

# 平成13年芸予地震による広島県沿岸部の液状化

佐々木 康<sup>1</sup>・加納誠二<sup>2</sup>

<sup>1</sup>フェロー会員 工博 広島大学大学院教授 工学研究科 (〒739-8527 東広島市鏡山一丁目4-1)

<sup>2</sup>正会員 修(工) 広島大学大学院助手 工学研究科 (〒739-8527 東広島市鏡山一丁目4-1)

平成13年3月24日安芸灘を震源とするマグニチュード6.7の芸予地震が発生し、広島県を中心に広範囲にわたって強い揺れが観測された。広島市は太田川デルタに位置し、市街地の多くは1600年代以降埋め立てによって作られており、地下水位が高く、地盤がゆるいなど液状化の危険性が高い地域である。著者らは地震後ただちに広島市や呉市を中心に、液状化被害について調査した。その結果、広島デルタ内では地震動が小さく、液状化による噴砂は比較的新しい埋立地で確認されたが、周辺の建物や護岸、埋設管等の顕著な構造物被害は少なかった。今後液状化判定に用いる深さ方向の低減係数 $r_d$ の設定法について吟味が必要であると考えられる。

**Key Words :** Earthquake, Strong motion records, Ground motion, Liquefaction, Reclamation

## 1. はじめに

平成13年3月24日15時28分頃安芸灘を震源とするマグニチュード $M_j 6.7$ の地震が発生し、広島県賀茂郡河内町、豊田郡大崎町、安芸郡熊野町で震度6弱を記録したほか、広島県や愛媛県、山口県などで震度5強を記録し、広島県や愛媛県を中心に多数の被害が発生した。

この地方では、過去には1625年、1649年、1686年、1733年、1857年、1905年、1949年に被害地震が発生しており<sup>1)</sup>、その中で1905年には今回の地震が発生した安芸灘付近に震源を持つマグニチュード $7\frac{1}{4}$ の芸予地震が発生し、広島県や愛媛県で被害が出ている。

今回の地震は四国沖から沈み込んだフィリピン海プレート先端部で発生したとされている<sup>2)</sup>。

表-1に今回の地震の諸元を示す。

消防庁がまとめた平成13年5月2日19時30分現在の被害状況<sup>3)</sup>によれば死者2名、負傷者288名、一部損壊を含めた破壊した家屋数は、35,258棟にも及んだ。

表-1 平成13年芸予地震の諸元

発生時刻	平成13年3月24日15時28分頃
震源位置	東経132度42.5分 北緯 34度7.2
震源深さ	約51Km
規模	マグニチュード $M_j 6.7$
最大震度	6弱 (広島県賀茂郡河内町, 豊田郡大崎町, 安芸郡熊野町)

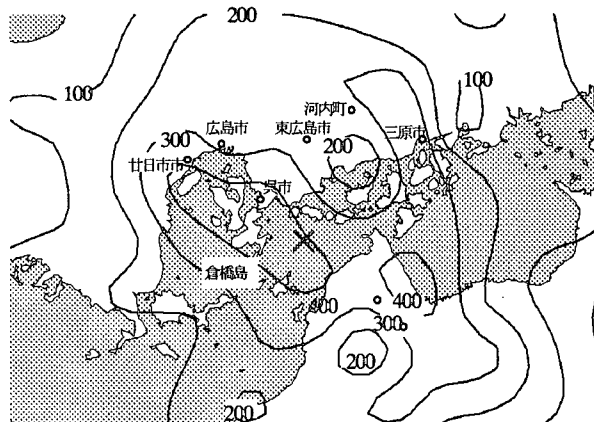


図-1 K-netの観測記録から作成した最大加速度分布

## 2. 地震動の記録

図-1はk-netの強震観測地点およびそこでの強震記録から求めた中・四国地方の最大加速度コンターを示す。ここで湯来の最大加速度は、観測記録などを再度検討して見る必要があるため、コンターを描くときには利用していない。

これをみると地震の揺れは広島県安芸郡江田島町周辺を中心に、北北西から南南東にかけて広がっていることがわかる。また広島県東部の三原市から河内町にかけても地震動が大きい地域があることがわかる。

