

# E-Defenceで利用する 3成分シミュレーション地震波形の作成

香川 敬生<sup>1</sup>・入倉 孝次郎<sup>2</sup>・阿部 健一<sup>3</sup>

<sup>1</sup>財団法人 地域地盤環境研究所 (〒550-0012 大阪市西区立売堀4-3-2)

E-mail:kagawa@gor.or.jp

<sup>2</sup>愛知工業大学客員教授 地域防災研究センター (〒470-0392 豊田市八草町八千草1247)

E-mail:irikura@geor.or.jp

<sup>3</sup>独立行政法人 防災科学技術研究所 兵庫耐震工学研究センター (〒673-0515 三木市志染町三津田西亀屋1501-21)

E-mail:ken-abe@bosai.go.jp

大規模 3 次元震動台 E-Defence では、既往地震観測記録だけではなく、記録が得られていない既往被害地震による再現地震動や将来発生が予想される地震による想定地震動による実験が想定される。本研究では、まず 3 成分地震動をシミュレーションし得る強震動予測手法について、整理・考察をおこなった。また、適切な地震動を評価するための断層破壊パラメータの設定法および地盤情報の反映法についても整理・考察を実施した。その成果の一部は、E-Defence における入力波形操作システムにも反映されている。次いで、整理・考察した地震動評価法に則って、各種地震による 3 成分地震動のシミュレーションをおこない、既往地震記録による検証を経て、被害地震の強震動の再現および想定地震による強震動の予測を実施した。加えて、強震動地震学の知見から、記録に見られるノイズ成分の扱いなど、3 次元震動台に入力する地震動波形の留意点についての整理をおこなった。

**Key Words** :E-defence, 3-dimensuinal ground motion, fault rupture model, simulation

## 1. はじめに

大規模 3 次元震動台 E-Defence で利用するための強震動波形データベースの一環として、シミュレーションによる地震動を提供するための研究をおこなった。近年の観測網の充実によって、大被害域での強震観測記録が得られるようになってはいるが、既往被害地震による大被害域の強震波形や、今後想定される巨大地震による強震波形など、シミュレーションに依る地震動を用いた E-Defence での実験には大いに意味があるものと考えられる。

本研究では、まず 3 次元強震動波形の推定手法に関する調査をおこない、断層破壊シナリオの設定法および強震動計算法についての方針を示す。次に、被害を生じた近代の地震について、観測された記録で検証をおこなった上で、強震観測記録の得られていない大被害域における強震動を予測する。その上で、将来発生する地震を想定した強震動波形の予測をおこなうとともに、関東平野、濃尾平野、大阪平野を対象として、地域の設計入力地

震動として利用されている強震動予測波形について調査収集をおこなう。最後に、強震動地震学の立場から、既往観測記録を含めて、E-Defence の入力として利用する地震波形の留意点について整理をおこなう。

## 2. 3 次元強震動波形の推定手法

### (1) 3 次元波形計算手法

観測される地震動は、震源断層の破壊によって生じた地震波がサイトまで伝播し、サイト近傍地盤の影響を受けたものである。規模の小さい地震に比べて大地震の断層面積は大きく、すべり量も大きい。これら大地震と小地震が同じ断層面で発生し、その地震動を同じサイトで観測した場合、小地震波形を地震波伝播とサイト近傍地盤の影響を表現したグリーン関数と見なして大地震波形を合成することができる。その際、小地震波形として観測記録を用いるものが「経験的グリーン関数法<sup>1)</sup>」、人工地震波<sup>2)</sup>を用いるものが「統計的グリーン関数法<sup>3)</sup>」である。その他に、波動伝播理論に基づく「理論計算法

4, 5)など」が長周期帯域で実施され、「統計的グリーン関数法」による短周期地震動と合成した「ハイブリッド法」が現在多く用いられている。以下、3次元強震動の予測を前提とした場合の、これらの手法の長短について整理する。

経験的グリーン関数法：小地震観測記録には構造モデルに基づくシミュレーションでは十分に再現できない影響も含まれており、S波起因の上下動の評価が自然におこなえることから、3成分地震動の合成に適している。ただし、要素断層毎のサイトへの地震波放射特性や表面波励起特性が著しく異なる波形を利用する場合には適さない。

