t=11.00\text{sec}$ で最大に達し、レールから伝達される加速度の減少とともに減衰している。

図9は、クレーン脚部の応答変位が最大になる時刻($t=11.90\text{sec}$)の変位を示す。この図より、この時刻では上部構は水平に並進するのみであり、脚部が最も変形するクレーンの1次モードで振動していることがわかる。

図8, 9の結果は、①クレーンの浮き上がり、②走行装置のがたつきや車輪とレール間の滑り、③ケーソンの滑りや地盤の破壊・液状化を考慮しておらず、神戸港におけるクレーンの挙動を再現したものではない。神戸港の被災状況から判断すると、それら

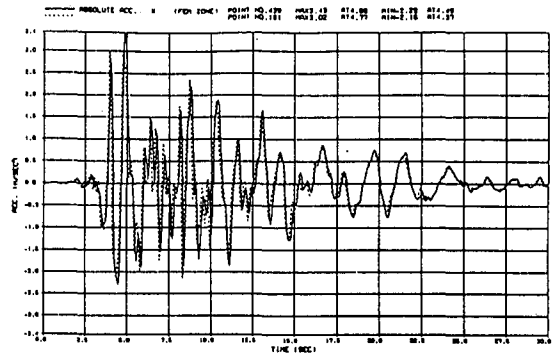


図5 陸側(実線)と海側(破線)レールの解析加速度波形

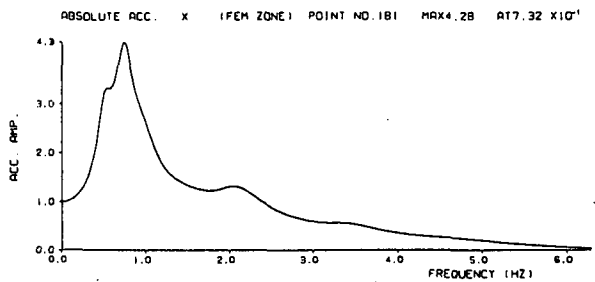


図6 基盤に対する海側レールの応答加速度の伝達関数

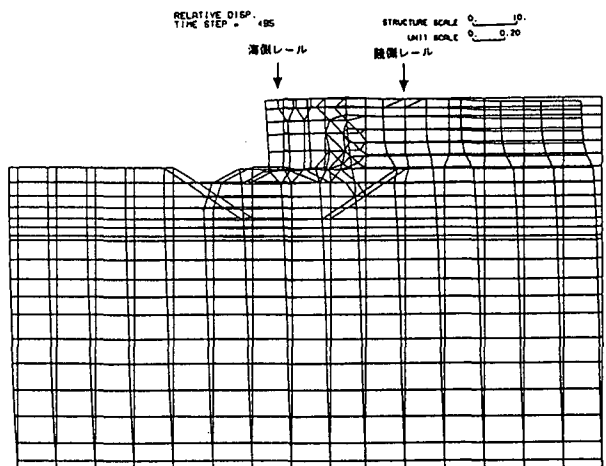


図7 海側レールの応答変位が最大になる時刻の変形図(単位:m)

の発生によりレール位置での加速度が図5よりも元々小さかったのではないかと推察される。今後整備が進む耐震強化岸壁は地盤の破壊を最小限にしようとするものであり、クレーンの浮き上がり、走行装置のたつきおよび車輪とレール間の滑りなどの接続条件を吟味の上、その上に設置するクレーンの動的特性を検討していかなければならない。

(3) 岸壁とクレーンによる連成の影響

岸壁とクレーンを連成させた解析結果より、陸側レールと海側レールの位置における応答加速度波形は、岸壁のみを解析した結果(図5参照)とほぼ一致することがわかった。これは、クレーンの重量や剛性が岸壁に比べてかなり小さいためと思われる。このことから、今回解析に用いたクレーンがこの岸壁に及ぼす連成の影響はほとんど無いと考えられる。

