

# 内陸型活断層地震の特徴と その構造物への入力評価はどうあるべきか？

竹宮宏和<sup>1</sup> 島袋ホルヘ<sup>2</sup> ジャン・ズルフィカール<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員、工博、教授、岡山大学環境理工学部 (〒700-8530 岡山市津島中3-1-1)

<sup>2</sup>正会員、学博、研究員、岡山大学環境理工学部 (〒700-8530 岡山市津島中3-1-1)

<sup>3</sup>学会員、工修、岡山大学自然科学研究科 (〒700-8530 岡山市津島中3-1-1)

最近、兵庫県南部地震(1995)の大被害地震、また、一方、鳥取県西部地震(2000)、芸予地震(2001)とマグニチュード7程度クラスの内陸型地震であるが小被害に留まったものが発生した。記録波形からもそれらの差は歴然としている。本論文は、震源断層、地形、深層・浅層地盤構成(ローカルサイト・エフェクト)からそれらの地震を比較して、地震動の特徴をフーリエ・スペクトル、エネルギー・スペクトル、応答スペクトル等々から捉え、発生被害の程度、分布に言及するものである。これより、内陸型活断層地震への耐震設計のための地震入力動をどう評価すればよいかを議論したものである。

**Key Words :** inland type earthquake, design spectrum, epicenter distance, fault rupture simulation, site effects

## 1. 最近の我が国の内陸型被害地震

1995年1月に兵庫県南部地震が発生し、神戸市域で带状に延びた阪神淡路大震災をもたらした。都市施設、道路構造物、建物の倒壊、損壊が発生した。それを踏まえて土木構造物の耐震設計法がレベル2地震動を対象に性能設計する方向となった。「内陸活断層地震動は、極めて稀であるが非常に強い地震動」と定義されている。その到来期間は、1,000のオーダーとされている。レベル2地震動に対応した設計スペクトルが神戸の記録を基に作成された。

2000年10月に鳥取県西部地震が日野町の直下を震源として発生した。同地震には最初に伏在断層説が出たが、その後の調査で出雲断層の一部との説明がなされた。被害は、震源近傍の山間部の町における家屋の倒壊・損壊、境港市の岸壁の液状化による損壊などが挙げられる。マグニチュードの割には被害が小規模に留まった。

2001年3月に安芸灘を震源に芸予地震が発生した。被災地の分布は広島県南部ほぼ全域に災害が点々と分布した。被害がやや集中する地域として、硬質地盤であるが破碎帯の3箇所挙げられる。

以上の地震の特性を見るため、表1に比較をしてみた。これから活断層地震が兵庫県南部地震で代表されるものでないことが分かる。地震工学委員会レベル2地震動研究小委員会では、「土木学会の耐震基準等基本問題に関する提言」を受けて、内陸型活断層地震の発生の可能性は日本国内どこにでもあること前提に、マグニチュードM<sub>j</sub>6.5を下限とすることを提案した。その上で、サイト依存の地震動をシミュレートする方向

表1 最近の内陸型地震の比較

地震	兵庫県南部	鳥取県西部	芸予
マグニチュード	M <sub>j</sub> 7.2 (Mw6.9)	M <sub>j</sub> 7.3 (Mw6.6)	M <sub>j</sub> 6.4 (Mw6.7)
断層破壊形式	右横ずれ	左横ずれ	正断層
最大震度階	7強、 市街 北東の震災帯	6強 山間、沿岸 北西-南東方向 に延びる	6弱 硬質地盤 (破碎帯) 広く点在
被害の特徴	都市構造物、建物の崩壊	震源近傍の家屋倒壊、埋立地の液状化	家屋の倒壊・損壊

を打ち出した。

## 2. 地震動と震源距離の関係

阪神・淡路大震災後、当時の科学技術庁により全国に地震観測網 Kik-net<sup>1)</sup>が敷かれ、地震発生後直ちに各地点の揺れが公開されるようになった。その観測記録に基づいて、図1を作成した。

鳥取県西部地震による震源近傍の日野(震源直上)では最大加速度918gal、日南(震源距離13km)、江府(同12km)では725gal、新見(同32km)では、数百ガルの水平最大値を記録した。鉛直加速度は、江府で400galにも達した。日野を除いたこれらの観測地点の地盤では、2~3mの表層の下に岩盤が現れる。一方、米子、境港は20m余深さまで砂やシルトの軟弱堆積層上の観測である。震源から距離がある程度離れたこれらの地点では水平動が卓越した。