統計的グリーン関数法：要素断層毎に地震波放射特性や地盤応答を導入すれば<sup>7), 8)</sup>など、経験的グリーン関数法よりも汎用性が高い手法となり得る。ただし、地震動の遠地項のみによる表現を用いているため、震源ごく近傍の長周期帯域では、その精度が落ちることが指摘されている<sup>9)</sup>。

理論計算法：3次元構造内の地震波動伝播を最も忠実に表現できるが、結果が構造モデルの精度に依存し、長波長域に限定される。

ハイブリッド法：理論計算法の短周期帯域での弱点を、長周期に弱点のある統計的グリーン関数法で補うことで広周期帯域の地震動が得られる。短周期帯域が3成分に対応しておれば、3成分地震動の合成が可能である。

以上の特徴から、3次元強震動の推定においては、適切な小地震観測記録を用いた経験的グリーン関数法およびハイブリッド法が適していると考えられる。ただし、ハイブリッド法の短周期領域に統計的グリーン関数法を用いる場合には、3成分地震動を適切に考慮できる手法であることが必要であり、伝播経路特性とサイト特性が適切に評価できる構造モデルが前提となる。

## (2) 断層破壊シナリオの設定法

また、震源破壊シナリオの設定については、非一様すべりを矩形断層と矩形アスペリティで表現した特性化震源モデル<sup>10)</sup>に基づく強震動予測レジビ<sup>11), 12)</sup>などに準拠することで、断層破壊パラメータ間の物理的な関係を満たした設定となり、特異な地震動の想定を避けることができる。

その際、地震発生層の上下端の設定など、対象地域の地震環境に配慮する必要がある。また、既往地震の再現であればその詳細破壊シナリオによる知見をできるだけ導入し、想定地震であれば、破壊開始点位置などの不確定要素については複数のシナリオを設定することが望ましい。

## 3. 既往地震による検証と予測

### (1) 1995年兵庫県南部地震

内陸地震として大きな被害を生じた平成7年兵庫県南部地震については、多くの震源破壊過程の解析がおこなわれ、観測記録を説明できる特性化震源モデルもいくつか提案されている<sup>13), 14)</sup>など。そのうちのひとつ<sup>14)</sup>を用いて、経験的グリーン関数法によって、関西地震観測研究協会による神戸大学サイトの3次元強震動波形を計算した結果と観測波形を図-1で比較している。広い周期帯にわたって、観測記録の特徴が良く再現されていることが分かる。ただし、水平動の短周期成分をやや過大評価している傾向がみられ、ごく表層地盤による非線形応答補正の必要性は示唆される。このモデルを用いて、震度7の領域に掛かるが本震時の観測記録が得られていないK-NET西宮サイト(HYG022)における本震地震動を、余震観測記録から合成した結果を図-2に示す。周期2秒程度の卓越した、計測震度6.4とほぼ震度7の3成分波形が得られている。(以下、図には1成分のみを示す。)

### (2) 1923年関東地震

K-NET観測点における中小地震観測記録(東京湾の地震:M<sub>j</sub>5.1)を用いて、大正12年関東地震のシミュレーションを実施した。その際の震源モデルとしては、波形および地殻変動に基づいたインバージョンによる新しい知見であり、かつシミュレーションによる検証が実施されている結果<sup>15)</sup>を用い、その結果から特性化震源モデルを構築した。

その例として、K-NET小田原サイトにおける地震動を図-3に示す。要素地震と大正地震の規模に差が大きいため、2段階の波形合成をおこなっている。地震の周期0.5～1秒が卓越し、震度6強程度の揺れが30秒以上にわたって継続している。他のサイトの計算例でも、当時の調査による震度分布<sup>16)</sup>に整合した計測震度が得られてる。