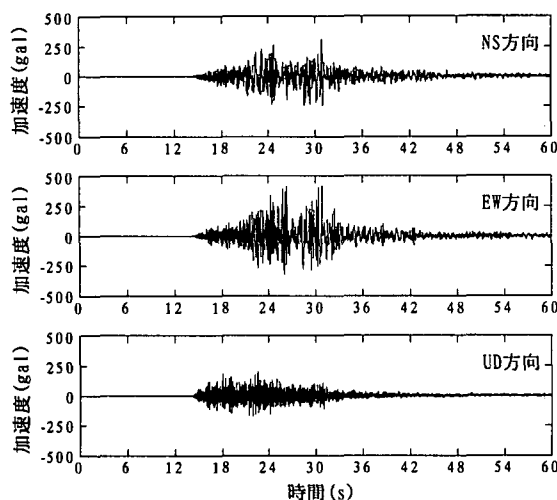


図-2 呉市で観測した強震記録

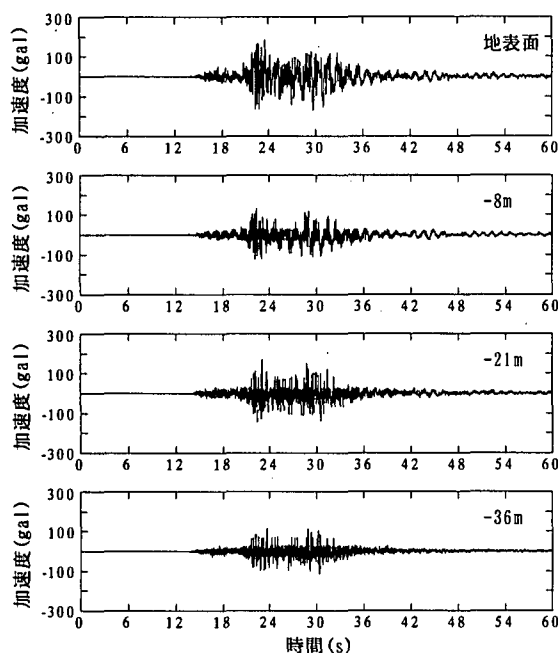


図-3 消防航空隊基地での鉛直アレー観測記録(NS)

図-2は、呉市で観測された強震記録である。

広島市は平成11年4月から市内8カ所に地震計(トリガレベル1.5gal, 遅延時間15秒)を設置し、地震時には観測された地震動をもとに市内の被害を推定し、救急の初動体制の決定に利用する地震情報ネットワークシステムの運用を行っている<sup>4)</sup>。地震計は広島デルタを中心に設置されており、デルタ南端の美の里公園、消防航空隊基地、矢野新町公園には間隙水圧計が設置されている。また消防航空隊基地では鉛直アレー観測も行われている。

消防航空隊基地は太田川放水路に面した広島西飛行場内にあり、デルタの南端に位置している。ここでは約34m程度の軟弱層が堆積しており、強震計は-36m, -21m, -8m, 0mの位置に設置されており、間隙水圧計は-5.8mの位置に設置されている。

