

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特性に関する基礎的研究

THE SEISMIC RESPONSE OF A CONTAINER QUAY WALL AND A GANTRY CRANE DUE TO THE GREAT HANSHIN EARTHQUAKE

田中 祐人*、稲富 隆昌**、飯塚 栄寿***

Sachito TANAKA, Takamasa INATOMI and Eiji IIDUKA

* 工修 運輸省港湾技術研究所構造部 主任研究官 (〒239 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

** 工博 同 上 部長 (同 上)

*** 同 上 研究官 (同 上)

Gantry cranes on quay walls in the port of Kobe were so much damaged due to the Great Hanshin Earthquake that the port could not function as the center of container terminals in Japan. In order to investigate the dynamic behavior of them, this paper deals with the seismic response analysis with using the acceleration wave of the Great Hanshin Earthquake recorded in the Port Island of Kobe. As results of the analysis, the followings are concluded: 1)The response acceleration time histories of the ground by this analysis fairly agree with the observed acceleration waves. 2)The crane starts the vibration of the 1st mode, and then moves to the rocking vibration. 3)Moreover, the interaction between a quay wall and a crane affects the acceleration response of the crane at the natural period of the crane.

Key Words: seismic response analysis, rocking vibration, interaction.

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が著しい被害を被った。その原因は、直下型地震による水平・上下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。

ここでは、コンテナ岸壁とガントリークレーンの地震応答特性を明らかにする一歩として、コンテナ岸壁と一般的なガントリークレーンの組み合わせを例に、岸壁の

みと岸壁・クレーンを一体化したモデルで地震応答解析を実施し、解析方法の適用性を検証するとともに、岸壁の動的応答やクレーンのロッキング振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

2.1 解析対象

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（ケーソン式）を選定した。その岸壁と地震計の平面的な位置

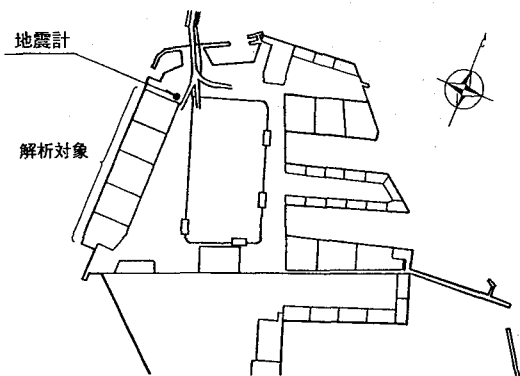


図-1 コンテナ岸壁と地震計の位置

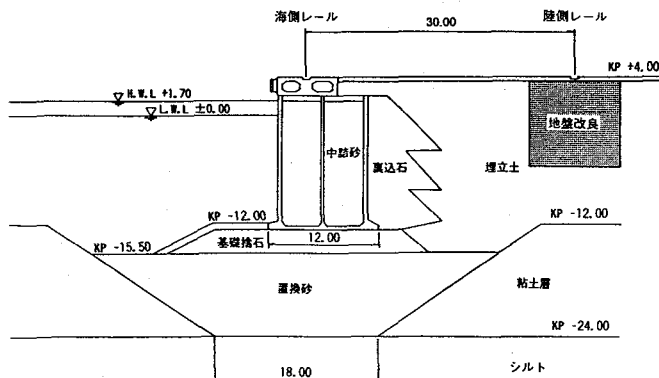


図-2 コンテナ岸壁の断面

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ソン式であり、クレーンの海側レールはその上の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。

2.2 地盤モデルと入射波

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FLUSHは地盤の非線形性を等価線形法で評価しているが、その適用範囲は要素の最大有効せん断ひずみが $\gamma_{ef}=0.5\%$ 程度であると言われている。図-3は、深さ方向の4カ所（KP+04, -12, -28, -79m）に設置した地震計の深度位置（図中の黒丸）、ならびに岸壁とクレーンを一体化した際のモデル図を示す。この解析では、半無限地盤を反映するためFEM領域の左右端に伝達境界を設け、またその下端を剛基盤とした。