## 4. 想定地震による予測

### (1) 想定東南海地震

将来発生が予想される地震の検討例として、中央防災会議による東南海地震を想定したシミュレーションを実施した結果を紹介する。要素地震波としては三重県域で発生したM<sub>j</sub>5.5の地震を用い、濃尾平野におけるK-NET津島サイト(AIC003)を対象とした結果を図-4に示している。震度は6弱と当時の調査による震度分布<sup>16)</sup>とも矛盾しない。継続時間は非常に長く、波形後半で長周期の地震動が卓越していることが特徴的である。

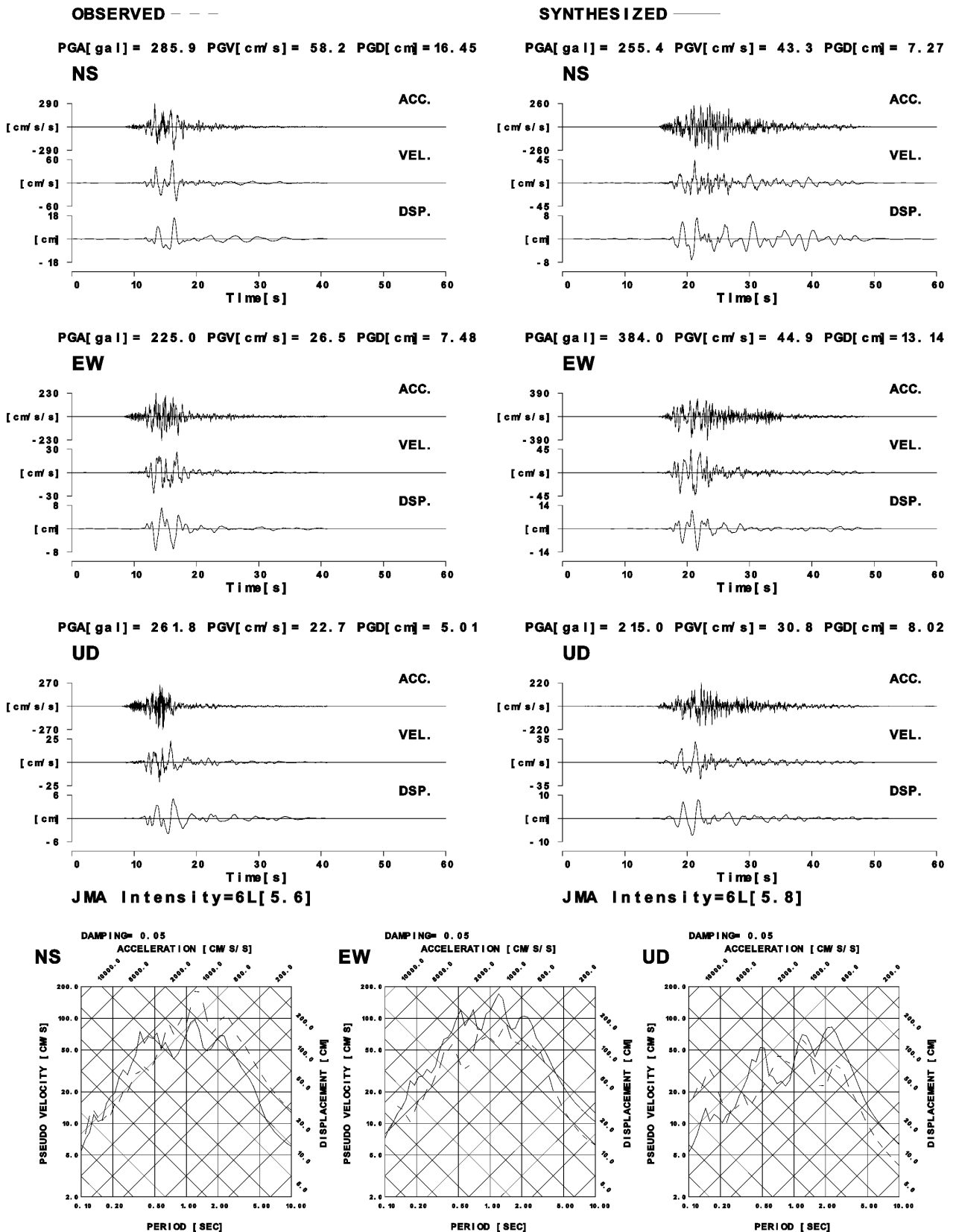


図-1 関西地震観測研究協議会神戸大学サイトの兵庫県南部地震観測波と合成波（3成分）

## (2) 耐震検討用地震動

関東、大阪、濃尾平野域では、構造物の耐震検討用地震動波形が提案され、一部で利用されている<sup>17)19)</sup>。そのような波形も、E-Defenceにおける入力波としては重要で

