

2000年鳥取県西部地震における液状化と地盤条件

三輪滋¹，池田隆明¹

Shigeru MIWA¹ and Takaaki IKEDA¹

¹ 飛鳥建設技術研究所

2000年鳥取県西部地震では、弓ヶ浜半島を中心に中海沿岸域の干拓地・埋立地や半島先端部の境港市の埋立地において液状化が発生し様々な構造物に被害をもたらした。米子市彦名の埋立地においては本震だけでなく、最大余震でも液状化が発生した。また、1943年鳥取地震、1946年南海地震でも液状化した記録が残されている。境港市では同じ埋立地内でも噴砂の激しかった地点とそうでない地点が見られ、埋立地内でも液状化の程度が異なっていたと考えられる。本研究では、米子市彦名と境港市の2地点について、被害調査や地盤調査、地震動記録などにに基づき地盤条件と液状化、地盤の増幅特性の関係を検討し、液状化・増幅特性が表層地盤条件に大きく影響を受けることを改めて明らかにした。

1. はじめに

2000年10月6日鳥取県西部地震では、中海沿岸域の干拓地・埋立地や境港市の埋立地において各地で液状化が発生し、港湾施設、工業施設、農業施設、住宅など様々な構造物に被害をもたらした¹⁾。その中で特徴的な2地点について取り上げる。

米子市の中海に面した海岸埋立地でも各地で液状化が発生した。特に、米子市彦名の埋立地においては、本震で液状化が発生しただけでなく、最大余震でも液状化が発生した。また、この地点は、1943年鳥取地震、1946年南海地震でも、震源が遠く米子市の気象庁震度が3であったにも関わらず、液状化した記録が残されている²⁾。

境港市港湾地域の埋立地で液状化が発生し、岸壁や建物などに被害をもたらした¹⁾。境港市東部の昭和町は昭和42年以降の埋立地であり、多くの地点で液状化が発生した¹⁾³⁾。この埋立地内の港湾強震観測網境港観測点⁴⁾において、液状化の影響を受けたと考えられる地震動記録⁵⁾が得られた。地震観測地点周囲の建物も周囲に沈下は見られるものの噴砂は見られなかったこと、埋立地内では噴砂の激しかった地点とそうでない地点が見られたことなどから、埋立地内でも液状化の程度が異なっていたと考えられる。また、同じ境港市内の近接した3つの地域で異なった地震動が観測され、それぞれの地域で見られた異なった被害状況と調和的な関係が得られている。いずれの観測点も1km以内の距離にあり、表層地盤構造の違いが地震動に影響を及ぼしたのと考えられる。

本研究では、米子市彦名と境港市の2地点について、被害調査や地盤調査、地震動記録などにに基づき地盤条件と液状化、地盤の増幅特性の関係を検討した。米子市彦名では被害地点の地盤調査と米子市で観測された地震動をもとにして、今回の地震における地盤の地震時挙動を検討し、表層の砂層は非常に軟弱であり、今回観測された最大余震の地震動レベルでも再液状化が発生する可能性が大きいことを明らかにした。また、半島内の砂丘地点の地盤条件との違いを明らかにした。境港では、液状

化の生じた埋立地内での液状化に関して地震動や地盤条件を基に、液状化の程度と地盤条件の関係を明らかにした。また、境港市の被害状況の違いを、地震動や表層地盤条件の違いに着目し、表層増幅特性の違いが地震動および地震被害におよぼす影響を明らかにした。

2. 米子市彦名の液状化と地盤条件

(1) 中海沿岸の地震被害

米子市彦名は米子港の北西側から彦名干拓地にかけての中海に面した地域を指し、江戸時代以降の新田開発に始まり、最近まで行われた埋立地による、非常に新しい表層地盤を有する地域である。図-1に示すように、2000年鳥取県西部地震の際には、この地域内の多くの地点で液状化が生じた。特に、粟島神社から米子市下水処理場にかけての海岸沿いの地域はほぼ全域で液状化が発生し、南東端の安部彦名団地では、小河川での護岸の移動による川幅減少・大量の砂の噴出と底盤浮上、木造住宅の沈下・傾斜、中層RC住宅の周囲の沈下、水道管の破損などの被害が発生した。また、団地と粟島神社の間の空き地