解析に使用した地震波は、観測された東西方向の地震

波（KP-79EW）を反時計回りに22°回転した¹⁾補正地震波（30秒間、図-4の最下段の図参照）である。また、解析の最高周波数を10Hz、収束誤差を5%とした。

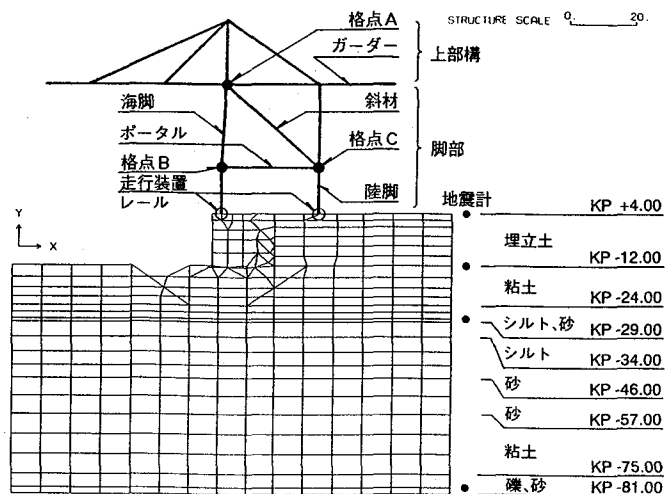


図-3 岸壁とクレーンを一体化したモデル

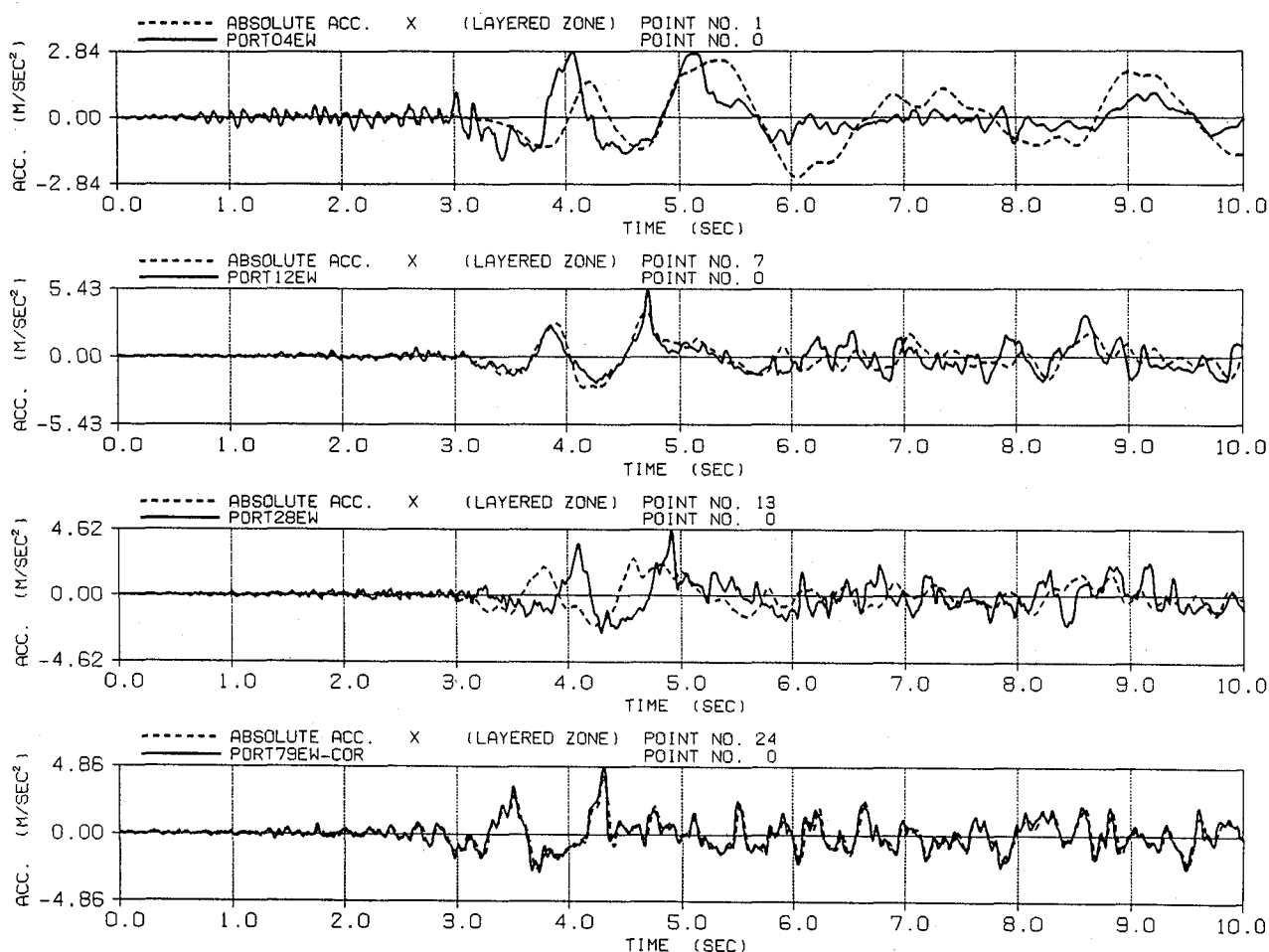


図-4 観測波形（実線）と解析波形（点線）の比較、上段からKP+04EW, -12EW, -28EW, -79EW

表-1 地盤の初期せん断剛性

土質名	KP	G0(tf/m ³)
埋立土	4	4,877
埋立土	0	8,976
粘土	-12	5,290
シルト	-24	9,800
