

2000年鳥取県西部地震における境港市の地盤の地震時挙動

Seismic response of ground at Sakai-Minato city during the 2000 Tottoriken-Seibu earthquake

三輪 滋*・池田隆明**・綾部孝之***・沼田淳紀**

Shigeru MIWA, Takaaki IKEDA, Takayuki AYABE and Atsunori NUMATA

*飛鳥建設株式会社 技術研究所 (〒270-0222 千葉県東葛飾郡関宿町木間ヶ瀬 5472)

**工修, 飛鳥建設株式会社 技術研究所 (〒270-0222 千葉県東葛飾郡関宿町木間ヶ瀬 5472)

***株式会社協和エクシオ 板橋総合技術センター (〒173-0037 東京都板橋区小茂根 5-19-15)

During the 2000 Tottoriken-Seibu earthquake, different strong ground motion records were observed at adjacent three sites in the small area of Sakai-Minato city. The distances of each two sites are within 650 to 1700m. To examine the influence of nonlinear response of soil layer on ground motion amplification, one-dimensional dynamic response analyses of ground are conducted at each observation sites, and compared the response. Also, relation of soil condition and degree of liquefaction are examined. As a result, it is found that the difference of soil profiles above the base in engineering practice largely influenced on the ground motions and liquefaction.

Key Words: *Ground motion amplification, Nonlinear response, soft ground, Liquefaction*

キーワード: 地震動増幅, 非線形応答, 軟弱地盤, 液状化

1. はじめに

本論文は、近接した地点で観測された地震動と地盤条件に基づいて、表層地盤増幅特性の違いが、地震動および地震被害の違いに及ぼす影響を明らかにしたものである。

2000年10月6日鳥取県西部地震の際に、震央から約30kmに位置する弓ヶ浜半島先端部の境港市内においては、旧来の市街地内で、局所的に家屋の被害率の高い地域、それに隣接して被害の小さい地域が存在し、また、埋立て地盤で液状化被害が発生した地域があるなど、比較的狭い範囲内で被害の様相が異なっていた¹⁾。これらの被害と対応するようにそれぞれの地域において異なった地震動が観測された^{2),3),4)}。弓ヶ浜半島先端部の境港市街は少なくとも東西5km南北3km以上にわたって標高1~2m程度で標高差のほとんどない平坦な地形である。いずれの観測点もその中に位置し650~1700m程度の距離にあることから、地表の地形効果の影響はほとんどなく、表層地盤構造による増幅特性の違いが地震動や地震被害状況の違いに影響をおよぼしたものと考えられる。

このような比較的狭い地域のなかで、地震被害の様相が異なることは、近年の被害地震においても明らかにされて

いる。1993年釧路沖地震の際には、大きな地震動が観測された丘陵地の釧路地方気象台周辺で比較的多くの構造被害、地盤災害が見られたのに対し、釧路市西部の平坦地では被害が小さく、また、港湾地域では液状化により大きな被害が発生したという被害状況の違いがみられたことが記録されている⁵⁾。これを機に実施された釧路市での高密度合同地震観測⁶⁾の記録を用いて、それぞれの地点でのゆれやすさに違いがあることが示されている⁷⁾。1995年兵庫県南部地震では、震災の帯と呼ばれる震度7のゆれと構造物に大きな被害をもたらした帯状の地域が生じ、また一方で、臨海埋立て地盤においては大規模な液状化が発生し、港湾構造物や基礎構造物を中心とした被害が生じた⁸⁾。このような比較的狭い地域における、地震動や被害の違いは地盤の増幅特性の違いとして、ローカルサイトエフェクトと呼ばれることがあり、その重要性が指摘されている⁹⁾。これらの地震動の違いは、表層地盤の一次元的な増幅特性の違いやS波速度400m/s程度のいわゆる工学的基盤や地表面の不整形性あるいは盆地構造などのやや深い地盤構造の影響として説明されることが多い⁹⁾。兵庫県南部地震の震災の帯と周辺地盤の地震動の違いは、震源特性や、やや深い地盤構造の影響があるとされる^{10),11)}ものの、表層

地盤の一次元的な増幅特性の違いでもかなりの部分が説明できるとの報告^{12),13)}もあり、それらの影響程度に関しては、地点による違いも含め、検討の余地が多い課題である。

本論文では、2000年鳥取県西部地震における境港市の地震動を対象とし、特に表層地盤の一次元的な増幅特性の違いの影響程度に着目して評価することを目的に、それぞれの観測地点の地震動特性を比較するとともに、地盤データに基づいて地震応答解析¹⁴⁾や液状化の評価を行い、その違いを比較検討した。

2. 2000年鳥取県西部地震における境港市での被害と地震動

2.1 地震被害と震度分布

2000年鳥取県西部地震では、境港市内で地域によりさまざまな被害形態が見られた。旧来の砂州上の市街地内でも、境水道に沿った帯状の地域で全壊・半壊などの被害が多い地域、その南側に隣接した境港市役所周辺の被害が少ない地域が対照的であった。また、これらの地域の西側や東側に位置する埋立て地盤では液状化が発生し、それに伴う被害が生じるというように、比較的近接した狭い範囲内でも被害の様相が異なっていた¹⁾。森ら¹⁵⁾は、アンケート震度調査により全壊半壊家屋の多かった地域は、等価アンケート震度がその周囲では5強以下であるのに対し6弱以上と大きく、つまり5.5以上の地域とがよく対応することを示している。また、境港市港湾地域の埋立て地では液状化が発生し、岸壁や建物などに被害をもたらした。特に、境港市東部の昭和町は1967年以降の埋立て地、竹内団地は1978～1986年にかけての埋立て地であり、多くの地点で液状化が発生したが^{1),16)}、この地域においても等価アンケート震度が6強と大きく、液状化に関係して体感のゆれが大きかったことが報告されている¹⁵⁾。このように、被害の状況だけでなく、震度の分布からも狭い地域内で地震動が異なっていたと考えられる。

2.2 観測された地震動の特徴

これらの被害と対応するように、それぞれの地域において異なった地震動が観測された^{2),3),4)}。図-1に地震計の設置されている境港市役所、測候所、港湾観測点(以後、港湾と呼ぶ)、液状化地点の分布に加えて、文献15)に示された全壊半壊家屋の集中域およびアンケート震度の大きかった地域を示す。市役所と測候所は650mの距離にあり、いずれも旧来の地盤上に位置すると考えられる。港湾は埋立て地盤内に位置し、測候所とは1,200m、市役所とは1,700mの距離にある。

2000年鳥取県西部地震では、これらの地震観測点のうち、市役所では最大加速度のみが、他の地点では地震動記録が得られている。図-2に3地点で得られた最大加速度を比較して示す。図-3、図-4にそれぞれ観測された地震動の加速度時刻歴、加速度応答スペクトル(減衰定数 $h=5\%$ 、

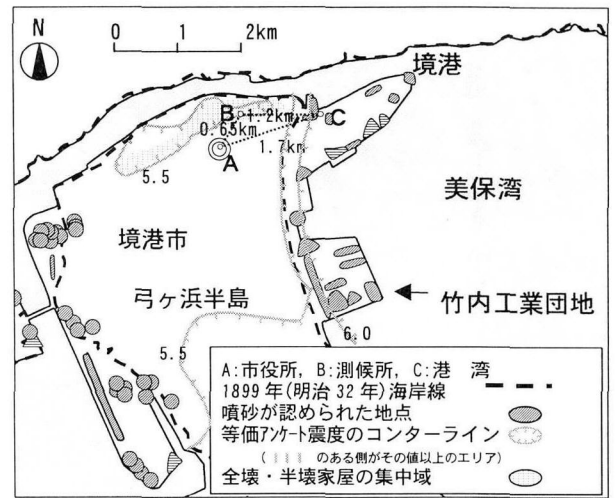


図-1 地震観測点、液状化地点と被害家屋の分布、アンケート震度の分布 (文献14)の図-1に文献15)の図-5を参考に加筆、修正)