芸世地震による、湯来(震源距離83km)では最大加速度828gal、三原(震源距離42km)では651gal、砥部(震源距離45km)では、数百ガルの水平最大値を記録した。鉛直加速度は、西条で400galにも達した。

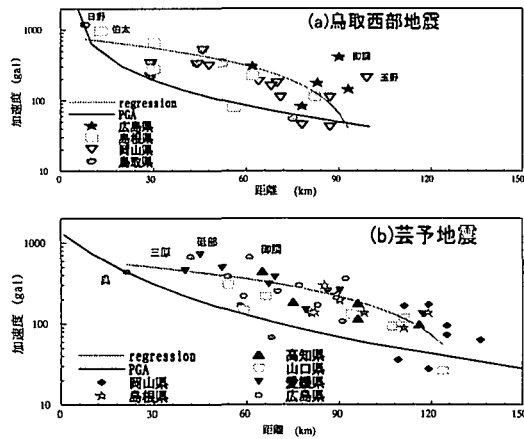


図1 Kik-netによる水平最大値を震源距離との関係

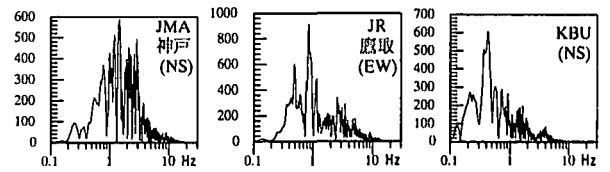
### 3. 地震動の周期特性

兵庫県南部地震による、記録加速度波形のうち代表的なものについてフーリエ・スペクトルを図2(a)に示した。これらについての説明は既に他になされているので、ここでは省略する。

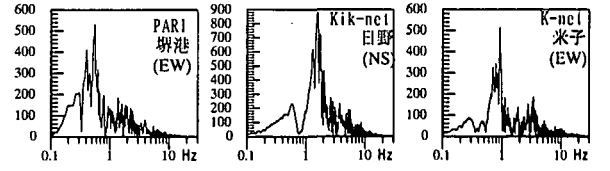
鳥取西部地震による、Kik-net、K-net、PARI<sup>1)</sup>の記録加速度波形の代表的な記録波形についてフーリエ・スペクトルを図2(b)に示した。震源近傍の日南、江府では0.5秒より短い周期成分で広く分布している。震源近傍でも日野は沖積層上にあり、0.7秒付近にピークを示す。そして、2秒にも卓越成分があるのは興味深い。後者は震源メカニズムによると思われる。沖積層の厚い米子では、1秒より長い周期成分が卓越している。境港の波形は、液状化が発生し、長周期化して2秒の波が卓越している。

芸予地震の代表的な記録加速度波形のフーリエ・スペクトルを図2(c)に示した。湯来では0.8秒付近に周期成分が卓越している。呉、広島では0.8秒及び1秒付近にピークを示す。呉は第2種地盤、広島は第3種地盤に属すると思われる。三原、砥部では、0.1~0.5秒付近で広く分布している。鉛直方向に関して西条では、0.3秒及び0.1秒以下にピークを示す。三原、湯来は第1種地盤に属する。

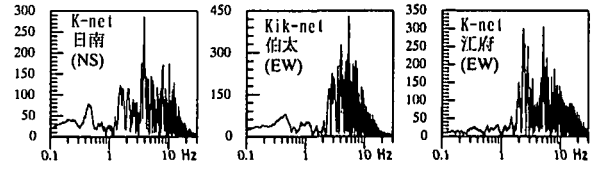
つぎに構造物への入力としての地震動の評価のため、応答スペクトルを代表的な波形に対して計算結果を図3に示す。兵庫県南部地震後の改定道路橋示方書の設計スペクトルも併せ示した。日南記録波形は0.4~0.6秒の短周期構造物に影響する特性を、米子記録波形は1秒を越す周期の構造物には大きな入力となる。観測点の日南は第1種地盤、米子は第3種地盤に属すると思われる設計スペクトル(タイプII)と比較して、日野の記録は0.数秒から1秒にかけての周期帯域で第1種地盤のスペクトルより上回っており、1秒より長い周期では却って小さい。米子の記録は0.数秒より長い周期において第3種地盤のスペクトル