砂	-26	12,250
シルト	-29	15,188
砂	-34	18,958
砂	-46	25,000
粘土	-57	14,989
礫、砂	-75	20,898

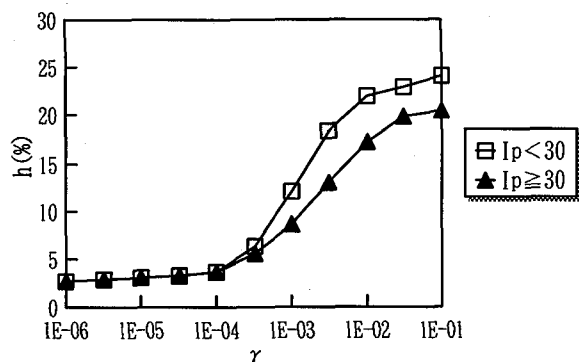
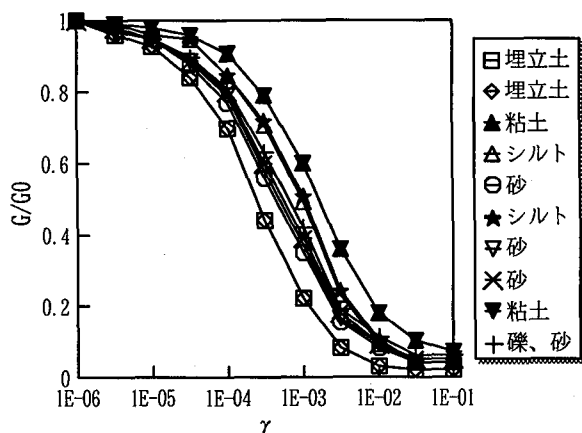


図-5 せん断剛性比と減衰比

表-1に示す地盤の初期せん断剛性G0、ポアソン比 ν (=0.48)などの地盤物性はPS検層のデータを用いた。図-5の拘束圧によるせん断ひずみ依存性、すなわち、せん断剛性比 $G/G_0 \sim \gamma$ および減衰比 $h \sim \gamma$ に関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。