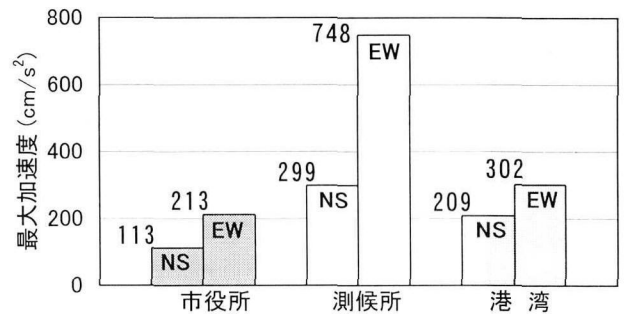


図-2 最大加速度の比較

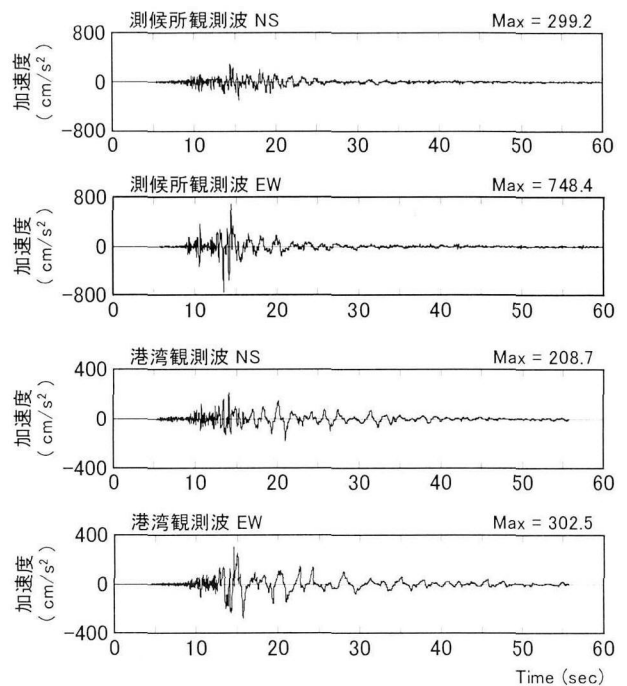


図-3 観測された地震動の加速度時刻歴

トリバタイト表示、以下応答スペクトルの表示は同じ)を示す。震源断層の方向におおむね直交するEW成分を比較すると、市役所が 213cm/s^2 であるのに対し、測候所では 748cm/s^2 、港湾では 302cm/s^2 であり大きな違いが見られる。NS成分はいずれの地点でもEW成分に比べて最大値は小さいが、3地点でEW成分と同様な違いが見られる。木造構造物について市役所周辺では被害がほとんどなかったのに対し、測候所周辺では木造家屋の全壊・半壊などの被害が集中して見られたことは、アンケート震度調査結果とも調和的であったが、地震動記録の加速度最大値の違いとも定性的には対応し、局所的に大きな地震動が生じたものと考えられる。旧来の地盤といえども2地点で地盤条件などの違いがあり増幅特性に影響を及ぼしたものと推定される。

港湾では特徴的な記録が得られた。測候所の記録が、地震動の後半では比較的周期の長い成分が見られるものの、振幅の減衰が早く、短周期成分も継続的に見られるのに対し、港湾では、主要動の後半には短周期成分が低減し、比較的周期が長く、かつスパイク状の波形が見られ振幅の大きな波形の継続時間も長いという特徴がある。これは、液状化した地盤で観測された既往の地震動記録^{17),18),19)}にも見られる特徴である。応答スペクトルも測候所が0.4秒から2.9秒までに卓越した成分を持つのに対し、港湾は1秒以下の短周期成分が小さく、1.5秒以上の長周期成分が卓越しているのがわかる。港湾の記録で波形の特徴が変わる16秒付近を境に前半と広範囲にわたった記録の応答スペクトル($\eta=5\%$)を測候所と港湾とで比較して図-5に示す。前半は1秒以下の短周期成分については測候所のほうが大きい、1秒以上では、両地点に違いはない。しかし、後半では測候所の卓越周期がほとんど変化しないのに対し、港湾では卓越周期が1.8秒付近から3.8秒へと大きく変化しているのがわかる。

港湾観測点と同じ埋立て地内では多くの地点で液状化が発生し、また観測地点周辺の建物では建物周囲の沈下、約100m離れた道路では大量の噴砂や電柱の沈下、埋設管損傷といった被害が確認されており、観測記録は、液状化あるいは間隙水圧の上昇の影響を受けたと推定される。このように650~1,700m程度の距離の比較的近接した3つの観測点において、加速度レベルや周期特性などが異なった地震動が観測されたことは、それぞれの地点での表層地盤の非線形増幅特性の違いが地震動とその結果生じた地震被害の違いに影響をおよぼしたものと解釈できる。

3. 観測点の地盤構造

図-6にこの付近の地盤構造を示す²⁰⁾。基盤層が島根半島側から急激に深くなること、表層地盤の構造は地点によりかなり違いがあることがわかる。地震後に行われた微動のアレー観測²¹⁾から弓ヶ浜半島先端側の堆積層の深さは非常に深く最深部で500~700m付近にあるとされている。

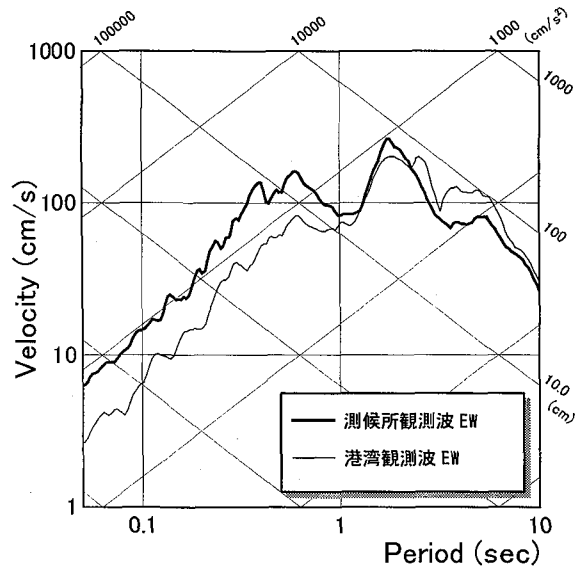


図-4 観測された地震動の加速度応答スペクトル (トリバタイト表示, 減衰定数 5%)

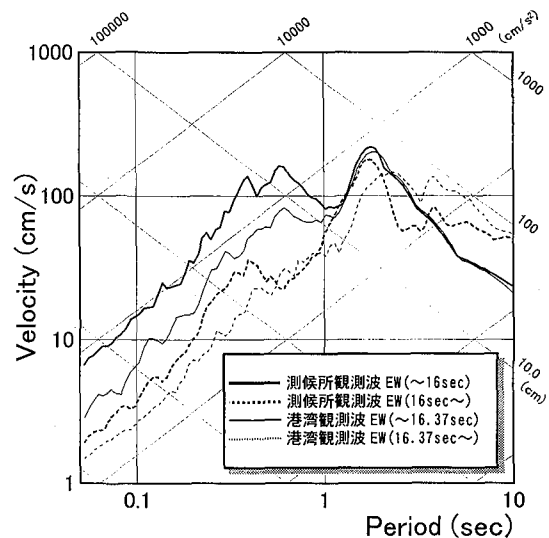


図-5 港湾の波形の特徴がわかる時刻の前後で分けた記録の応答スペクトル (トリバタイト表示, 減衰定数 5%)

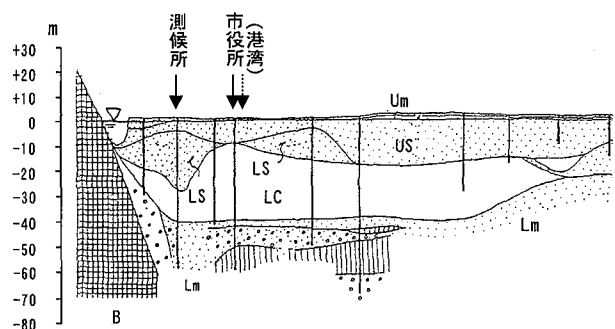


図-6 境港市付近の地盤構造²⁰⁾

先端部では微動の卓越周期が最深部に比べ短いことから、それよりは浅いと考えられるが、この付近の深い地盤構造に関する資料は十分ではない。この地域のいくつかの比較的深いボーリング調査結果^{20),22)}からS波速度が400m/s程度に相当するN値50以上の砂礫層が広く分布すると考え