あるため、現況の調査を実施した。ただし、一般構造物の設計において上下動が考慮されることは少なく、最も新しい検討事例である濃尾平野の結果のみ、3成分の地震動が提案されている<sup>19)</sup>。

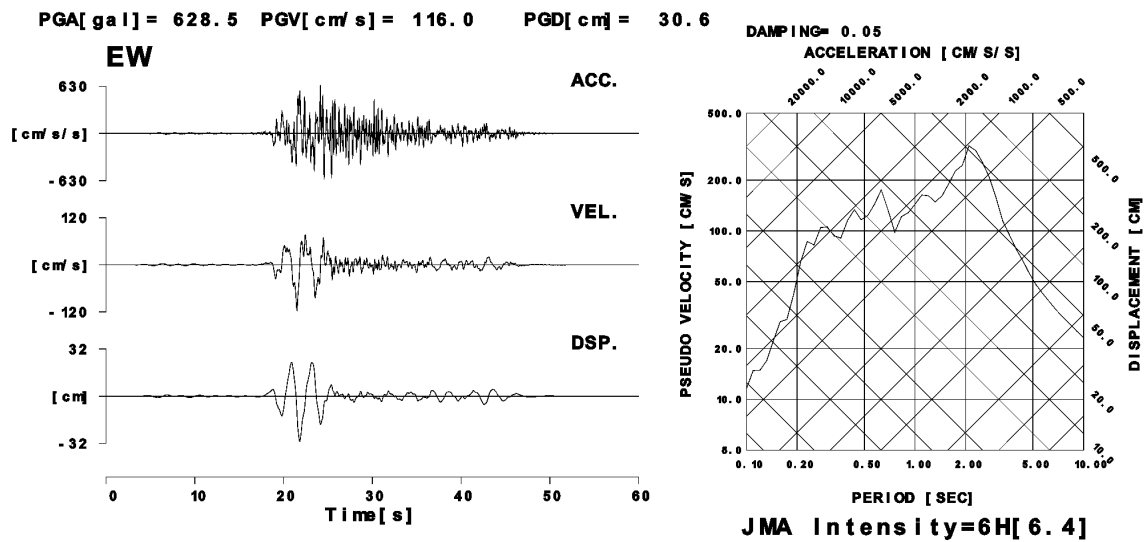


図-2 K-NET西宮サイト (HYG022) で合成された平成7年兵庫県南部地震の計算波形

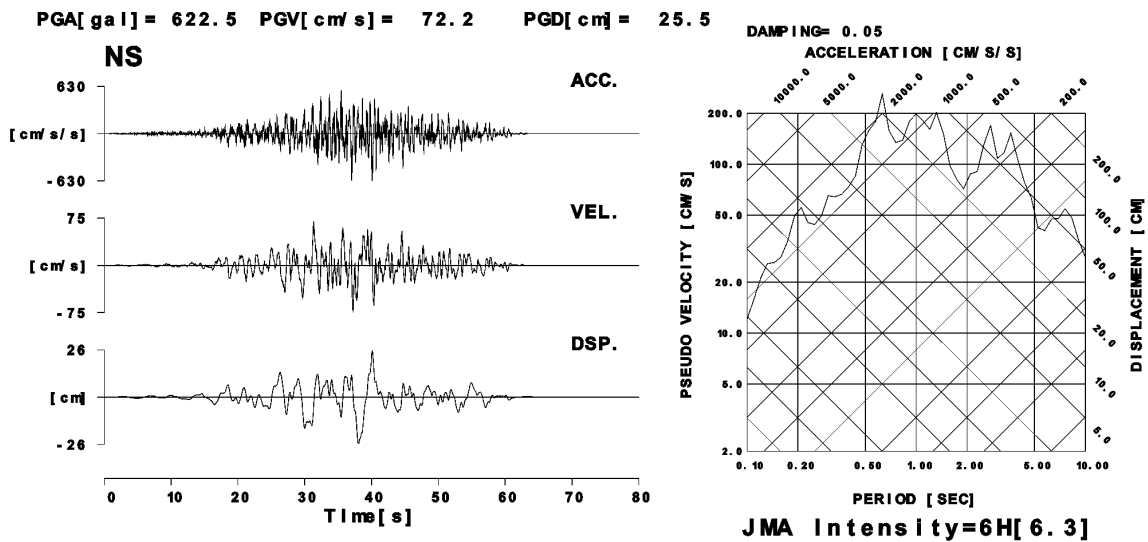