2.3 クレーンモデル

クレーンをモデル化する際には、クレーンがロッキング振動を開始する時刻までのクレーンの応答(加速度や発生ひずみなど)を求めることを目指した。そのため、2次元の弾性梁・質点・バネ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³⁾を参考にしながら一般的なクレーンのデータを作成した。

クレーンと岸壁との接続条件として、鉛直・水平方向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。この条件では、クレーンと岸壁がヒンジで接続されていることになり、大きな加速度がクレーンに作用しても、陸側または海側のクレーン脚が浮き上がる、いわゆるロッキング振動を再現することはできない。しかし、岸壁に接続されるクレーン脚基部の引張軸力時刻歴とクレーン自重による圧縮反力を検討することによって、クレーンがロッキングを開始する時刻やその時刻までのクレーンの応答を知ることができる。

3. コンテナ岸壁の応答

3.1 岸壁の加速度応答

解析で得られた地盤の応答水平加速度が、観測された地震加速度をどの程度再現しているかを検証するため、図-4に示す鉛直アレー観測地震波との比較を各深度ごとに行った。この図において、上段からKP+04EW, -12EW, -28EWの比較であり、解析30秒間の中から最初の10秒間のみを示す。埋立地盤(右側自由地盤)の解析波形を点線で、観測波形を実線で示す。各深度とも、振幅が一致していないところもあるが、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おり、観測波形を比較的よく再現していると考えられる。また、観測・解析波形とも深度が浅くなるに従って、加速度波形の高周波数成分が減少し且つ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。

3.2 岸壁の変位応答

海側レールの応答水平変位が最大になる時刻 $t=5.10$ se

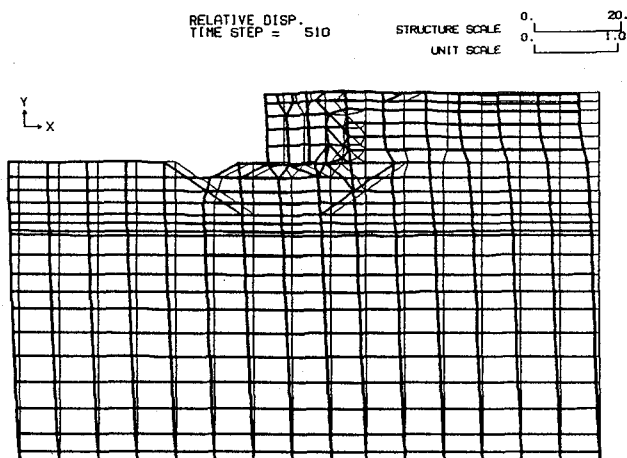


図-6 海側レールの応答変位が最大になる時刻の変形図(単位:m)

cの変形を図-6に示す。最大の応答は海側へのはらみだしであり、その水平変位量は海側レール位置で22cm程度、陸側レール位置で27cm程度であった。以前の解析では、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⁴⁾。これらの差は、入力波に補正地震波を用いることにより最大水平加速度が4割程大きくなったためである。この図からケーソン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していることがわかる。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。この解析では、地盤のせん断ひずみが右側粘土層直上の埋立土(KP-12付近)に集中しており、その最大有効せん断ひずみは $\gamma_{eff}=1\%$ 程度であった。

4. ガントリークレーンの応答

4.1 クレーンのロッキング振動

2.3節で述べたように、クレーンのロッキング開始時刻とその時刻までのクレーンの応答を検討するため、クレーン脚基部の軸力時刻歴とクレーン代表点の応答加速度時刻歴を図-7に示す。この図において、下段が軸力時刻歴、上段が図-3の格点Aの、中段が格点Bの応答加速度時刻歴であり、解析30秒間の中から最初の10秒間のみを示す。この軸力時刻歴では、圧縮が正、引張が負である。この図から、時刻 $t=5.0\text{sec}$ を過ぎると海側(実線)と陸側(点線)の波形が軸力 $N=0$ を軸に対称となり、その軸力波形の周期はクレーンの固有周期 $T=2.0\text{sec}$ にほぼ等し