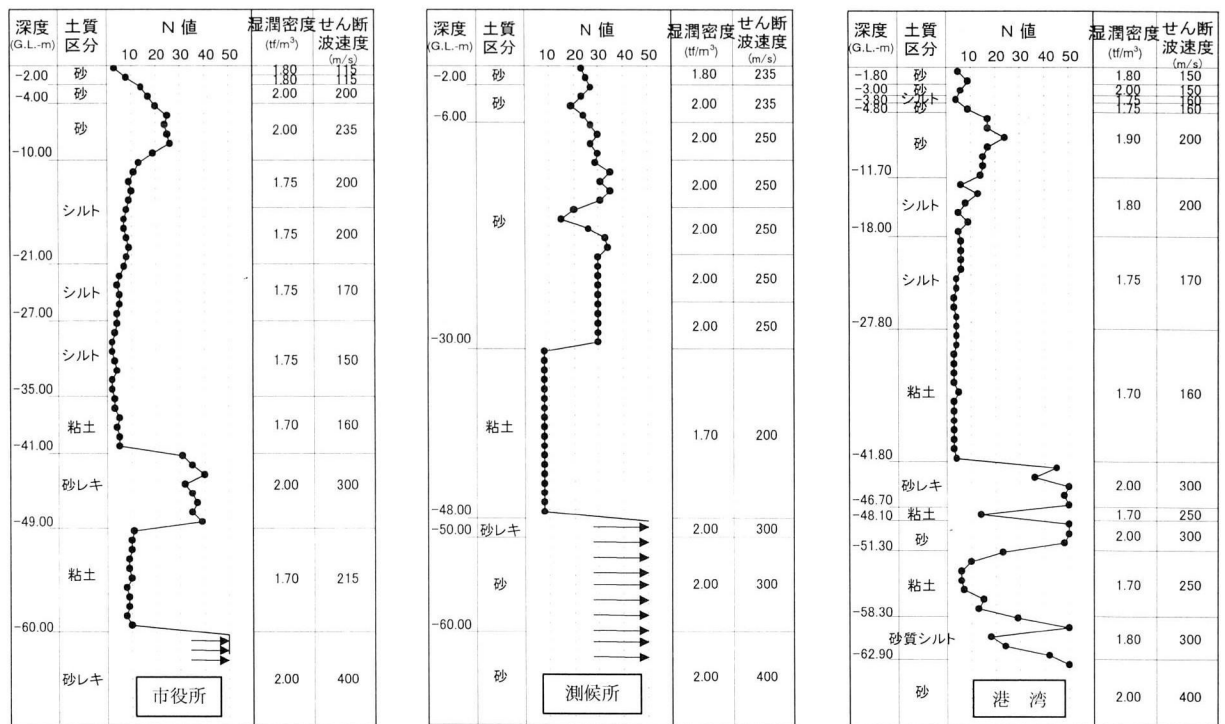


図-7 各観測点の地盤構造

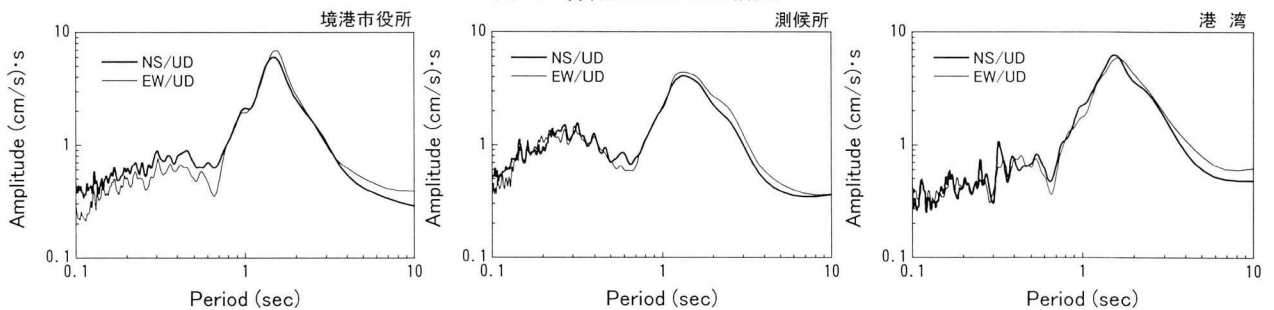


図-8 微動の水平鉛直スペクトル比の比較

られるのが、G.L.-60m 付近であることから、いわゆる工学的基盤を G.L.-60m と仮定する。

図-7 にそれぞれの観測点²²⁾および近傍の地盤柱状図²⁰⁾から推定した地盤モデルを示す。測候所は、ごく近傍の調査では土質区分しか判明していないが、周辺における同様の地盤構成の調査結果を参考とした。表層約 30m は N 値 20~30 の比較的締まった砂層が堆積し、G.L.-30m~G.L.-48m までは厚さ 18m 程度の粘性土層を挟むが、G.L.-48m 以深は砂層が連続している比較的良好な地盤である。市役所は表層約 10m が比較的締まった砂層であるが、G.L.-40m 付近まで粘性土層が連続し 8m 程度の砂礫層を挟んで再び粘土層が現れる地盤であり、測候所に比べ軟弱である。港湾は表層約 12m に埋立て砂層が存在するが、以深は市役所と似た構造である。G.L.-42m 付近まで軟弱なシルト・粘土層が続き 10m 程度の砂層を挟んで粘性土、G.L.-63m 付近から N 値 50 を越える砂礫層が現れる。このうち埋立て砂層は N 値も低く液状化の可能性が高い。これらの地点では詳細な地盤情報がないために地盤の密度は土質から、S 波速度は N 値から文献²³⁾を参考として設定した。このようにして設定した地盤モデルから得られる

地盤の固有周期は測候所で 1.05 秒、港湾と市役所で 1.25 秒であり、締まった砂層を有する測候所で 0.2 秒短くなっている。

地盤の卓越周期は、微動の水平鉛直スペクトル比から推定できるとされ^{24),25),26)}、基盤構造の推定²⁷⁾などに用いられている。これらの地点で微動測定を行い、求めた各地点の水平鉛直スペクトル比を図-8 に示す。市役所と港湾の卓越周期はそれぞれ、1.46~1.52 秒、1.58~1.62 秒であり、測候所は、これらの地点より約 0.2~0.3 秒短く 1.32 秒である。いずれの地点の卓越周期も地盤モデルから得られる見かけの固有周期よりも長く、これらの地点の卓越周期には、さらに深い堆積層の影響が含まれるものと考えられる。3 つの観測地点では、仮定した工学的基盤より以深では、同様な礫混じり砂層が広く分布しており、深部構造も同様であることが予想される。表層の卓越周期を S 波速度の伝達時間の違いととらえると、工学的基盤よりも深部の速度構造のコントラストが大きい基盤面の深さが 3 地点で同じであるならば、工学的基盤以深では S 波速度の伝達時間に違いはなく、工学的基盤から上における伝達時間の違いが、堆積層全体の周期の違いに影響すると考えられる。測

候所が他地点に比べ相対的に約0.2秒短周期側に卓越周期があり、市役所、港湾が逆に相対的に長周期側にあつてほぼ同じ卓越周期であるという関係は、測候所ではS波速度が高いと考えられる締まった砂層が存在すること、市役所や港湾では、埋立て層であるかどうかの違いはあるものの、軟弱層が厚く、また速度構造がほぼ同じであることとよく対応している。これらの地点に関しては、卓越周期の違いには表層構造の違いの影響が大きいと考えられる。

以上のように3地点は、近接してはいるものの、表層地盤構成にかなりの違いがみられ、地震時の増幅特性が異なることが予想される。地盤モデルから得られる卓越周期の違いは、微動測定結果とも調和的な結果が得られ、このことから、周辺地盤の情報から設定した地盤モデルについても妥当なものであると考えられる。

4. 地盤の地震時挙動の検討

4.1 検討の条件

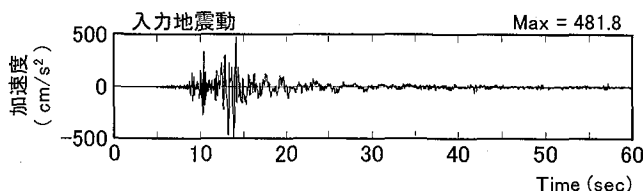
測候所、港湾では、鳥取県西部地震において地表面での地震動記録が得られているものの、鉛直アレー観測は実施されておらず、地震時に表層地盤の挙動については明らかではない。そこで、前項で示した地盤モデルを用いて一次元地震応答解析を行い、地盤の地震地挙動を推定し比較した²⁸⁾。各層の動的変形特性は文献²⁹⁾を参考に設定した。