図-3は、消防航空隊基地で観測された加速度記録を深

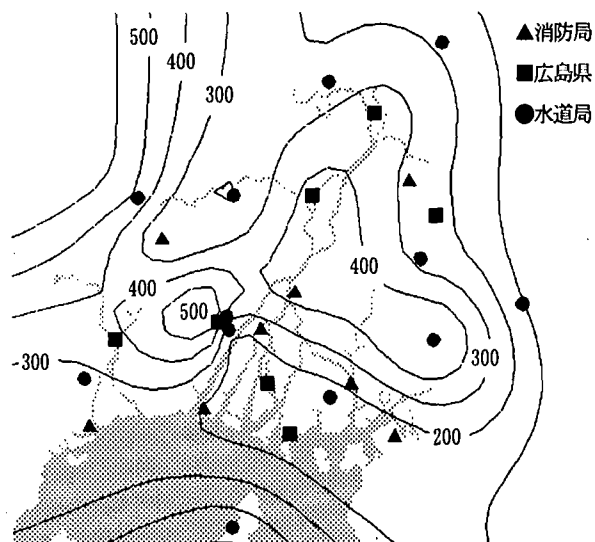


図-4 広島市内の最大加速度コンター

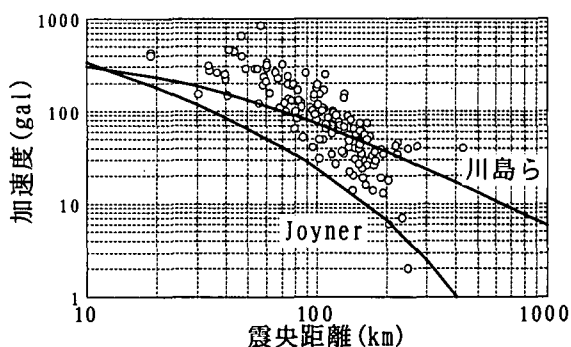


図-5 地震動の距離減衰

度毎に示す。この図を見ると地震動は観測開始後約23秒後に第1度目のピークが到達し、8秒遅れて約30秒付近で2度目のピークが見られる。

広島市内の強震記録については、他に広島県管理の観測所8箇所と広島市水道局の観測記録が得られている。図-4には、広島市地震情報ネットワークとこれらの最大加速度をもとに広島市内の加速度コンターを描く。これよりデルタ内部は揺れが小さく、幸運にも液状化被害が小さくなったと考えられる。

図-5は広島市地震情報ネットワークシステムの観測記録とk-netの観測記録を用いた距離減衰を示す。なお図には川島らの距離減衰式<sup>5)</sup>やJoyner & Booreの距離減衰式<sup>6)</sup>の計算結果も示している。ここでJoynerらの式は、震央距離ではなく、断層距離を用いているが、震源が断層の北端であり、誤差が少ないと考えられることから震央距離を用いている。この図を見ると傾向は似ているが、若干上側にシフトしている様に見られる。またk-netの湯来の記録は、上側に大きく外れている事がわかる。