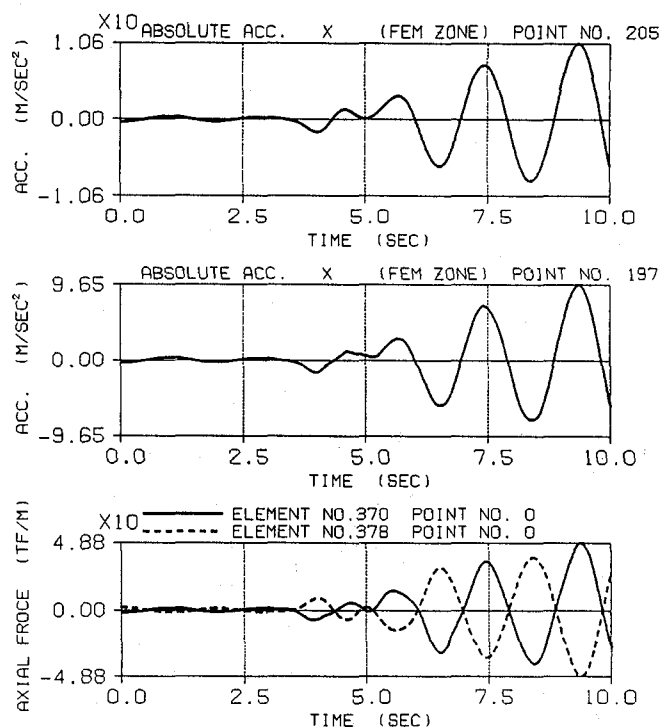


図-7 クレーン脚基部の軸力時刻歴とクレーン代表点の応答加速度時刻歴

いことがわかる。

次に、引張の作用軸力が死荷重による圧縮軸力と釣り合えば、つまりレール位置での反力が $R=0$ になればロッキングを開始する可能性があると考えられる。この解析で用いたクレーンの場合、単位幅当たりの死荷重による軸力は海側で $N_s=28.3\text{tf}$ 、陸側で $N_L=13.4\text{tf}$ である。これらの条件からロッキング開始時刻を図から読み取ると、陸側で $t_{L1}=5.4\text{sec}$ 、 $t_{L2}=7.0\text{sec}$ 、海側で $t_{S1}=6.4\text{sec}$ である。時刻 t_{L1} 直後に脚に作用する引張力の最大振幅は死荷重の1.03倍、 t_{S1} 直後は1.09倍、および t_{L2} 直後は2.59倍であり、これらの比からみると時刻 t_{L2} 以後にロッキングを開始したものと思われる。本解析ではクレーンを弾性体として扱っているため、クレーン部材の塑性化によるエネルギー吸収を評価することができないが、この解析結果では時刻 t_{L2} までにクレーンはおおよそ $6\sim 3\text{m/sec}^2$ の加速度応答をしていることがわかる。

4.2 クレーンの加速度・変位応答

上記の時刻 t_{L1} における岸壁・クレーンの加速度ベクトルを図-8に示す。この図より、ポータル(水平材)より上側の脚部には、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、斜材を格点AC間(図-3参照)に入れることによって、水平材より上側の脚部剛性が高くなるためと考えられる。また、この時刻ではガーダーの両端部が水平よりも上下に大きく加速度応答していることがわかる。