境水道をはさんだ、島根県島根半島のK-net 美保関²⁹⁾やKiK-net 美保関³¹⁾では、表層に薄い堆積層があるものの、せん断波速度1,000m/s程度の岩盤上の記録が得られている。境港市から近い地点で得られたこれらの記録を境港市の相当するS波速度構造の深さに入力することが考えられるが、前述のように、境港市では堆積層が厚く、その構造が明らかでないことから、比較的資料のそろっている工学的基盤相当の深さで浅く考えてその増幅特性を検討することとする。具体的には、測候所では噴砂はなく周辺でも液状化の痕跡が見られないことから、地盤の非線形性の影響は含まれるものの間隙水圧の上昇や液状化の影響は小さいと考え、この記録をもとに工学的基盤の地震動を推定し、他地点の地盤挙動を比較することとする。

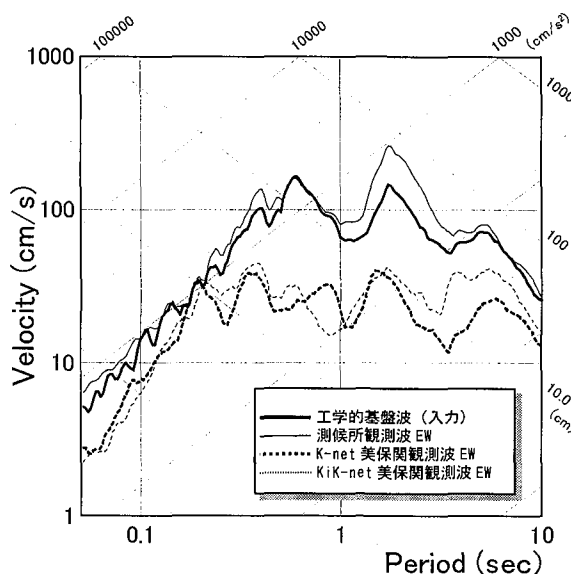
測候所の地表面観測波をもとに等価線形解析により工学的基盤の地震動を推定した。地表面の強震記録から工学的基盤の記録を求めようとする解析を行う際には、等価線形化法でよく用いられるいわゆる解析コードShake³²⁾では、高次モードの減衰を過大に評価する³³⁾ため、非常に大きな加速度となったり発散したりする場合がある。ここでは、引き戻しの解析には、杉戸らが提案している周波数に依存した剛性、減衰の評価が可能なる方法³³⁾を用いた。求めた工学的基盤における地震動の加速度時刻歴、加速度応答スペクトル(h=5%)を図-9に示す。最大加速度は480cm/s²程度であり、スペクトルは、地表面のものに比べ、非線形性を考慮した場合の表層地盤の卓越周期の1.74秒を中心に1~3秒で小さくなっている。K-net 美保関、KiK-net 美

表-1 港湾埋立層の液状化パラメータ

震度	R115	s1	w1	p1	p2	c1	φf	φp
G.L.-1.8m~ G.L.-3.8m	0.24	0.005	5.127	0.5	1.031	1.6	40	28
G.L.-3.8m~ G.L.-4.8m	0.31	0.005	9.000	0.5	0.950	1.8	40	28
G.L.-4.8m~ G.L.-11.7m	0.43	0.005	11.870	0.5	0.850	1.8	40	28



(a) 加速度波形



(b) 加速度応答スペクトル (トリプル表示, 減衰定数 5%)

図-9 工学的基盤の地震動

保関の観測記録^{29),31)}の応答スペクトル(h=5%)を図-9にあわせて示すがこれと比べると、卓越する成分はほぼ同様であるが、大きさに3~4倍程度の違いがあり、深い堆積層内での増幅が大きいものと考えられる。この波形を用いて3地点の地震時挙動を検討する。地盤の応答解析には、有効ひずみ係数の設定を任意に行うために、通常よく用いられる等価線形解析法³²⁾を用いた。

港湾については埋立て砂層が液状化する可能性を考え、井合らの提案する有効応力解析法³⁴⁾を用いた。液状化強度特性は、N値から求めた。各層のN値がその層の有効上載圧での値であるとし、港湾の基準²⁹⁾で示された換算式で有効上載圧100kN/m²での換算N値とする。建築基礎

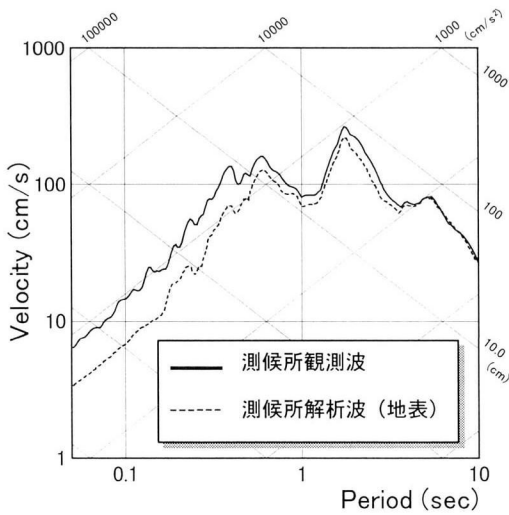


図-10 測候所地表の加速度応答スペクトル (トリブタ表示, 減衰定数 5%)

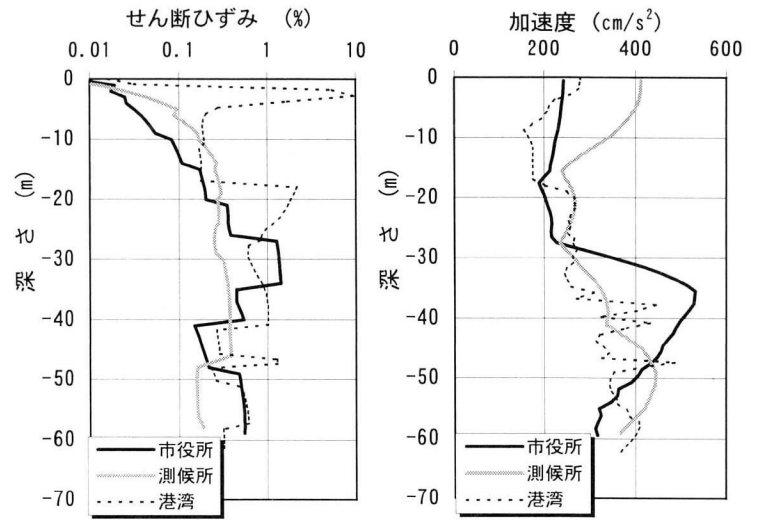
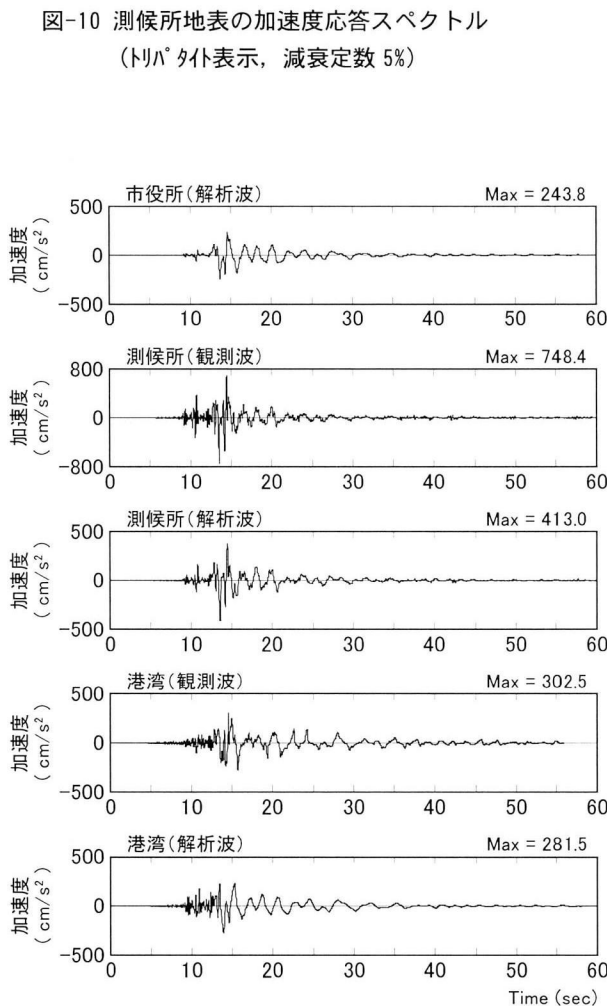
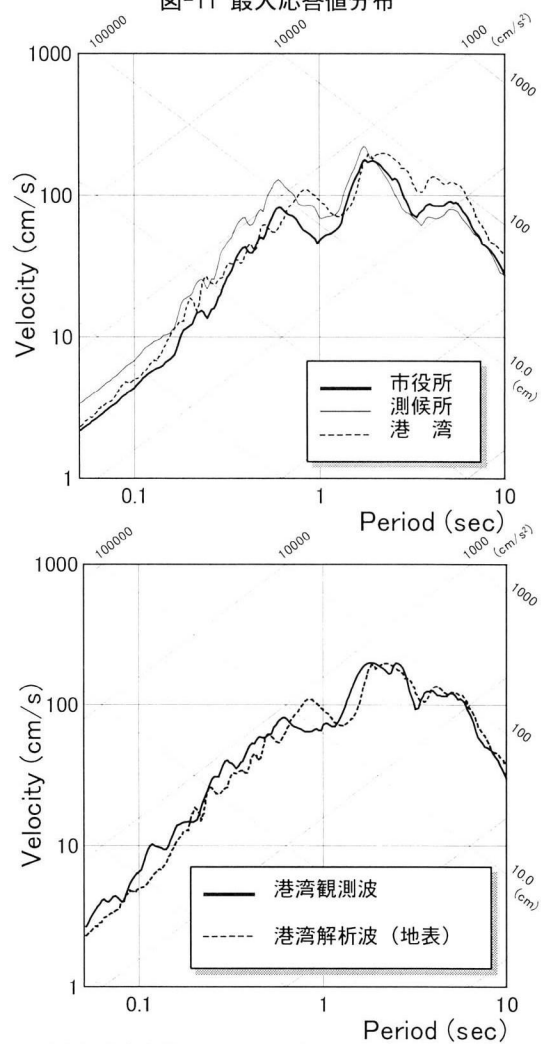