(a) 兵庫県南部地震



(b) 鳥取西部地震



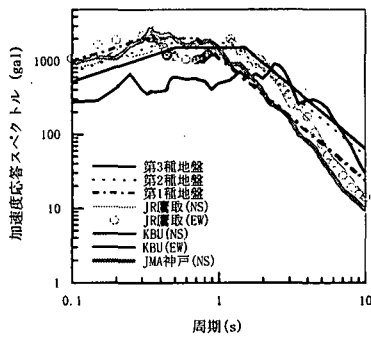
(c) 広島県芸予地震

図2 加速度波形のフーリエ・スペクトル

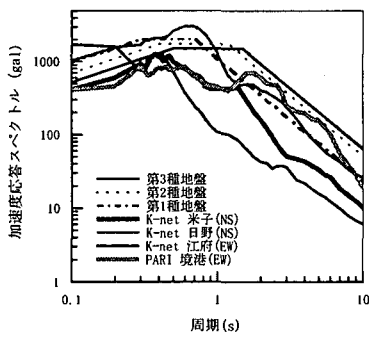
よりはるかに小さい。境港の記録は、液状化したため、2秒から3秒で卓越値を示している。全般に、震源直上の日野の記録を除く鳥取県西部地震の記録の応答スペクトルは道路橋のスペクトル(タイプII)を下回っていることが分かる。

つぎに、芸予地震による湯来、呉の記録波形は0.3~0.4秒の短周期構造物に影響する特性を示す。設計スペクトル(タイプII)と比較して、湯来、呉の記録は0.1数秒から0.5秒にかけての周期帯域で第3地盤のスペクトルより上回っており、0.5秒より長い周期では却って小さい。全般に、応答スペクトルの特徴は、土木・建築構造物へ影響する0.4秒前後より短い周期帯域で示方書のものより大幅に高い値を示している。これより、震源が深い場合、加速度応答スペクトルは短い周期の範囲で集中していることが分かった。

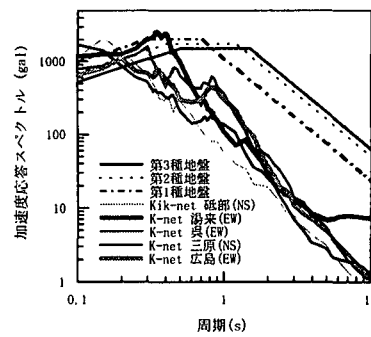
地震の破壊可能性をエネルギーの観点から調べるため、入力エネルギーの計算した。ここでは、設計加速度スペクトルに対応した速度スペクトルと比べるため、



(a) 兵庫県南部地震



(b) 鳥取西部地震



(c) 広島県芸予地震

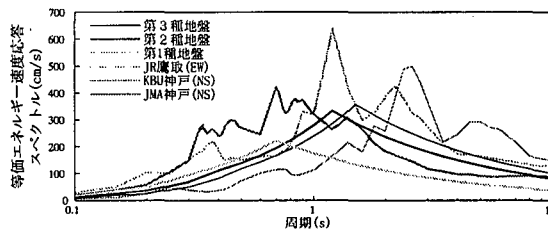
図-3 応答スペクトルの比較

入力ギヤを等価速度に変換した。その結果の図4を見ると、鳥取西部地震による、日野等価速度は0.6~0.8秒の短周期構造物に影響する特性を、芸予地震による、湯来及び呉は0.3~0.4秒の短周期の構造物には大きな入力となる。日野、湯来は第1種地盤、呉は第3種地盤に属する。それぞれに対応したスペクトル(タイプII)と比較して、日野の場合、0.数秒から1秒にかけての周期帯域で第1種地盤のスペクトルより上回っている。しかし、等価速度スペクトルと設計スペクトルの周期特性は整合している。湯来、呉の記録は0.5数秒より短い周期において設計スペクトルよりはるかに大きい。この場合、等価速度スペクトルの最大応答の周期は設計スペクトルの最大応答の周期より、短い周期に集中している。ところで、兵庫県南部地震記録に対する結果は、1秒より長い周期帯域で設計速度スペクトルを上回っている。鳥取県西部、芸予地震の観測記録とは比べて非常に大きい数値を示している。