4. あとがき

本解析は等価線形法で地盤の軟化を計算しており、地盤加速度の解析波形は観測波形と比較的よく一致した。ここで得た結論は、地盤のひずみが小さい範囲において、ある程度被災過程の初期をシミュレートしているのではないと思う。しかし、本解析による岸壁の変形量は実際に比べ著しく小さく、神戸港で発生した典型的なコンテナ岸壁やクレーンの被災状況を再現してはいない。この理由は、構造物に滑りや地盤中に破壊、液状化などが生じたためと考えられる。これらの要因を加味した解析手法が、今後の大きな課題である。

最後に、貴重な地震・地盤データを提供していただいた神戸市開発局の方々に感謝の意を表します。

参考文献 1) 港湾荷役機械設備耐震設計調査研究委員会: 兵庫県南部地震による神戸・港コンテナクレーンの被害, 港湾荷役, Vol. 40, No. 2, pp. 203~208, 1995 等、2) 沿岸開発技術研究センター: 埋立地の液状化対策ハンドブック, pp. 50~59, 1993

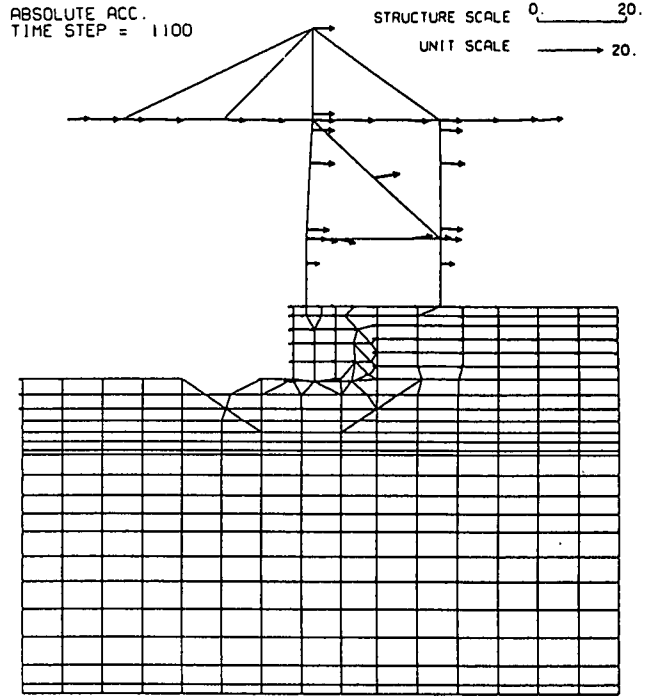


図8 クレーン脚部の応答加速度が最大になる時刻の加速度ベクトル(単位:m/sec²)

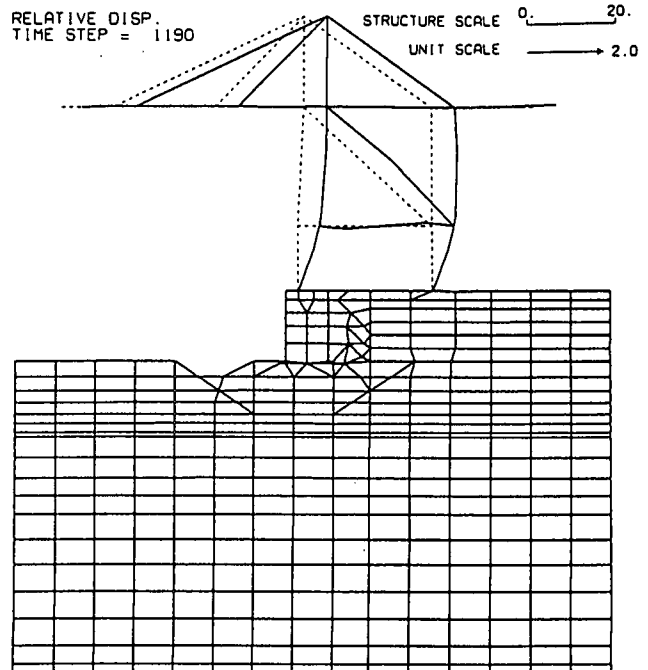


図9 クレーン脚部の応答変位が最大になる時刻の変形図(単位:m)