図-11 最大応答値分布



(a) 加速度波形



(b) 加速度応答スペクトル (トリブタ表示, 減衰定数 5%)

図-12 地表面加速度および加速度応答スペクトル (トリブタ表示, 減衰定数 5%)

構造設計指針³⁵⁾に示された吉見・時松の方法³⁶⁾で細粒分の補正を行い補正 N 値とし、繰り返し回数 15 回での液状化強度比を求めた。ここで、細粒分含有率は噴砂の粒度分布¹⁶⁾を参考に 10%とした。さらに、Seed らによるマグニチュードと等価繰り返し回数の関係³⁷⁾および吉見らによるマグニチュードと換算 N 値による液状化抵抗の補正係

数の関係³⁸⁾を用いて、繰り返し回数 5, 10, 26 回の液状化強度比を求めた。これをもとにして有効応力解析に用いる液状化に関するパラメータを設定し、表-1 に示す。

4.2 地盤の挙動の検討

図-10 に測候所での解析結果の地表面加速度の応答ス

ベクトル(h=5%) を観測記録とあわせて示す。周波数に依存しないせん断剛性を用いた等価線形解析で応答解析を行ったことから、観測記録に比べ短周期成分がやや低めに評価された。しかしせん断ひずみなどは引き戻し計算と同程度であり、短周期成分での評価を注意すれば、解析結果はほぼ妥当と考えられる。以降では、この解析結果が測候所での地盤の応答特性を反映しているものとし、同じ入力地震動を用いた解析から各地点の応答特性の比較を行う。図-11 にそれぞれの地点で応答解析を行った結果得られた最大せん断ひずみと最大加速度応答値分布を示す。市役所の地盤では G.L.-27~-35m のシルト層で 1% を超える大きなひずみが生じ、加速度が低減し地表での加速度は、測候所の約半分の 244cm/s^2 となっている。一方測候所ではせん断ひずみは 0.5% 程度以下と小さく押さえられ、加速度応答に大きな低減は見られない。港湾では、G.L.-18~-41.8m のシルト層、粘土層でのひずみが大きいのに加え、表層の砂層で液状化が発生しさらに大きなひずみが生じている。加速度応答は粘性土層で低減しそれより浅い位置では増幅せず、地表では観測記録とほぼ同等の 288cm/s^2 となる。

図-12 に解析で得た地表面加速度および加速度応答スペクトル(h=5%) を示す。測候所では短周期成分が卓越し、市役所では短周期成分が小さく、この違いが最大加速度の違いに表れていると考えられる。港湾では、埋立て砂層の表層部が液状化したことで、主要動の後半から短周期成分がなくなり、長周期成分が卓越する波形を示している。この傾向は観測記録にも表れる特徴であり、応答スペクトルも 4 秒を中心に 1.5 秒以上の周期帯で卓越し、観測波とよく一致している。波形の位相やスパイク状の波形までは観測記録を十分には表現できていないものの、地盤の液状化に起因して地震動の周期・振幅の変化が生じたことを評価できたと考えられる。地表付近には過剰間隙水圧が初期有効上載圧に達し、せん断ひずみが 2% 以上発生し、液状化したと考えられる砂層が見られるが、その層厚は、地下水位以下の表層部 2m 程度であり、観測地点では激しい液状化が起こらなかったと考えられ、ごく近傍で噴砂などが観察されなかった事実と整合する。このように、地震応答解析結果は観測記録の得られた地点での応答をよく再現していると考えられ、推定した市役所の地震応答も信頼できると考えられる。

観測記録および解析結果から求めた加速度最大値、計測震度、スペクトルインテンシティ(SI 値)といった地震動強度の指標を表-2 示す。観測記録、解析結果とも、いずれも測候所、港湾、市役所の順である。測候所と港湾が、計測震度で 6 以上、SI 値で 300cm/s を示すのに対し、市役所は計測震度 5.8、SI 値 274cm/s と他の 2 地点に比べ計測震度で 0.2~0.25 小さく、SI 値で 80 から 85% の値という明瞭な違いが見られる。森らのアンケートによる等価計測震度¹⁵⁾も市役所付近が 5.5 以下でもっとも小さく、測候所や港湾が震度 5.5 以上であることと調和的である。

表-2 地震動強度指標の比較

	市役所		測候所		港湾	
	解析	観測	解析	観測	解析	観測
最大加速度 (cm/s^2)	244	748	413	302	281	281
計測震度	5.79	6.20	6.04	6.05	6.01	6.01
SI (h=2%) (cm/s)	275	437	336	331	324	324

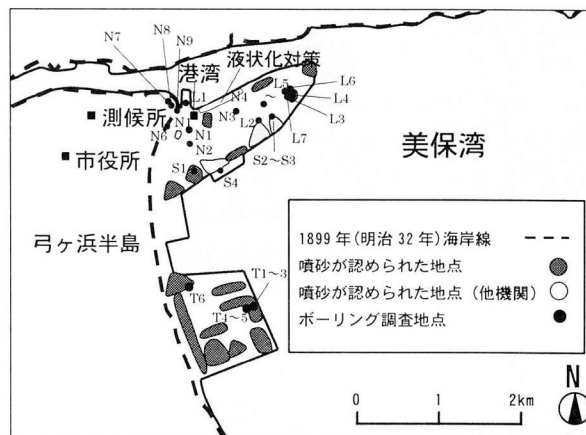


図-13 境港市の液状化地点と観測地点

加速度記録は、観測記録と比べると測候所の応答がやや小さく、市役所の応答がやや大きいため、測候所と市役所との観測記録の最大値の差が 2 成分とも 3 倍前後出のに対し、1.7 倍である。市役所では加速度最大値が観測の約 1.15 倍の 244cm/s^2 であるが、市役所の地震計は、RC4 階建て市役所庁舎のすぐ横に設置されていることから、構造物の幾何学的拘束(Kinematic Interaction)により特に短周期成分が低減し、地盤のみを考えた場合の加速度よりも小さな記録が観測された可能性がある。このことを考え合わせると、測候所と市役所との違いは、短周期成分の影響に敏感な加速度最大値においても、2 倍程度までは表現できることになる。

以上のように、2000 年鳥取県西部地震の地震動記録や被害分布から、地表面が平坦に広がった地域内の近接した地点でも、その強震時の地震動特性が大きく異なることを実例として示した。これらの地点ではそれぞれ地盤構造の違いがあり、工学的基盤以浅の表層地盤の一次元的な地盤条件とそれに基づいた非線形性を考慮した応答解析により 3 地点の記録の特徴や地震動レベルはほぼ再現することができた。平坦であっても比較的狭い範囲で地盤条件が異なる場合には、表層地盤構造の影響で増幅特性は異なること、また、一次元的な表層地盤増幅特性の違いが地震動におよぼす影響が大きいことがわかった。