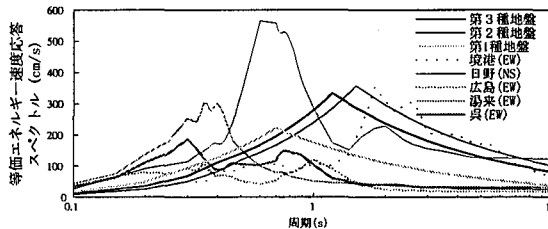
#### 4. 断層地震動の特性

ディスロケーション理論における巨視的パラメータより観測地震動を再現できる精度を検討する。震源近傍の地震動には、断層の破壊過程が顕著に現れるため波形を比較することで地震パラメータをより正確に決定できよう。対象とした3つの地震の断層特性を比較する。表2の地震パラメータを参照して断層地震動のシミュレーションを文献(2,3,4)の手法からそれぞれのデータに基づいて示した。

図5(a)は震源近傍である神戸大学の地下道記録(KBU)に、図5(b)は鳥取西部地震の断層近傍の日南記録に、図5(c)は芸予地震の呉のシミュレーションを記録波形の積分した変位時刻歴と比較したもので、シミュレーション値は観測値をよく再現していると言える。図6はそれらの解析結果を描いて比較したものである。対象とした3つの地震の結果を比べると、芸予地震の値は兵庫県南部及び鳥取西部地震のより、



(a) 兵庫県南部地震



(b) 鳥取県西部地震、芸予地震

図4 等価速度波形応答スペクトル

表2 断層の特性

	兵庫県南部	鳥取県西部	芸予
地震モーメント (x10 <sup>19</sup> Nm)	1.52	1.1	1.2
スリップ(m)	1.6, 0.9, 0.5	2.4	1.0
震源深さ(km)	16	11	60
断層面積(km <sup>2</sup> )	16x11, 10x10, 10x10	20x10	35x25
ライズタイム(s)	0.6	2.2	1.0
破壊進行速度 Vr(km/sec)	2.8	2.3	2.8
応力降下(MPa)	16.3, 8.6, 8.6	8.5	13

かなり小さい。これには震源深さが関係していると思われる。しかし、変位フーリエ・スペクトルを見ると、鳥取西部地震と芸予地震は0.1-0.5Hzに集中していることが分かる。兵庫県南部地震は1.0Hz近くにも卓越ピークが見られる。ライズタイムが関係しているものと思われる。

#### 5. 地震の浅層地盤構成

構造物の性能設計のためには、入力地震動を仮定しての動的解析が重要となる。地表面近傍の地震波増幅作用は、一般にローカルサイト・エフェクトと呼ばれ、地盤の非線形性と共に、不整形性が特に加速度に顕著