ここで消防航空隊基地での鉛直アレー記録をもとに、地表面最大加速度と各深度での最大加速度の比を求めると図-6のようになる。

また図-7に消防航空隊基地での深度別のNS方向成分

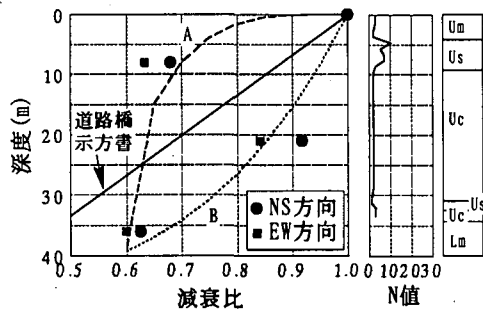


図-6 地中での地震動の減衰

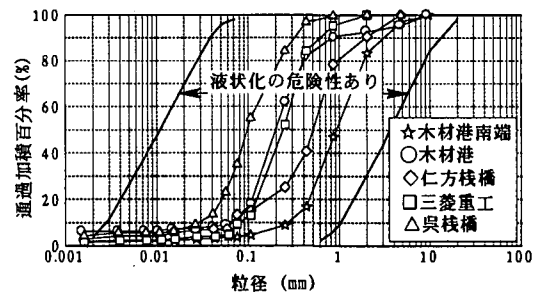


図-10 噴砂の粒度分布

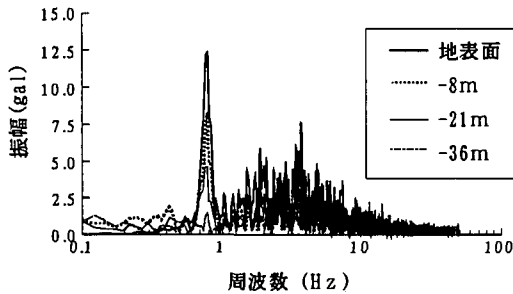


図-7 NS方向のフーリエスペクトル

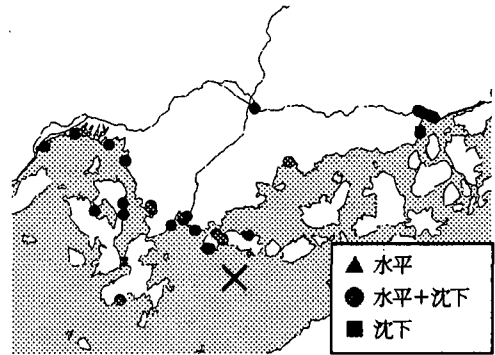


図-10 護岸の被害箇所分布

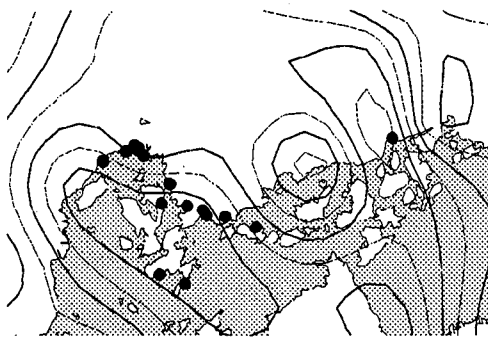


図-8 噴砂確認地点

の加速度フーリエスペクトルを示す。これより 0.7~0.8Hz 付近で増幅されているが、高周波数領域ではあまり増幅されていないことがわかる。

### 3. 噴砂確認地点と液状化判定

図-8には、著者らが直接確認した噴砂地点の分布を示す。この図から噴砂は地震動の大きかった地域で起きていることがわかる。しかし地盤がゆるく堆積し、地下水が高いなど液状化の危険性が高いと思われる広島デルタ内では余り噴砂が発生していない。先に示した消防航空隊基地でも噴砂が見られなかった。

図-9に採取した噴砂の粒度分布を示す。これより噴砂は通常液状化の危険性が高いとされる範囲にあることが分かる。

次に図-10は著者らの調査で確認した護岸の被害を護岸の水平変位と沈下に分けて、その分布を示したものである。これから明らかなように被害のあった護岸では水

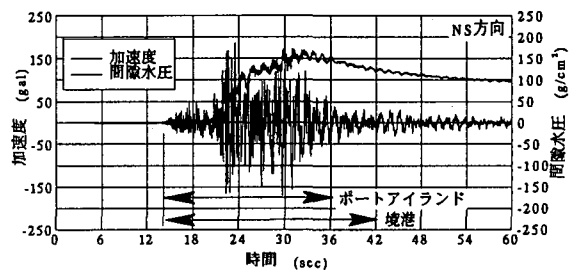


図-11 間隙水圧と加速度の時刻歴

平変位が鉛直変位よりも卓越していることが分かった。現地調査結果を検討すると地盤がゆるく堆積し、地下水が高いなど液状化の危険性が高いと思われる広島デルタ内で顕著な噴砂が少なかったことが分かった。

そこで広島デルタ内ではなぜ噴砂が少なかったかを消防局航空隊基地で観測された強震記録や間隙水圧記録から検討してみる。

消防航空隊基地で観測された加速度と過剰間隙水圧の時刻歴を図-11に示す。この図に示した様に、過剰間隙水圧は主要動が始まった直後から急激に上昇しはじめ、最大加速度の出た付近で8kPa程度発生し、その後最大16kPa付近まで緩やかに間隙水圧が上昇しているが、主要動が収まり始めると、まだ揺れがあるにもかかわらず、間隙水圧も減少し始めている。この地点の間隙水圧比は約30%程度である。

ここで、第1ピークと第2ピーク付近の間隙水圧の挙動を見ると、明かに第1ピーク付近での間隙水圧の上昇量が大きく、第2ピークでは余り間隙水圧が上昇していない。この理由として、地盤の透水性が高く、すでに第2ピーク付近では排水が始まっていた可能性が考えられ

表-2 液状化判定結果

中央深度	土質	N値	$F_L$			
			Type I	Type II	A曲線	B曲線
0.875m	砂質土	3	1.026	1.49	1.746	1.478
1.65m	砂質土	3	0.67	0.879	1.049	0.867
2.65m	砂質土	2	0.922	1.521	1.841	1.484
3.65m	砂質土	2	0.743	1.114	1.353	1.076
4.65m	砂質土	10	0.797	1.256	1.526	1.2
5.65m	砂質土	5	0.63	0.872	1.061	0.827
6.65m	砂質土	7	0.621	0.846	1.027	0.795
7.65m	砂質土	7	0.855	1.385	1.678	1.286
8.65m	砂質土	3	0.843	1.355	1.631	1.244