5. 港湾地盤の地盤条件と液状化の関係

前述したように、観測地点周辺の建物では建物周囲の沈下は見られるものの噴砂は確認されていない。一方で約 100m 離れた道路では大量の噴砂や電柱の沈下、埋設管被害が確認され、かなり激しい液状化が発生したことが推定

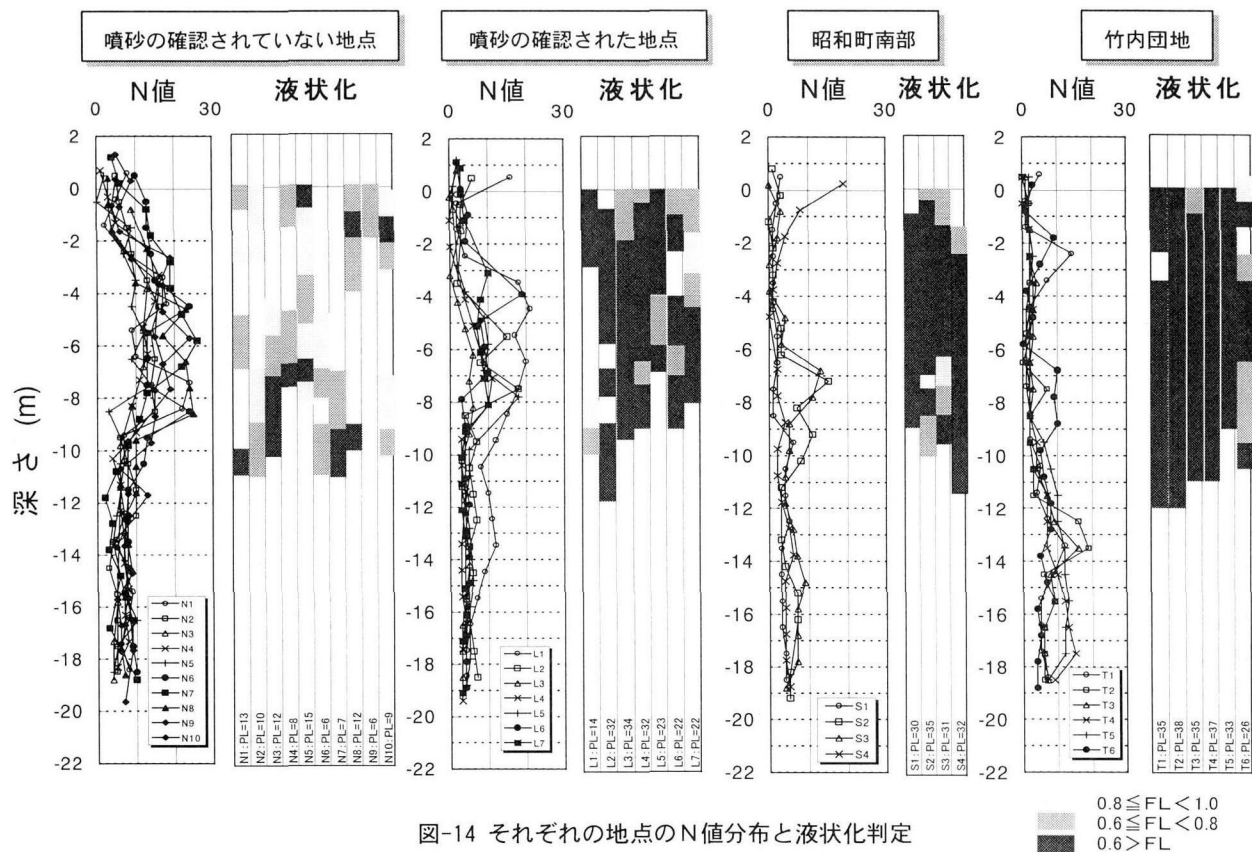


図-14 それぞれの地点のN値分布と液状化判定

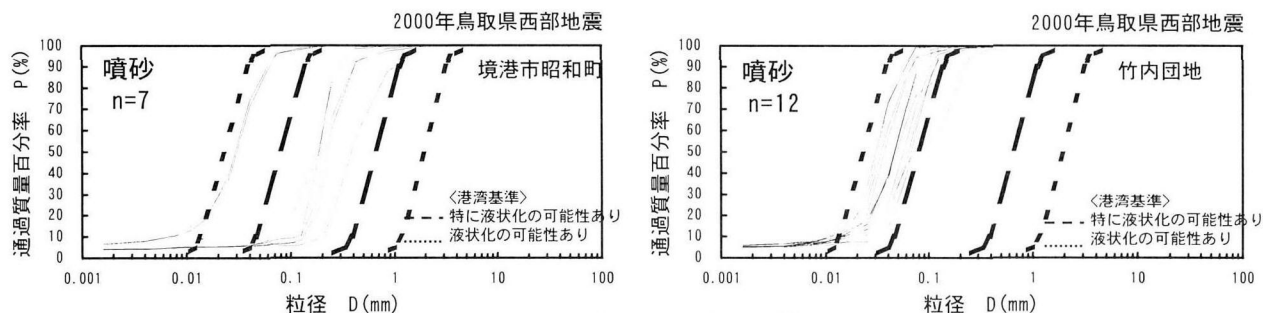


図-15 噴砂の粒径加積曲線

される。また北側岸壁で地盤改良が行われた地点³⁹⁾では被害は見られない。このように、昭和町の埋立て地内においても、噴砂が大量に見られた地域とそうでない地域、あるいは噴砂は見られないものの建物周辺の地盤沈下が明瞭で5~10cm以上におよぶ地域、噴砂がなくほとんど沈下も見られない地域があり¹⁶⁾、地点によって液状化の有無や液状化の程度に違いがあったと考えられる。

図-13に埋立て地の境界と考えられる1899年の海岸線、および昭和町、竹内団地の埋立て地で噴砂が確認された地点を示す。また、昭和町と竹内団地に関して地盤柱状図が得られたボーリング調査地点を図-13にあわせて示す。北側の岸壁の一部は液状化対策がなされている³⁹⁾ので、その部分の調査地点は除いている。これらの柱状図とN値分布^{16),20),22),40)}を液状化による噴砂が確認された地点、液状化による噴砂が確認されなかった地点、細粒分の卓越した噴砂が確認された地点、および竹内団地に分けて図-14に

示す。図-14の各柱状図のNo.は図-13のボーリング地点と対応している。埋立て地全体に表層の11~12mが埋立て層、その下にG.L.-40m付近まで軟弱なシルト・粘土層が続く地盤構成はどの地点もほぼ同様あり、この埋立て地ではある程度の広がりの中でこのような地盤構成であると推定される。埋立て層は、緩い砂が卓越する地点、比較的締まった砂が卓越する地点、シルト層が卓越する竹内団地と同様に細粒分が卓越する地点などに分けることができる。噴砂が確認されていない地点の埋立て層のN値は、噴砂が確認された地点の埋立て層のN値に比べて相対的に大きく平均してN=15程度の値を示す。噴砂が確認された地点はやはり表層埋立て層のN値が5程度と低く、また大量の噴砂が見られた地点ではその層厚も相対的に厚い。また、現地調査では噴砂が確認できない地点でも液状化の影響と考えられる地盤の沈下が明瞭な地点とそうでない地点が見られた。同じ埋立て地内においても、このよう

な表層地盤条件の違いが、噴砂の有無や液状化の程度の違いとなって現れたものと考えられる。

図-15 に昭和町の噴砂の粒径加積曲線を竹内団地の噴砂とあわせて示す。北部の噴砂は均等係数の小さなきれいな砂であり細粒分含有率は多くても10%以下である。液状化した地点は緩い均等粒径の埋立て砂層が液状化したと考えられる。一方、埋立て地の南部では細粒分の多い竹内団地の噴砂に似た粒度分布の噴砂が見られる。細粒分を多く含む噴砂が確認された地点では、埋立て層は、ほとんどがN値0~2程度の軟弱なシルトで構成されている。竹内団地でもその層厚がやや厚くなるもののやはりN値0~2程度の軟弱シルトにより構成されている。均等係数は小さく、細粒分含有率は50%以上であるが粘土分含有率は10%以下で非塑性である¹⁰⁾。このように埋立て地の噴砂は細粒分が卓越する場合が多く、液状化した地盤と同じ粒度組成をもつことが既往の地震被害調査および分析において指摘されてきた^{41),42)}が、今回の地震においても広範囲に顕著な現象として現れたものと考えられる。