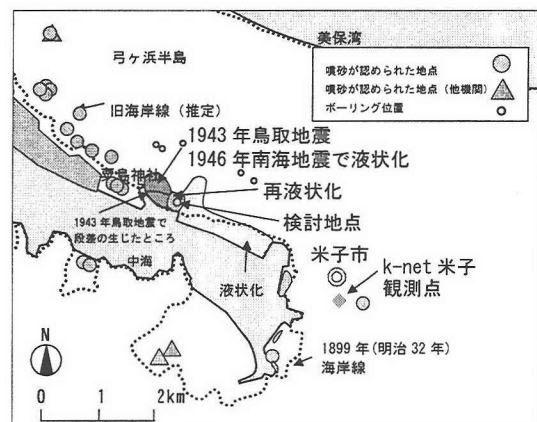


図-1 米子市彦名周辺の液状化地点

や農地では、いたるところで噴砂が生じ、畑の沈下や水田が噴砂で埋まる現象が見られた。この地点の一部では10月6日13時30分の本震で液状化が発生しただけでなく、10月8日20時51分の最大余震(Mj=5.0)でも噴砂・噴水が生じ、液状化の発生が確認された。また、再液状化地点の西側の農地一帯においては、震源距離が71kmの1943年鳥取地震(Mj=7.3)、343kmの1946年南海地震(Mj=8.0)で、米子市の気象庁震度階がIVであるにもかかわらず液状化し、今回の地震同様に畑の沈下や水田が噴砂で埋まったという記録がある²⁾。今回の地震における聞き取り調査において、その地域をほぼ特定することができた。図-1にその地域をあわせて示すが、その地域は今回の地震でもやはり液状化した。また今回の地震で再液状化した地点はその南東に隣接し、当時は湿地であったとのことである。

(2) 弓ヶ浜半島の中海沿岸および砂丘部分の地盤条件

彦名の液状化および再液状化が発生した地点において、スウェーデン式サウンディングによって、表層地盤の調査を行った。稲田の式⁶⁾で換算したN値を図-2に示す。また周辺の地盤調査結果をあわせて図-2に示す。G.L.-6m付近まではN値が0~2程度、G.L.-10m付近までN値5前後の非常に緩い砂が堆積している。さらにG.L.-15mまでは軟弱粘性土が堆積する。周辺の地盤調査(文献7)などからN値の違いはあるものの、表層に砂層が堆積する地盤構造が確認でき、さらにG.L.-18mまでが粘性土、それ以深は粘土と砂の互層が続き50m付近でN値50以上が連続する工学的基盤が現れると考えられる。図-3に噴砂の粒径加積曲線(文献8)の図に加筆)を示す。再液状化が確認された地点の噴砂の細粒分含有率は2.5%以下で非常に小さく、均等係数も1.5~1.7と小さい均一な砂である。この砂が緩く堆積しているため非常に液状化しやすい砂層であると考えられる。近傍の水田では細粒分がや

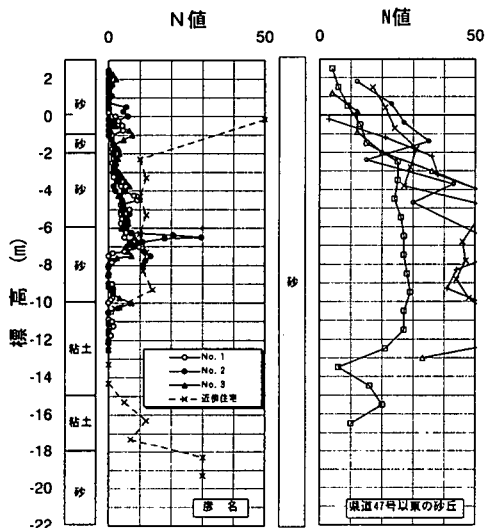


図-2 彦名検討地点でのスウェーデン式サウンディングの結果および近傍の地盤調査結果

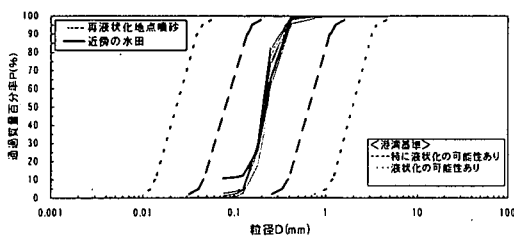


図-3 噴砂の粒径加積曲線

や高いが、ほぼ同様な粒度分布である。一方、国道47号より東側の砂丘と考えられる地点は、N値の大きな締まった砂が堆積しており、沿岸埋立て地とは対照的である。

(3) 地盤挙動の検討

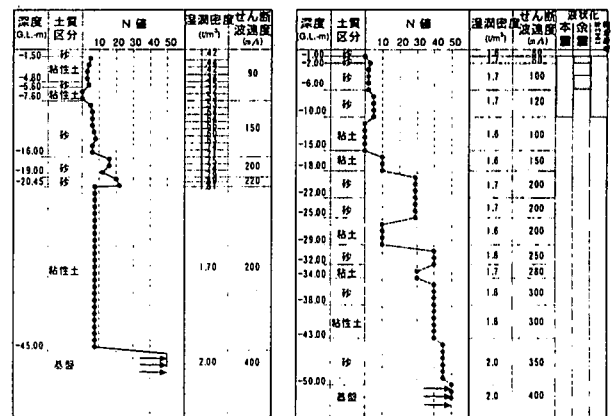
この地点でどの程度の地震動が生じたかを評価するために、検討地点から約3.2km離れたK-net米子⁹⁾で観測された地震動を用いて検討した。K-net米子の本震・最大余震記録から工学的基盤の地震動を推定し、検討地点で地震応答解析を行うことでその挙動を評価した。解析には等価線形解析法¹⁰⁾を用いた。K-netおよび彦名検討地点の地盤モデルはその地点の地盤調査結果¹¹⁾および周辺の地盤調査結果⁷⁾から設定した。それらを図-4に示す。図-5(a)、図-6(a)にそれぞれK-net米子で観測された地表面の地震動加速度時刻歴及び加速度応答スペクトル(減衰定数5%,トリプル表示)を工学的基盤のそれとあわせて示す。K-net米子においては本震で約380cm/s²、余震で約100cm/s²の地震動を観測している。それぞれ計測震度は5強および4である。