図-9は、時刻 t_{L1} における岸壁・クレーンの変形を示す。この図から、この時刻では上部構はほぼ水平に並進

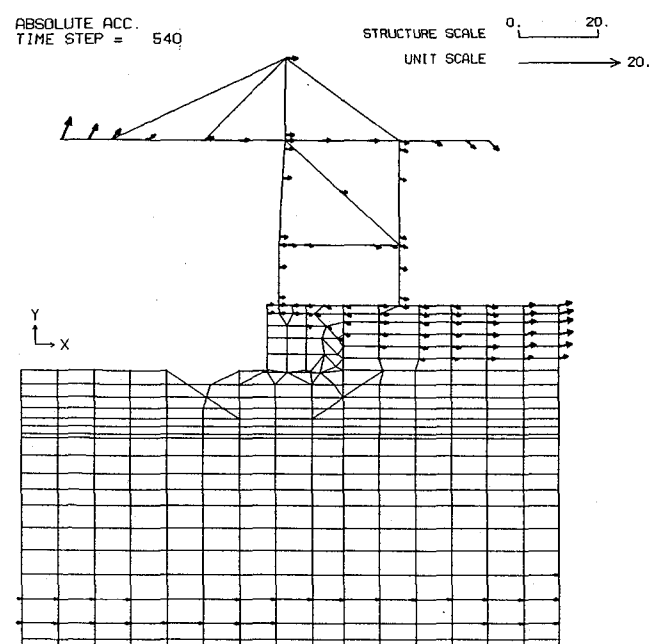


図-8 時刻 t_{L1} における岸壁・クレーンの加速度ベクトル(単位: m/sec^2)

運動するのみであり、脚部が最も大きく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。また、格点BやC近傍の変形量が大きく、大きな断面力が作用していることがわかる。

5. 岸壁とクレーンの連成による影響

岸壁のみの解析と岸壁・クレーンを一体化した連成解析の結果から、海側レール（実線）と陸側レール（点線）位置における水平加速度の解析波形を図-10に示す。この図において、上段は連成解析、下段は岸壁のみの解析