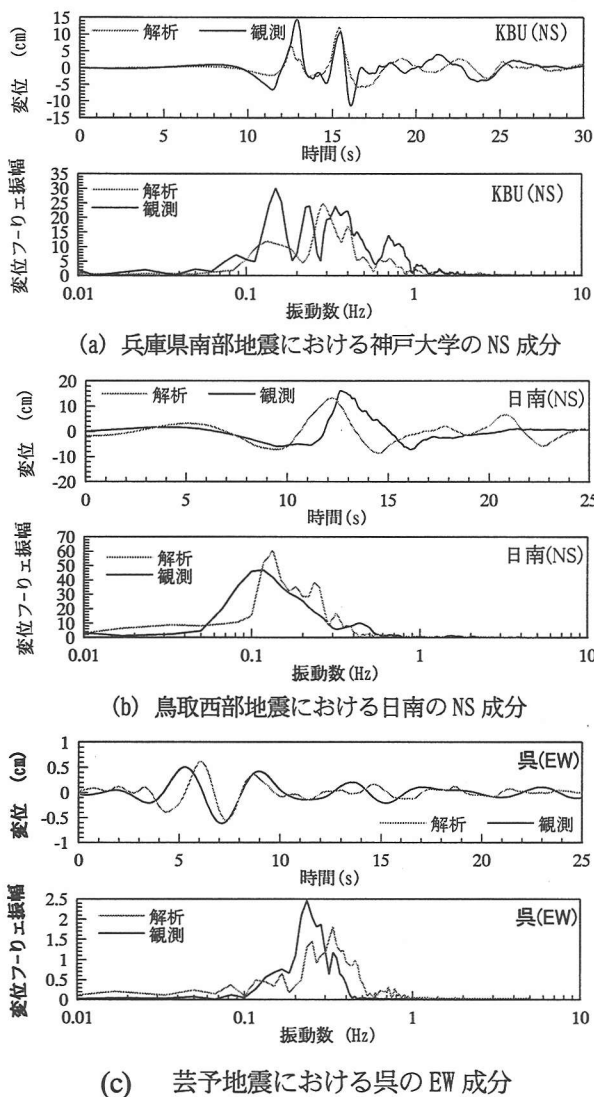


図5 断層シミュレーションによる変位波形及び変位フーリエ・スペクトル比較

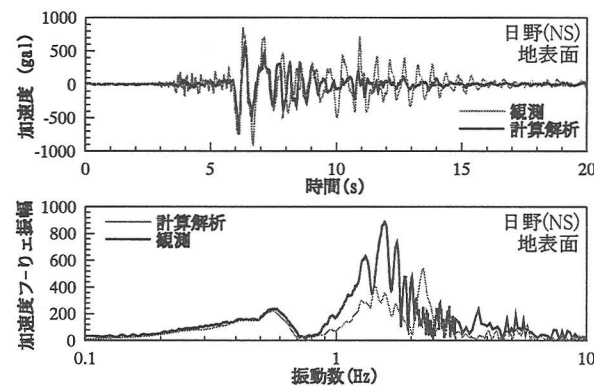


図6 Kik-net 日野記録における表層非線形増幅度、SHAKE による等価線形計算観測記録と解析結果の比較

に現れる。前者は SHAKE でよく評価される。その予測精度を調べた。図6は非線形（等価線形）解析と観測波形と比較したものである。地盤物性のひずみ依存特性には、建設省土木研究所の特性曲線を使用した。非線形解析をすることによって、高振動成分を除いて精

度よく地盤の増幅度が評価できることが分かる。しかし、後半の振動は1次元モデルでは説明できない。要因として地形の効果を反映しているものと思われ、少なくとも2次元解析が必要である。

呉の浅層地盤の影響を調べるため、図7を示すようにEW方向のモデルを選んだ。解析は時間領域FEM-BEMハイブリッド手法<sup>5)</sup>による面内波動場である。地盤の非線形特性は、修正モール円とHardin-Drnevich関係式から評価した。入力波形としてデコンボリューションした呉EW成分記録を使用しました。図8はFEM-BEM方法とSHAKEによる解析結果を比較したもので、柔らかい地盤が浅くなる場所で最大加速度を現している。実際、被害はこの場所で多く発生した。

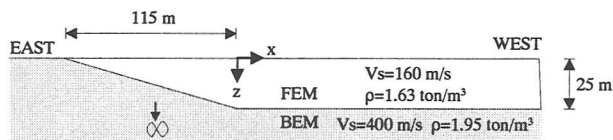


図7 呉の地盤のモデル

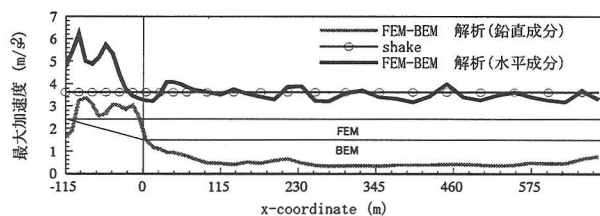


図8 呉における浅層地盤の非線形解析結果

## 6. むすび

活断層地震動は、震源過程が発生地震動に大きく影響されが、それは巨視的地震パラメータの下でシミュレーションがかなりの程度に可能なこと、構造物の耐震性能設計のために前提となる加速度入力動としての評価でローカルサイト・エフェクトの重要性を示した。

## 参考文献

- 1) 科学技術庁防災科学研究所, 強震観測網 (K-net), 基盤強震観測網 (Kik-net)、港湾空港技術研究所 (PARI) ホームページ.
- 2) 竹宮宏和 宮河元: ディスロケーションから工学的基盤地震動の評価へー地質・地形構造を考慮してー, 第25回地震工学研究発表会講演論文集, pp. 73-76, 1999.
- 3) Zulfikar, A.C, Takemiya H., Synthesis of Strong Ground Motions for Tottori-ken Seibu Earthquake case, 第26回地震工学研究発表会, 論文番号 210, 2001.
- 4) 竹宮, 鈴木, 島袋, ズルフィカル. 芸予地震による広島県南部の被害一被害分布と地震動特性の地形・地質からの解釈一, 平成13年中国支部研究発表会, 論文番号 VIII-7, 2001
- 5) Takemiya, Adam, M., 2D Nonlinear Seismic Ground Analysis by FEM-BEM: The Case of Kobe in Hyogo-ken Nanbu Earthquake, Proc. JSCE, No.584/I-42, pp. 19-27, 1998.