図-3 K-NET小田原サイト (KNG013) で合成された大正12年関東地震の計算波形

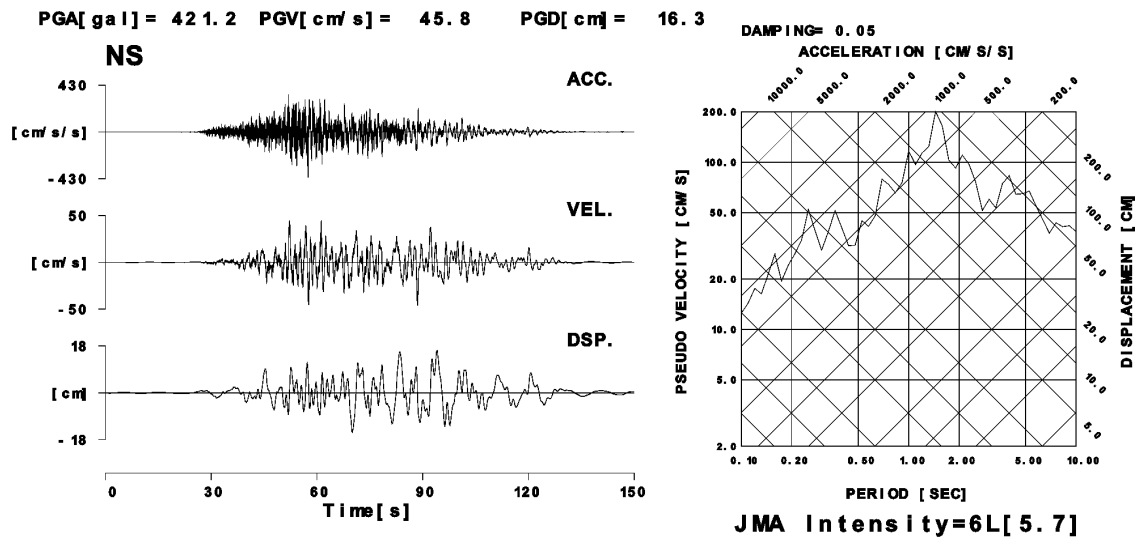


図-4 K-NET津島サイト (AIC003) で合成された想定東南海地震の計算波形

## 5. 波形記録利用上の留意点

以上のようにシミュレーションを実施した波形とその地震動特性値の一覧を表-1に示す。ハイブリッド法を用いた一部の検討事例で水平2成分のみのものが見られるが、ほぼ3成分波形が得られている。