るが、これについては今後更なる検討が必要である。

また図-11には、P波到達から最後に50galが観測されるまでの時間を地震動継続時間として、兵庫県南部地震の際のポートアイランドで観測された強震記録<sup>8)</sup>および2000年鳥取県西部地震での境港で観測された強震記録から読み取った地震動継続時間を合わせて示している。これより地震動継続時間に関しては今回の芸予地震とさほど差が無いことがわかる。

表-2にこの位置での道路橋示方書にしたがった液状化判定結果を示す。これよりN値から推定する砂層の液状化抵抗としてタイプ1よりもタイプ2地震動を用いた場合の方が $F_L$ が大きくなっており、今回の地震ではタイプ2の内陸型地震に対応する $R_L$ の方が現象を良く説明できることが分かる。次にこの地点での鉛直方向の最大加速度分布を調べると、図-6のようになっている。液状化しそうな砂層の深さでは道路橋示方書による深さ方向の低減係数 $r_d$ と大きく異なっている。そこで図中のA線を仮定して $r_d$ を求め、液状化判定を行うと、深さ5.1m~7.1mの間で $F_L=1.027\sim1.061$ となり、液状化の可能性すれすれではあるものの、 $F_L>1$ となっている事がわかる。この値から共同溝設計指針で使われる $r_d=F_L^{-1}$ を求めると、間隙水圧比は0.77~0.86であり、実測した値に近づいた。つまり、今後、現在液状化判定法で用られている $R_L$ の設定法と合わせて $r_d$ の吟味が必要であると考えられる。

#### 4. 埋設管の被害

広島市水道局が調べた広島市内の水道施設の被災状況を表-3に示す。これによれば、ほとんどが家屋内の給水管の損傷であり、深刻な水道施設の被害はなかった。取水施設等の被害は地盤のクラックや天井の落下などの被害がほとんどであった。また配水管では、継ぎ手部の抜けや破損などの被害がほとんどであった。家屋内配管については、水道局への問い合わせ件数が集計されているが、デルタ内での埋設管の被害は余り見なれなかった。このことは広島市周辺での地震動の特性と一致する。

表-3 水道施設の被害

取水施設など	配水管	家屋内給水施設
25カ所	10カ所	749カ所

#### 5. まとめ

本報告では、平成13年3月24日に発生した芸予地震による広島県沿岸部の地震動特性及び液状化等に検討した。その結果以下の知見が得られた。

- (1) 甚大な構造物被害に結びつく顕著な噴砂は多くなかった。採取した噴砂の粒度分布は特異なものではなかった。
- (2) 広島デルタ南端の消防航空隊基地でも間隙水圧が発生したが、観測した間隙水圧比は0.3程度であった。
- (3) この観測値と鉛直アレー観測の結果を用いて液状化判定を行ってみると、今回の地震では深さ方向の低減係数 $r_d$ は示方書の値より低く、今後液状化判定に用いる $r_d$ の吟味が必要であると考えられる。

謝辞：本報告作成にあたり、k-net、広島県、広島市消防局、広島市水道局等の観測記録および資料を使用させて頂いた。関係者各位に記して感謝の意を述べる。

#### 参考文献

- 1) 国立天文台：日本付近の被害字新年代表，理科年表，1998。
- 2) 防災科学研究所ホームページ，2001。
- 3) 消防庁ホームページ，2001。
- 4) Sasaki, Y., Fujiwara, K., Miura, F., Konishi, H., and Furukawa, S.: Development of the seismic disaster information system for Hiroshima city, Proceedings of 12th World Conference on Earthquake Engineering, 2000.
- 5) 川島, 相沢, 高橋: 最大地震動および地震応答スペクトルの距離減衰式, 土木研究所報告, 第166号, 1985.
- 6) Joyner, W.B. and Boore, D.M.: Peak horizontal acceleration and velocity from strong motion records from the 1979 Imperial Valley-California Earthquake, BSSA, Vol. 71, No. 6, pp. 2011-2038, 1981.
- 7) Kano, S. and Sasaki, Y.: Animation of the ground motion overview using strong motion records, Poster Session Proceedings of the Eleventh Asian Region Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, pp. 145-146, 1999.
- 8) 日本地震学会, 地盤工学会, 土木学会, 日本建築学会, 日本機械学会: 阪神・淡路大震災調査報告, 共通編-2, 1998.