図-5(b)、図-6(b)に工学的基盤の波形を用いて検討地点で実施した応答解析の地表面加速度および応答スペクトルを示す。液状化した層のせん断剛性を低下させた線形解析¹²⁾の結果も図-5(b)、図-6(b)にあわせて示す。液状化によりK-net米子に比べ長周期成分の卓越した地震動が作用したと考えられる。

(4) 地盤条件と液状化の関係

この地点で発生した液状化の程度を評価するために、観測・解析で得られた最大加速度および最大せん断応力を用いて液状化判定を行った。液状化判定の方法は建築基礎構造設計指針の方法¹³⁾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本震ではM=7.3、余震ではM=5.0とした。その他の地点については、彦名地点の応答を参考に、最大加速度を本震で300cm/s²、余震で100cm/s²として検討した。

図-4,7に判定結果を示す。本震においては、埋立て地は10m以浅の砂層のほぼ全層が液状化する。また余震においても、地点によってはG.L.-1m~2m、G.L.-4m~6mの非常に緩い砂層が部分的に液状化したと推定される。本震において、液状化した表層砂層が相対密度40~50%程度の砂層と仮定し、石原の方法¹⁴⁾で推定すると体積ひずみで3.5~4.5%程度であり、沈下量にして35~45cm程度となるが、近接する農地の沈下量が最大で30~35cm程度であったこと、同じく近接する杭基礎RC住宅の周辺地盤の沈下が25~30cm程度¹⁾であったこととほぼ対応し、



(a) K-net 米子

(b) 彦名検討地点

図-4 K-net 米子と彦名検討地点の地盤モデル

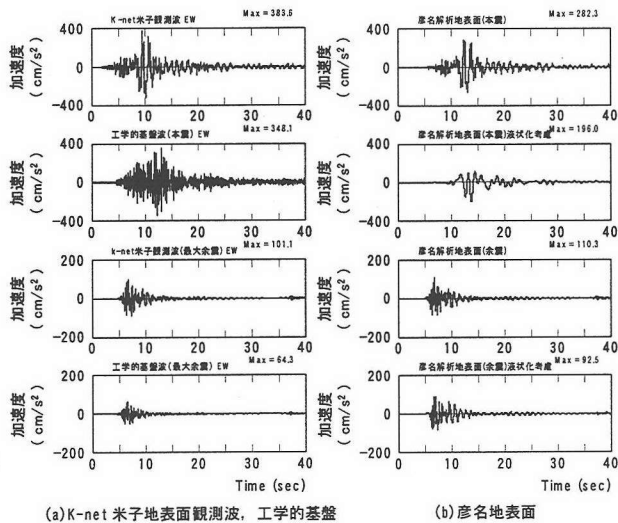


図-5 観測と解析で得られた加速度時刻歴

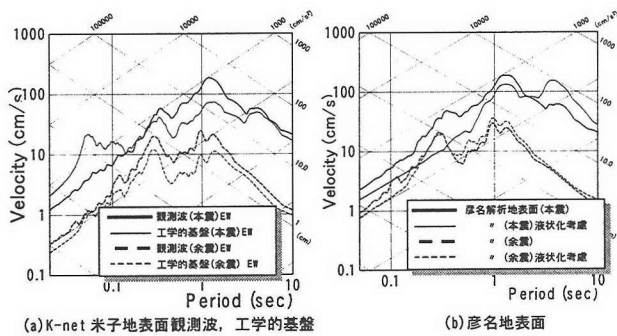


図-6 加速度応答スペクトル(減衰定数: $h=5\%$)