表-1 本検討でシミュレーションした波形の地震動特性値

| 年度  | 地震         | サイト       | 手法            | PGA(gal) | PGV(cm/s) | PGD(cm) |      |
|-----|------------|-----------|---------------|----------|-----------|---------|------|
| H14 | 兵庫県南部      | 関震協戸大     | EGF           | 54.2     | 11.5      | 9.11    |      |
|     |            | K-NET西宮   | EGF           | 708.6    | 116.1     | 30.75   |      |
|     | 吉野         | KiK-net田尻 | EGF           | 74.3     | 11.0      | 7.28    |      |
|     |            | KiK-net此花 | EGF           | 45.8     | 5.4       | 2.19    |      |
|     |            | 関震協弥栄     | EGF           | 41.6     | 22.6      | 20.85   |      |
|     |            | KiK-net田尻 | EGF           | 131.7    | 17.8      | 10.31   |      |
|     | 東南海・南海     | KiK-net此花 | EGF           | 294.9    | 128.6     | 67.11   |      |
|     |            | 関震協弥栄     | EGF           | 33.9     | 15.5      | 12.58   |      |
| H15 | 濃尾         | K-NET津島   | EGF           | 862.3    | 69.2      | 17.04   |      |
|     | 三河         | K-NET安城   | EGF           | 782.8    | 30.3      | 2.55    |      |
|     | 東南海        | K-NET津島   | EGF           | 456.3    | 46.0      | 18.39   |      |
|     | 東南海・南海     | K-NET四条畷  | hybrid(2cmp.) | 166.4    | 18.8      | 6.53    |      |
|     |            | K-NET大阪   | hybrid(2cmp.) | 154.0    | 27.2      | 16.84   |      |
|     |            | K-NET羽曳野  | hybrid(2cmp.) | 187.1    | 32.9      | 11.42   |      |
| H16 | 中越         | K-NET小千谷  | EGF           | 2170.5   | 175.2     | 23.48   |      |
|     | 関東         | K-NET水川   | EGF           | 62.6     | 6.1       | 3.14    |      |
|     |            | K-NET小田原  | EGF           | 822.4    | 77.6      | 26.34   |      |
|     |            | K-NET新宿   | EGF           | 440.8    | 36.9      | 11.26   |      |
|     |            | K-NET横浜   | EGF           | 772.7    | 102.9     | 19.13   |      |
|     |            | 関震協神戸大    | hybrid        | 226.2    | 33.5      | 11.23   |      |
|     |            | 関震協本山     | hybrid        | 296.2    | 97.5      | 39.75   |      |
|     | 兵庫県南部      | a00       | hybrid        | 602.0    | 89.0      | 26.65   |      |
|     |            | a01       | hybrid        | 553.8    | 61.5      | 23.55   |      |
|     |            | a02       | hybrid        | 596.4    | 87.9      | 29.73   |      |
|     |            | a03       | hybrid        | 428.0    | 72.1      | 31.81   |      |
|     |            | H17       | 中越            | K-NET十日町 | hybrid    | 272.4   | 14.8 |
|     | KiK-net湯ノ谷 |           |               | hybrid   | 335.4     | 25.5    | 5.14 |
|     | b00        |           |               | hybrid   | 523.0     | 22.2    | 9.78 |
| b01 | hybrid     |           |               | 587.6    | 27.3      | 11.68   |      |
| b02 | hybrid     |           |               | 36.0     | 23.3      | 12.15   |      |
| b03 | hybrid     |           |               | 325.2    | 15.5      | 10.82   |      |
| 十勝  | K-NET広尾    |           | hybrid        | 928.9    | 47.0      | 11.37   |      |
|     | S-1        |           | hybrid        | 987.5    | 51.8      | 6.53    |      |
|     | S-2        |           | hybrid        | 483.0    | 18.5      | 2.54    |      |

2004年新潟県中越地震時のK-NET小千谷サイトのよう  
に経験的グリーン関数法による予測で最大加速度が非常  
に大きなものが見られる。経験的グリーン関数法では小  
地震の地盤応答特性（線形）で大地震動を合成するため、  
地盤の非線形応答による影響が考慮されない。このため、  
軟らかい地盤のサイトでは特に短周期の地震動が過大に  
評価される場合がある。このため実用に際しては、想定  
大地震波あるいは要素小地震波から工学的基盤波面での  
地震動を作成し、その上で表層部の非線形応答計算をお  
こなうなど、今回の検討では考慮しなかった非線形応答  
特性への配慮が必要である。このような波形補正の手法  
は、E-Defenceへのオペレーティング・システムに取り込  
まれている。