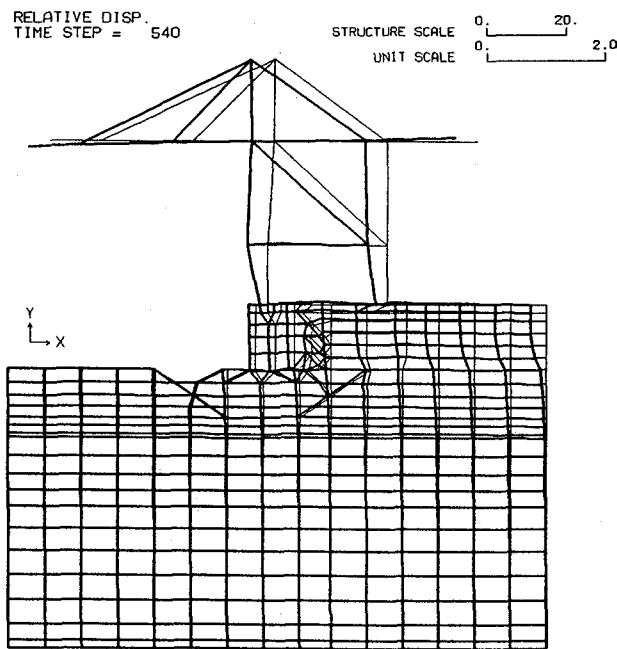


図-9 時刻 t_{L1} における岸壁・クレーンの変形（単位：m）

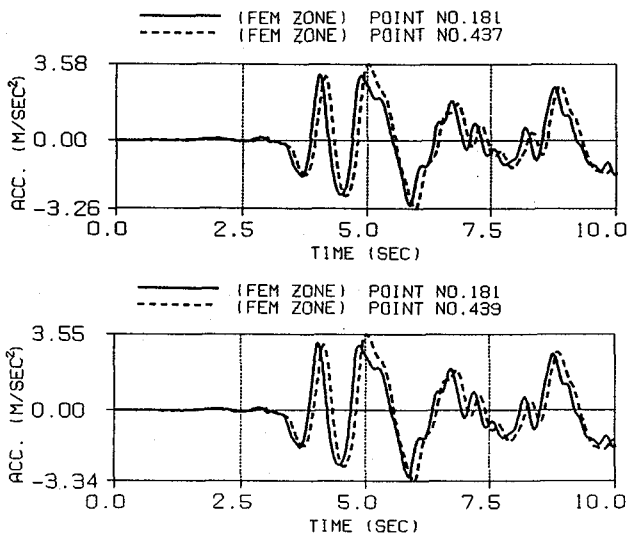


図-10 連成解析および岸壁のみの解析における海側（実線）と陸側（点線）レール位置の応答加速度時刻歴

結果であり、解析30秒間の中から最初の10秒間のみを示す。両解析結果とも、海側、陸側レールはほぼ同位相で振動していることがわかる。その最大値（ $t=4.04\text{sec}$ ）を比較すると、陸側レールの方が海側より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が、周辺地盤に見られるせん断剛性の低下が小さいため、地盤表面（KP+4EW）より加速度が大きくなったと考えられる。上段、下段で海側または陸側レール位置同士の波形を比較すると、最大加速度やその発生時刻はほぼ一致している。

図-11は、海側（実線）および陸側レール（点線）位置において、連成解析の伝達関数に対する岸壁のみの解析の伝達関数の比をとったものである。したがって、両解析モデルにおける陸側または海側レール位置での加速度応答が同一であれば、その比が1.0になり、クレーンとの連成の影響を知ることができる。この図より、クレーンの固有振動数である $f=0.5\text{Hz}$ 近辺の伝達関数比が、ほかの周波数領域に比べ小さくなっており、クレーンがレール位置での加速度応答を拘束していることがわかる。しかし、現実にはクレーンがロッキングを開始すると、レール位置での加速度応答は岸壁のみの解析と一致することが考えられる。その結果、この伝達関数比は1.0に近づき、周波数領域においても連成の影響がかなり小さくなると思われる。

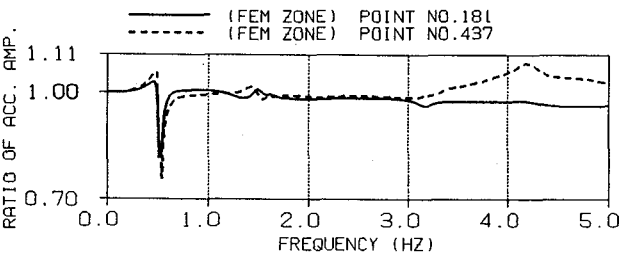


図-11 連成解析に対する岸壁のみの解析の伝達関数の比

6. あとがき

本解析はケーソンの滑りや地盤の破壊・液状化を考慮していないが、地盤の軟化を等価線形法で計算することにより、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。一方、解析による岸壁の変位量は神戸港の被災量よりも著しく小さく、解析結果は神戸港で発生した典型的なコンテナ岸壁の被災状況を再現してはいない。しかし、今後建設が計画されている耐震強化岸壁は、地盤の破壊や液状化を最小限にしようとするものであり、強化岸壁の地震応答はこの解析結果に近いものになると思われる。また、クレーンに関しても神戸港での被災状況を再現したものではないが、耐震強化岸壁上にクレーンが設置されると本解析に近い応答をすることが予想さ

れ、今後さらに走行装置のがたつきや車輪・レール間の摩擦などの接続条件を吟味し、ロッキング開始後の挙動や部材の材料非線形を検討していく必要がある。

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) Sugito, Sekiguchi, Yashima, Oka and Taguchi : Correction of vertical array strong motion data for buried directions and amplification characteristics of the ground, to be published.

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年2月。

3) 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年3月 等。

4) 田中、稲富、飯塚：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, 第23回地震工学研究発表会講演概要, pp. 213～216, 1995年7月。

(1995年9月18日受付)