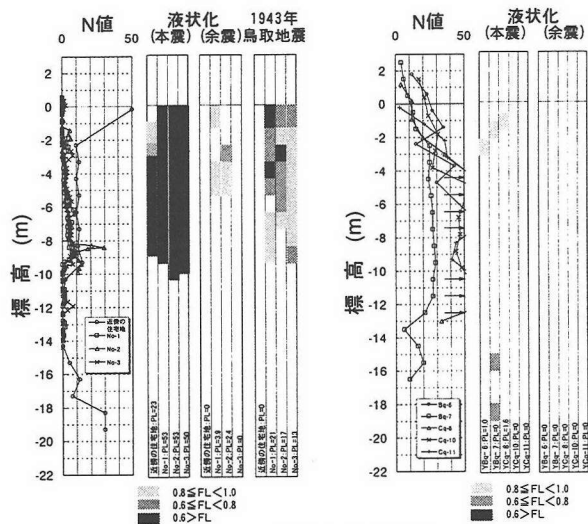


図-7 液状化判定結果

本震での液状化の状況を評価できたものと考えられる。また、余震では再液状化は発生したものの範囲が限定的であったことについても評価できたと考えられる。一方、内陸側の地点ではほとんど液状化は発生しない。N値の低い部分で部分的にFLが1.0以下となる層もあるが限定的であり、かりに発生していても地表への影響はほとんどなかったと考えられる。N値分布には違いがあるものの、このような地盤の堆積状況は、検討地点から米子港にかけての中海側ではほぼ同様であり、沿岸埋立地で液状化が発生し、内陸砂丘地では液状化が発生していないことと調和的である。

1943年鳥取地震、1946年南海地震に関しては米子市

の震度階Ⅳという記録のみで地震動記録が存在しない。震度Ⅳがおおむね $25\sim 80\text{cm/s}^2$ にあたること、および鳥取県西部地震の余震で震度階Ⅳの米子で 100cm/s^2 程度の記録が得られていることから地表面加速度を 100cm/s^2 として、同様の液状化判定を行った。結果を図-4,7 にあわせて示す。鳥取地震では、余震と地震動の最大値は同程度であるが、マグニチュードが大きくせん断応力の繰り返し回数に違いがあるために液状化の程度に違いが生じ、今回の本震と同様に表層部がほぼ全層液状化したと推定される。聞き取り調査によれば、埋立年代の違いから海岸線に平行なある線に沿って数十 cm の段差が生じ、かつ水田や畑に数十 cm の沈下あるいは隆起が生じたとのことで、検討結果は地震動強度が明確ではないにせよ、当時の被害状況をほぼ説明するものと考えられる。

(5)まとめ

- 2000年鳥取県西部地震で米子市彦名の埋立地では本震で液状化、10月8日の最大余震で部分的に再液状化が生じた。
- 地盤調査からこの地点は表層約6mがN値0~2、10mまでがN値5程度の非常に緩い砂層であることを確認した。
- 米子市で観測された地震動記録を用いた検討により、本震では表層10mの砂層全層が、余震ではG.L.-1m~6mまでの層のうち、特に緩い層が液状化したと推定される。また、内陸部では液状化が発生しなかったと推定される。これらの結果は被害調査から得られた被害状況と調和的である。
- 周辺農地は1943年鳥取地震、1946年南海地震でも液状化したが、被害状況および液状化判定から表層約10mの砂層がほぼ全層液状化したと推定される。

3. 境港市港湾地盤の地盤条件と液状化の関係

(1) 境港市昭和町埋立地の地震被害

境港市港湾地域の埋立地においても液状化が発生し、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年以降の埋立地であり、竹内団地は1978~1986年にかけての埋立地であり、多くの地点で液状化が発生した^{1),3)}。図-8には埋立地の境界と考えられる1899年の海岸線、および昭和町、竹内団地の埋立地で噴砂が確認された地点を示す。港湾地域内には港湾強震観測網の観測点があり記録が得られた⁵⁾。観測点と同じ埋立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、観測された記録は、液状化あるいは間隙水圧の上昇の影響を受けたものと推定される。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される。また北側岸壁で地盤改良が行われた地点¹⁵⁾では被害は見られない。このように、昭和町の埋立地内においても、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液状化の影響と見られる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。

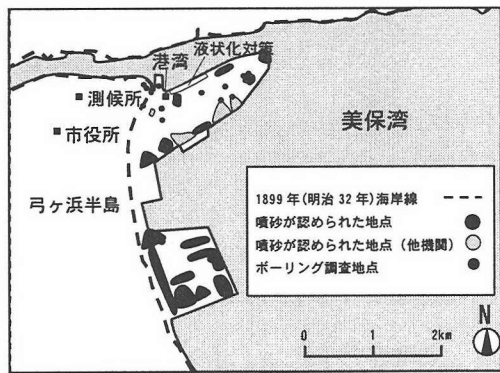
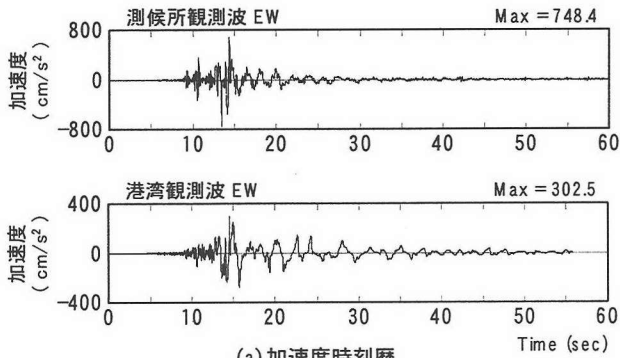
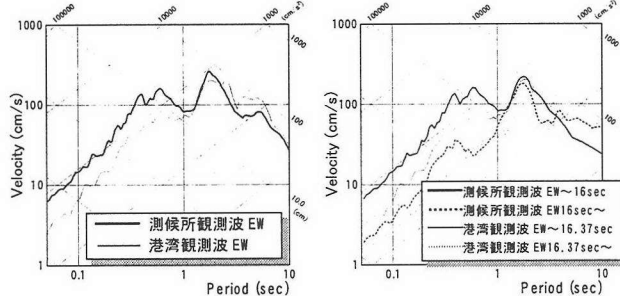