6. 港湾地盤の液状化判定

前述のように埋立て地内では埋立て層下端までは同様な地盤構成であり、ほぼ同様な地震動が作用したものと考えた。港湾観測点の観測記録や有効応力解析結果の最大加速度が約 300cm/s^2 であることから、この値を用いてそれぞれの地点の液状化判定を実施した。またあわせて液状化指数 PL ⁴³⁾も求めた。液状化判定の方法は建築基礎構造設計指針の方法³⁵⁾にしたがい、せん断応力の繰り返し回数を規定するマグニチュードは鳥取県西部地震の規模から $M=7.3$ とした。図-14 に液状判定結果をあわせて示す。この方法では $M=7.3$ の地震の場合に地表面加速度から推定した最大せん断応力の0.63倍の等価せん断応力が15回繰り返し作用すると仮定して液状化を判断する。一方有効応力解析から得られた波形からは、せん断応力の繰り返し回数はせいぜい5から10回程度と考えられ、等価せん断応力としてはその係数はやや小さい。図-16 に港湾観測点での有効応力解析から得られた最大せん断応力分布、液状化判定での等価せん断応力分布を示す。また、実現象は複雑であるが、ここでは比較のため単純に有効応力解析のせん断応力に、繰り返し回数が10回程度として得た等価せん断応力をあわせて示す。せん断応力の比較からは、表層部 $GL-4\text{m}$ 付近までは同等の評価、それより深い部分では、せん断応力を $GL-6\text{m}$ で1.3倍、 $GL-12\text{m}$ で1.7倍程度大きめに評価していることになる。この違いは鳥取県西部地震が内陸断層に起因したもので、地震動の繰り返し回数が少ないこと、実際のせん断応力分布は、必ずしも判定法での仮定とは一致しないことなどによると解釈できる。この時、 FL が0.6以下の層では有効応力解析で得られた結果相当のせん断応力分布であった場合でも液状化が発生すると考えられる。このように有効応力解析結果とここで実

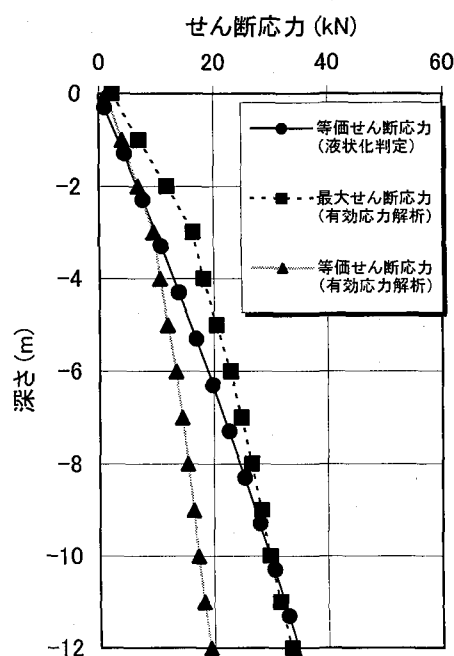


図-16 港湾観測点でのせん断応力の比較

施する液状化判定は、港湾観測点でも必ずしも同一条件ではなく、また地点によって地盤条件が異なることから、液状化判定結果は同じとはならない。以上のような前提条件を明らかにした上で、結果を評価する。

噴砂が確認された地点では液状化層厚が厚く、かつ FL 値も0.6程度以下の層が厚く存在する場合がほとんどである。また、液状化指数 PL もほとんど20以上である。このような激しい液状化の判定結果は、地表への砂の噴出が多く見られたことと調和的である。一方、噴砂が確認されていない地点では、液状化した可能性のある層厚が比較的薄く、また表層部に非液状化層が存在する場合が多い。また FL 値も0.6以上がほとんどで、 PL も15以下である。昭和町南部や竹内団地のシルトは、粘土分含有率が低く非塑性なシルトであることから液状化の検討対象とし細粒分による N 値増加は9以下(細粒分30%相当)とした。その結果、激しい液状化の発生が予測されたが、これは細粒分の多い噴砂の大量の噴出と調和的である。これらの地点の場合、 $FL < 0.6$ の層が厚く、 $PL \geq 20$ の地点ではかなりの噴砂が見られ、ほとんどの層で $FL > 0.6$ で、 $PL \leq 15$ では沈下があっても噴砂は見られないという区分ができた。

仮に $GL-5\text{m}$ 以深でせん断応力が有効応力解析で得られた程度であったとすると、噴砂の確認された地点、細粒分の卓越した昭和町南部・竹内団地は、前述の結果同様ほぼ全層液状化するが、噴砂の確認されていない地点では、液状化は発生しないか、あるいは浅い部分のみが液状化する場合が多く、その違いがより顕著となる。

鳥取県西部以地震の際には、近接したあるいは同じ埋立て地盤であっても、液状化の程度が異なり、噴砂の有無、細粒分の噴砂の地域といった地域で分類すると、埋立て地盤の土質や N 値に表れる地盤条件、埋立て年代といった

地盤情報による分類とよい対応を示し、被害状況はそこから得られる液状化評価と良い対応を示した。地震動レベルが大きな場合であっても、N 値が 15 程度以上のある程度締まった砂層では液状化はないか軽微である一方、N 値 5 程度のゆるい砂地盤やシルト質地盤では液状化の程度が激しいというように、埋立て地盤の条件の違いが液状化の発生に大きく影響すると言える。

7. 結論

2000 年鳥取県西部地震における境港市の地震動を対象とし、表層地盤構造の違いが表層地盤の地震動増幅におよぼす影響に関して、それぞれの観測地点の地震動特性を比較するとともに、地盤データに基づいた地震応答解析や地盤の液状化の評価を行い、以下の結論を得た。

- (1) 鳥取県西部地震では、境港市の地表面がほぼ平坦な地域内の 650~1,700m 程度の距離の近接した観測点で、地震動は最大加速度で 200cm/s^2 から 700cm/s^2 と 3 倍以上、応答スペクトルでは卓越周期に 1 秒程度の違いや時間帯によっては優勢な周期成分に 2 秒もの違いがある地震動が観測された。このような地震動の違いは、震度 5 強から 6 強の間の違いとなって現れ、家屋の被害程度や液状化の発生状況と調和的な関係が見られた。
- (2) 観測された近接した地点の地震動の違いは、それぞれの地点における地盤の非線形性や液状化を考慮した表層地盤の一次元的な増幅特性の違いの影響が大きいことがわかった。表層地盤の非線形一次元応答解析から、地震動増幅の違いは、比較的締まった砂層の厚い測候所では 2 秒以下の周期の増幅が大きいこと、また、港湾では液状化により、加速度波形の長周期化と振幅の低減、卓越周期の 3 秒以上への長周期化としてほぼ説明できた。また、最大値のみがわかっている市役所では、厚い軟弱な粘性土層の影響で 1 秒以下の短周期の増幅が小さいことで、他地点よりも小さな地震動が推定できた。また、これらの地震動の強度指標は被害分布と調和的な関係を示した。
- (3) 境港市の埋立て地盤では、有効応力解析から、埋立て層において液状化が発生したと判断される。それぞれの地点における液状化の有無や程度の違いは、埋立て地盤の土質や N 値に表れる地盤条件、埋立て年代といった地盤情報による分類とよい対応を示し、被害状況はそこから得られる液状化評価と良い対応を示した。N 値が 15 程度以上のある程度締まった砂層では液状化はないか軽微であったが、N 値 5 程度のゆるい砂地盤やシルト質地盤では液状化の程度が激しく、埋立て地盤の条件の違いが液状化の発生に大きく影響した。

謝辞

本検討では港湾空港技術研究所境港観測地点、気象庁境港観測所および防災科学技術研究所の K-net 美保関、KiK-net 美保関の観測記録を使用させていただきました。記して感謝いたします。また地震被害調査およびデータ分析では飛鳥建設九州支店中岳ダム(作)嶋本栄治氏、飛鳥建設土木事業本部設計部大野孝二氏、土質試験では飛鳥建設技術研究所