図-8 境港市の東部埋立地の液状化地点



(a) 加速度時刻歴



(b) 加速度応答スペクトル (減衰定数:h=5%)

(c) 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 (減衰定数:h=5%)

図-9 観測された地震動の比較

(2) 地震動記録の比較

図-9 に境港市で得られた地震動記録を比較して示す。約 1.3km 離れた市街地内の気象庁境港測候所の記録¹⁷⁾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、港湾観測点の記録は、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^{18),19),20)}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(h=5%)を測候所と港湾とで比較して図-9 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ですが、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。

(3) 境港市昭和町埋立地の地盤条件

図-10 に港湾観測点の地盤柱状図を示す。表層約 12m に埋立て砂層が存在し、その下に 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。

昭和町と竹内団地に関して液状化地点が示された図-8 に地盤柱状図が得られたボーリング調査地点をあわせて示す。北側の岸壁の一部は地盤調査後に液状化対策がなされている¹⁵⁾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^{4),7),8),21)}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-11 に示す。図-11 の各柱状図の No. は図-8 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こ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。

図-12 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ややはり 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

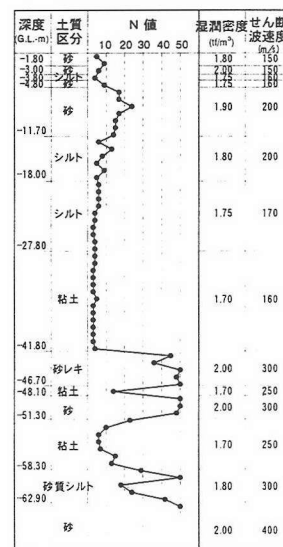


図-10 港湾地震観測点の地盤構造

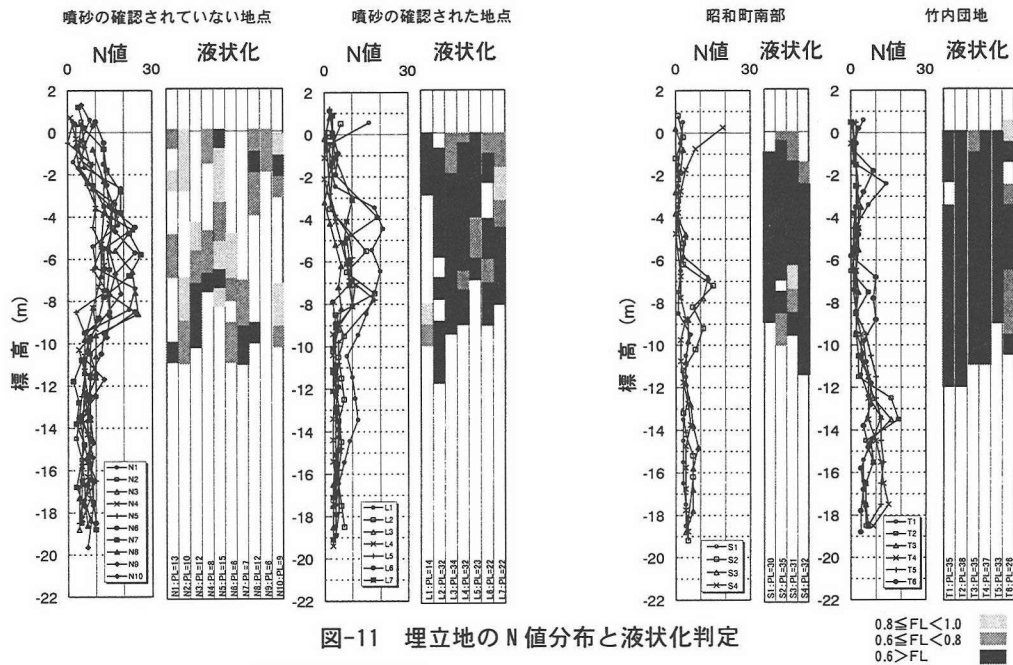


図-11 埋立地のN値分布と液状化判定

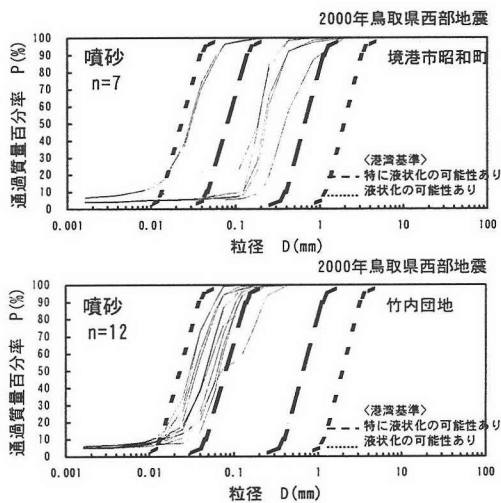


図-12 噴砂の粒径加積曲線

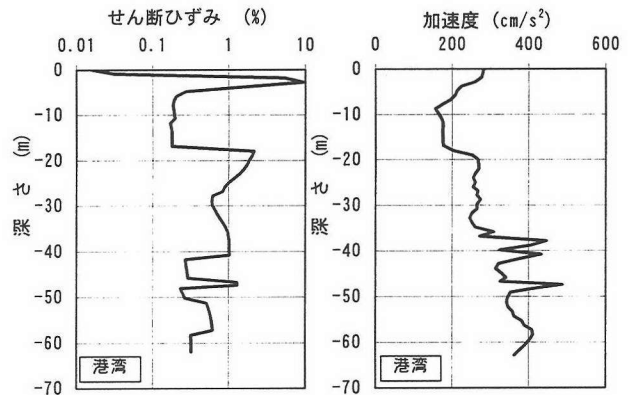


図-13 港湾地盤の応答解析の最大応答値分布

土分含有率は10%以下で非塑性である⁸⁾。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^{22), 23)}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。

(4) 地盤条件と液状化の関係

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/s²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 PL²⁴⁾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¹³⁾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-11 に結果をあわせて示す。

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

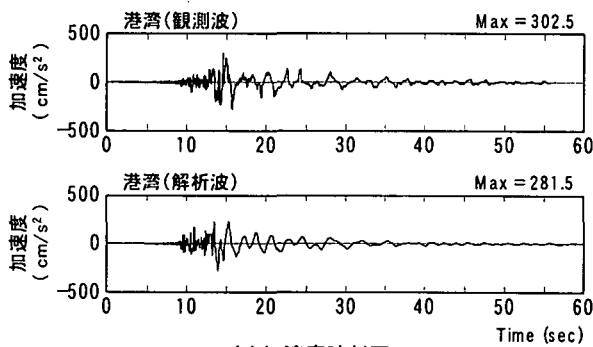
が比較的薄く、また表層部に非液状化層が存在する場合が多い。また FL 値も 0.6 以上がほとんどで、PL も 15 以下である。昭和町南部や竹内団地のシルトは、粘土含有率が低く非塑性なシルトであることから液状化の検討対象とし細粒分による N 値増加は 9 以下（細粒分 30% 相当）とした。その結果、激しい液状化の発生が予測されたが、これは細粒分の多い噴砂の大量の噴出と調和的である。これらの地点の場合、FL<0.6 の層が厚く、PL≥20 の地点ではかなりの噴砂が見られ、ほとんどの層で FL>0.6 で、PL≤15 では沈下があっても噴砂は見られないという区分ができた。

鳥取県西部地震の際には、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。

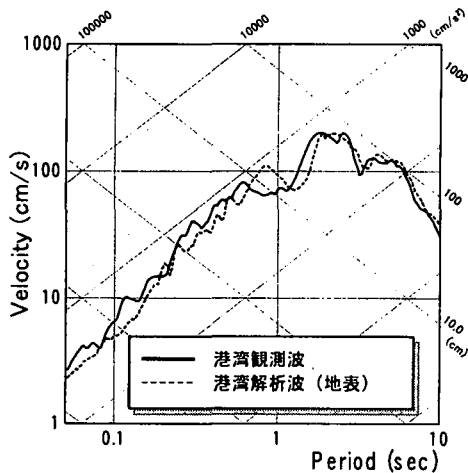
(5) 港湾観測点での地盤の挙動

港湾観測点での地盤の挙動を評価するために、地盤の応答解析を実施した¹⁶⁾。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²⁵⁾を用いた。地盤モデルは図-10に示したものをを用いた。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²⁶⁾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。建築設計指針¹³⁾に示された吉見・時松の方法²⁷⁾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⁸⁾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²⁸⁾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²⁹⁾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。入力地震動は、測候所で観測された波形を、港湾と同等の工学的基盤層まで引きもどしたものをを用いた¹⁶⁾。