染谷昇氏、また図表作成では鈴木重良氏の協力を得ました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 飛鳥建設株式会社技術研究所：2000 年 10 月 6 日鳥取県西部地震被害調査報告書 2000.10.
- 2) 港湾技術研究所：平成 12 年（2000 年）鳥取県西部地震港湾施設被害調査報告（暫定版）
<http://www.phri.go.jp/jishin/index.html>, 2000.10.
- 3) (社)土木工学会 鳥取県西部地震被害調査団：2000 年 10 月 6 日鳥取県西部地震被害調査報告，
<http://www.jsce.or.jp/ecc/tottori.pdf>, 2000.12.
- 4) 気象庁：平成 12 年鳥取県西部地震(95 型震度計波形データ)，2000.11.
- 5) (社)土木学会：震害調査シリーズ 2，1993 年釧路沖地震震害調査報告書，1994.12.
- 6) Association for Earthquake Disaster Prevention Japanese Working Group on Effects Surface Geology on Seismic Motion: STRONG MOTION DATABASE, Cooperative Strong Motion Observation in Kushiro, Hokkaido, Japan, 1997.6.
- 7) 森伸一郎,三輪滋,関宝琪：1993 年釧路沖地震で被災した釧路港埋め立て地盤の地震動増幅特性，軟弱地盤における地震動増幅シンポジウム，土質工学会，pp.211-218，1994.10.
- 8) Committee of Earthquake Engineering, JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS: THE 1995 HYOGOKEN-NANBU EARTHQUAKE, - Investigation into Damage to Civil Engineering Structures -, 1996.6.
- 9) (社)土木学会 地震工学委員会 ローカルサイト・エフェクト小委員会，ローカルサイト・エフェクトワークショップ報告書，2000.10.
- 10) 川瀬博,林康裕：兵庫県南部地震時の神戸市中央区での基盤波の逆算とそれに基づく強震動シミュレーション，日本建築学会構造系論文集，第 480 号，pp.67-76，1996.2.
- 11) 釜江克宏：第 4 章本震の震源過程，4.4 高周波地震動の発生メカニズム，阪神・淡路大震災調査報告 共通編-2，1 編 地震・地震動，阪神・淡路大震災調査報告編集委員会，1998.3.
- 12) Suetomi, I., and Yoshida, N.: Nonlinear Behavior of Surface Deposit During the 1995 Hyogoken-Nambu Earthquake, Special Issue of Soil and Foundations. JGS., pp.11-22, 1998.
- 13) Shigeru, M., Takaaki, I., Eiji, S., and Numata, A.: Earthquake response evaluation of sites in liquefied area, The Effects of Surface Geology on Seismic Motion Vol.3, pp.1471-1478, 1998.
- 14) 三輪滋,池田隆明,綾部孝之,長谷川昌弘：2000 年鳥取県西部地震における境港市の近接した 3 地点の地震時挙動

- の比較, 第 36 回地盤工学研究発表会講演集, pp.2339-2340, 2001.6.
- 15) 森伸一郎, 圓井洋介, 盛川仁, 河原莊一郎, 向谷光彦: 2000 年鳥取県西部地震におけるアンケート震度調査, 第 26 回地震工学研究発表会講演論文集, pp.361-364, 2001.8.
 - 16) 嶋本栄治, 沼田淳紀, 染谷昇, 三輪滋, 池田隆明, 大野孝二: 2000 年鳥取県西部地震における液状化, 第 36 回地盤工学研究発表会講演集, pp.2149-2150, 2001.6.
 - 17) Holzer, T. L., Youd, T. L., and Hanks, T. C.: Dynamics of Liquefaction during the 1987 Superstition Hills, California Earthquake, Science, Vol.244, pp56-59, 1989.4.
 - 18) Iai, S., Morita, T., Kameoka, T., Matsunaga, Y., and Abiko, K.: Response of a dense sand deposit during 1993 Kushiro-Oki Earthquake, Soil and Foundation, Vol.35, No.1, pp.115-131, 1995.3.
 - 19) 三輪滋, 池田隆明: 液状化の発生した地盤の地震時挙動に関する検討, 第 25 回地震工学研究発表会講演論文集, pp.333-336, 1999.7.
 - 20) 中国地方基礎地盤研究会: 山陰臨海平野地盤図 '95, 1999.11.
 - 21) 盛川仁, 吉川大智, 赤松純平, 西田良平, 野口竜也: 鳥取県西部地震の余震記録に基づく弓ヶ浜半島の基盤構造の推定, 第 26 回地震工学研究発表会講演論文集, pp.353-356, 2001.8.
 - 22) 一井康二, 佐藤幸博, 佐藤陽子, 星野裕子, 井合進: 港湾地域強震観測地点資料(その 6), 港湾技研資料 No.0935, 1999.6.
 - 23) (社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 1996.12.
 - 24) 野越三雄, 五十嵐亨: 微動の振動特性(その 2), 地震第 2 輯, 第 24 巻, pp.26-40, 1971.
 - 25) 中村豊, 上野真: 地表面震動の上下成分と水平成分を利用した表層地盤特性推定の試み, 第 7 回日本地震工学シンポジウム講演集, pp.265-270, 1986.
 - 26) 大町達夫, 紺野克昭, 遠藤達哉, 年縄巧: 常時微動の水平動と上下動のスペクトル比を用いる地盤周期推定方法の改良と適用, 土木学会論文集, No.489/ I -27, 251-260, 1994.
 - 27) 若松邦夫, 安井譲: 短周期微動の水平上下スペクトル比による地盤増幅特性評価の可能性に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 471 号, pp.61-70, 1995.5.
 - 28) 三輪滋, 池田隆明, 綾部孝之, 長谷川昌弘: 2000 年鳥取県西部地震における境港市における境港港湾地盤の地震時挙動の検討, 第 36 回地盤工学研究発表会講演集, pp.2165-2166, 2001.6.
 - 29) (社)日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説(上巻), 1999.4.
 - 30) 独立行政法人防災科学研究所: 強震ネットワーク (K-NET), <http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/>
 - 31) 独立行政法人防災科学研究所: 基盤強震観測網 (KiK-net), <http://www.kik.bosai.go.jp/kik/>
 - 32) Schnabel, P. B., Lysmer, J. and Seed, H. B: SHAKE, A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites, Report No.EERC72-12, 1972.12.
 - 33) 杉戸真太, 合田尚義, 増田民夫: 周波数依存性を考慮した等価ひずみによる地盤の地震応答解析法に関する一考察, 土木学会論文集 No493/ II -27, pp49-58, 1994.6.
 - 34) 井合進, 松永康男, 亀岡知弘: Strain Space Plasticity Model for Cyclic Mobility, 港湾技術研究所報告 第 29 巻 第 4 号, 1990.12.
 - 35) 日本建築学会: 建築基礎構造設計指針, 1982.
 - 36) 時松孝二, 吉見吉昭: 細粒分含有率と N 値を用いた液状化判定法と液状化対策, 建築技術, No.420, pp.109-114, 1986.
 - 37) Seed, H. B., I. M. Idriss, and I. Arango: Evaluation of Liquefaction Potential using Field Performance Data, J. GE, ASCE, Vol.109, No.3, PP.458-482, 1983.
 - 38) Yoshimi, Y., K. Tokimatsu and Y. Hosaka: Evaluation of Liquefaction Resistance of Clean Sands based on High-Quality Undisturbed Samples, Soils and Foundations, Vol. 29, No.1, pp.93-104, 1989.
 - 39) 片岡真二, 白石修章, 中山拓: 中国地方の土質工学的諸問題 2. 中国地方の埋立工事, 土と基礎, 38-3(386), pp. 54-58, 1990. 3.
 - 40) 株式会社ジオトップ: 平成 12 年(2000 年)鳥取県西部地震 節杭を用いた建物の調査報告書, 2000.12.
 - 41) 森伸一郎, 沼田淳紀, 境野典夫, 長谷川昌弘: 埋立地の液状化で生じた噴砂の諸特性, 土と基礎, Vol.39, No2, pp.17-22, 1991.2.
 - 42) 森伸一郎, 沼田淳紀: 1993 年北海道南西沖地震におけるシルト質浚渫埋立土層の液状化, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1409-1410, 1994.9.
 - 43) 岩崎敏男, 龍岡文夫, 常田賢一, 安田進: 地震時地盤液状化の程度の予測について, 土と基礎, Vol.28, No4, pp.23-29, 1980.

(2001 年 9 月 14 日受付)