図-13に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。G.L.-18~-41.8mのシルト層、粘土層でのひずみが大きいに加え、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



(a) 加速度時刻歴



(b) 加速度応答スペクトル (減衰定数: h=5%)

図-14 観測と応答解析の地震動の比較

表-1 港湾の埋立層の液状化パラメータ

震度	RI15	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

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/s²となる。図-14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%)を観測記録とあわせて示す。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。

(6) 液状化判定との関係

液状化判定の方法では、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判断する。

有効応力解析¹⁶⁾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-15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-4m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G.L.-6mで1.3倍、G.L.-12m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。

G.L.-5m以深でせん断応力が有効応力解析で得られた

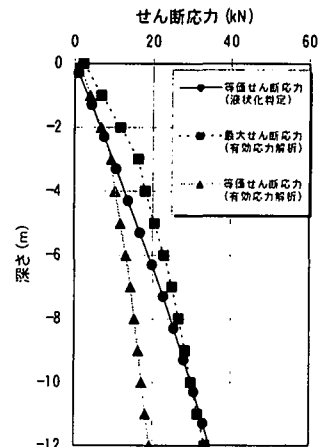


図-15 港湾観測点でのせん断応力の比較

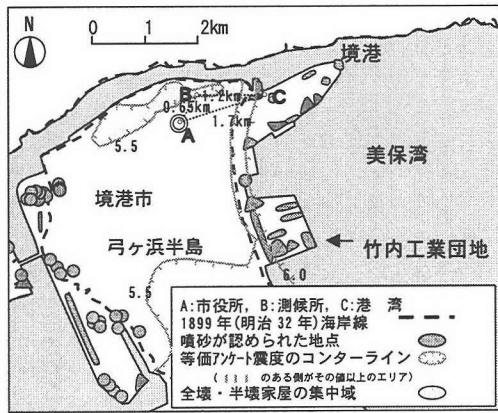


図-16 地震観測点と被害家屋の分布，アンケート震度の分布 文献16)の図-1に文献29)の図-5を参考に加筆，修正)

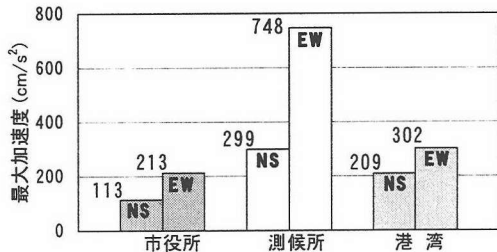


図-17 最大加速度の比較

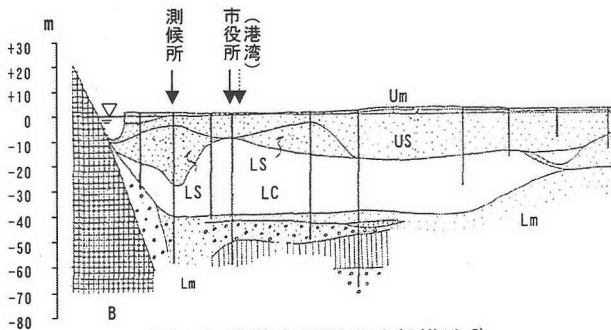


図-18 境港市付近の地盤構造⁷⁾

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、被害状況とをよりよく説明できる。

(7) 周辺の被害と地盤条件、地震動増幅の関係

境港市は、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が、埋立て地域の液状化だけでなく、地域によりさまざまな被害形態が見られ、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⁾。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。

森ら³⁰⁾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。埋立て地域においても等価アンケート震度が6強と大きく、液状化に関して体感のゆれが大きかったことが報告されている。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^{3),5),30)}。図-16に地

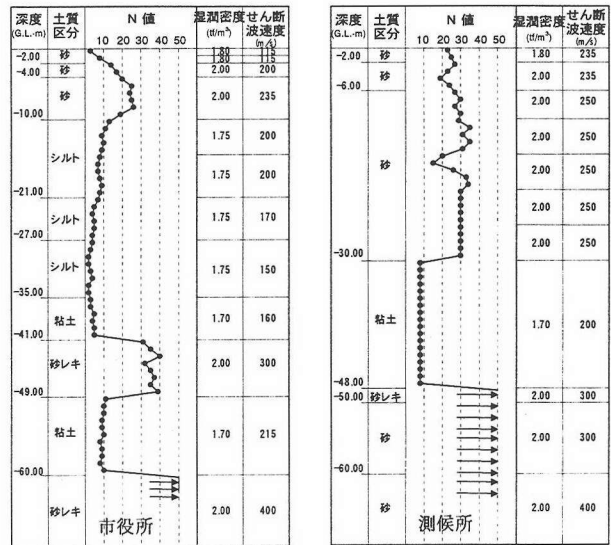


図-19 各観測点の地盤構造

震計の設置されている境港市役所、測候所、港湾観測点、液状化地点の分布に加えて、文献30)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。港湾は測候所とは1,200m、市役所とは1,700mの距離にある。これらの観測点のうち、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た。図-17に3地点で得られた最大加速度を比較して示す。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/s²であるのに対し、測候所では748cm/s²、港湾では302cm/s²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り、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と推定される。

図-18にこの付近の地盤構造を示す⁷⁾。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。この地域の比較的深いボーリング調査結果^{4),7)}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られるのは、G.L.-60m付近である。図-19にそれぞれの観測点および近傍の地盤柱状図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。このような軟弱層の厚さの違いが地震動増幅に影響を及ぼしたと考えられる。また、前述のように港湾地域では液状化が発生している。別途実施した応答解析結果¹⁶⁾からも、その違いが確認されており、比較的狭い範囲でも表層地盤

地盤条件の違いでその地震時挙動が大きく影響を受けることが改めて明らかとなった。

(8)まとめ

a)2000年鳥取県西部地震では境港市の埋立て地盤で液状化が発生した。それぞれの地点における液状化の有無や程度の違いおよび被害状況は、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、液状化評価とよい対応を示した。

b)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。

c)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/s²から700cm/s²と3倍以上、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。地震動の違いは、家屋の被害程度や液状化の発生状況、それぞれの地点の地盤条件と調和的な関係が見られた。

4. 結論

2000年鳥取県西部地震の米子市彦名、境港市の被害の分析から明らかになったことはそれぞれのまとめで示したが以下に要約する。

a)2000年鳥取県西部地震で米子市彦名の埋立地では本震で液状化、10月8日の最大余震で部分的に再液状化が生じた。また、境港市の埋立て地盤でも液状化が発生した。

b)それぞれの地点における液状化の有無や程度の違いおよび被害状況は、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、液状化評価とよい対応を示した。

d)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、表層地盤構造が地震動増幅特性やその結果生じる被害におよぼす影響が大きいことがわかった。

謝辞：本検討では防災科学技術研究所のK-net米子、港湾技術研究所境港観測地点および気象庁境港測候所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。また被害調査では沼田淳紀氏、嶋本栄治氏、大野孝二氏、データ分析では綾部孝之氏、染谷昇氏、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) 飛鳥建設技術研究所：2000年10月6日鳥取県西部地震被害調査報告, 2000.10.
- 2) 松浦誠, 芳賀保夫：鳥取県弓ヶ浜半島の砂地盤(その1),第14回土質工学研究発表会, pp.121-124,1979.6.
- 3) (社)土木工学会 鳥取県西部地震被害調査団：<http://www.jsce.or.jp/report/index.html>
- 4) 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.
- 5) 港湾空港技術研究所：<http://www.eq.ysk.nilim.go.jp>
- 6) 稲田倍徳：スウェーデン式サウンディング試験結果の使用について, 土と基礎, Vol.8, No.1, pp.13-18, 1960.
- 7) 中国地方基礎地盤研究会：山陰臨海平野地盤図'95, 1999.11.
- 8) 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, pp.1249-1250, 2001.6.
- 9) 防災科学技術研究所：強震観測網(K-net), <http://www.k-net.bosai.go.jp>
- 10) Schnabel,P.B.,Lysmer,J.,Seed,H.B:SHAKE, A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites,Roport No.EERC 72-12, 1972.12.
- 11) 三輪滋, 池田隆明, 大野孝二：2000年鳥取県西部地震における米子市の軟弱埋立地盤の地震時挙動の検討, 第36回地盤工学研究発表会, pp.2163-2164, 2001.6.
- 12) 三輪滋,池田隆明：等価線形解析による液状化した埋立地盤の地震時挙動の評価, 土木学会第54回年次学術講演会,1部門, pp. 194-195, 1999. 9.
- 13) 日本建築学会：建築基礎構造設計, 1982.5.
- 14) Ishihara, K. and Yoshimine, M. : EVALUTION OF SETTLEMENTS IN SAND DEPOSITS FOLLOWING LIQUEFACTION DURING EARTHQUAKES, SOILS AND FOUNDATIONS, Vol.32, No.1, 173-188, 1992.5.
- 15) 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.
- 16) 三輪滋,池田隆明, 沼田淳紀, 綾部孝之：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, 構造工学論文集, pp.445-455, 2002.4.
- 17) 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.
- 18) 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.
- 19) 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.
- 20) 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.
- 21) 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.
- 22) 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, 1993.3.
- 23) 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液状埋立土層の液状化, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1409-1410, 1994.9.
- 24) 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.
- 25) 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.
- 26) (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.
- 27) 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.
- 28) 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.
- 29) Yoshimi, Y., K. Tokimatsu and Y. Hosaka: Evaluation of Liquefaction Resistance of Clean Sands based n High-Quality Undisturbed Samples, Soils and Foundations, Vol. 29, No.1, pp.93-104, 1989.
- 30) 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.