シミュレーション波をE-Defenceに適用する場合には、  
その計算条件に照らして波形に精度のある周期範囲を把  
握し、適度なフィルター処理を施して用いる必要がある。  
そのため、シミュレーション波をデータ・ベース<sup>20)</sup>に登  
録する際には、その計算過程が分かるように配慮してい  
る。また、過大な予測波形については、震動台の能力を  
逸脱していないか入念なチェックが必要である。この間

題については、別途論文で言及したい。

シミュレーション波だけではなく、一般的な観測波形  
をE-Defenceの入力とする場合には、その記録の精度、特  
に適用周期範囲に配慮することが重要である。例えば、  
加速度波形を積分した速度波形、あるいは変位波形を用  
いる場合に、その長周期成分が信号としての地殻変動で  
あるのか、ノイズを積分しただけのものなのか、利用す  
る前の解析検討と、必要に応じての補正が重要となるで  
あろう。

## 6. おわりに

大規模3次元震動台E-Defenceで利用することを目的と  
して、3次元強震動波形のシミュレーション法について  
検討をおこない、いくつかのシミュレーションを実施し  
た。その結果、以下の結論を得た。

- ・3次元強震動シミュレーション法としては、適用条件  
に応じて、経験的グリーン関数法あるいはハイブリッ  
ド法を利用することが望ましい。
- ・特性化震源モデルに基づく強震動予測レシピに準拠し  
て震源破壊シナリオを設定することで、合理的な3次  
元強震動シミュレーションが可能である。
- ・理論的手法を適用するためには、地震波伝播構造モデ  
ルの作成と検証が重要である。
- ・試算した既往地震の地震動は観測事例と良く対応した。
- ・3次元強震動シミュレーション法では線形地盤応答を  
仮定しているため、軟らかい地盤上では非線形地盤応  
答への配慮が必要である。
- ・既往地震で記録の得られていない地点での再現波、想  
定地震による計算波ともに、現時点で妥当と思われる  
ものが得られている。ただし、震動台への入力として  
用いるにあたっては、その能力を逸脱していないか入  
念なチェックが必要である。

本検討を通じて準備したシミュレーション波形、ある  
いは提案した手法に基づいた計算波形によって、E-  
Defenceを用いた効果的な実験が実施されることに期待  
する。

謝辞：本研究は、文部科学省による「大都市大震災軽減  
化特別プロジェクト」II 耐震性の飛躍的向上「震動台  
活用による耐震性向上研究」に依っている。記して関係  
各位に感謝する。

## 参考文献

- 1) Inikura, K.: Prediction of strong soceleraton motion using empirical Green's  
function, *Jpn. Earthq. Eng. Sym.*, 7, pp. 151-156, 1986.
- 2) Boore, D. M. : Stochastic simulation of high-frequency ground motion  
based os seismological models of the radiation spectra, *Bull. Seism. Soc. Am.*,

- 73, pp. 1865-1894, 1983.
- 3) 釜江克宏, 入倉孝次郎, 福和保長: 地域的なスケーリング則を用いた大地震 (M7級) のための設計用地震動予測, *日本建築学会構造系論文集*, No. 416, pp. 57-70, 1990.
  - 4) Bouchon, M.: A simple method to calculate Green's function for elastic layered media, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 71, pp. 959-971, 1981.
  - 5) Graves, R. W.: Simulating seismic wave propagation in 3D elastic media using staggered-grid finite difference, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 86, pp. 1091-1106, 1996.
  - 6) Kamae, K., K. Irikura and A. Pitarka: A technique for simulating strong ground motion using hybrid Green's function, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 88, pp. 357-367, 1998.
  - 7) 大西良広, 堀家正則: 統計的グリーン関数を用いた3成分地震動合成法の兵庫県南部地震への適用, *構造工学論文集*, 46B, pp. 89-398, 2000.
  - 8) 香川敬生: ハイブリッド合成法に用いる統計的グリーン関数法の長周期帯域への拡張, *日本地震工学会論文集*, 4, pp. 21-32, 2004.
  - 9) 大西良広, 堀家正則: 震源近傍での地震動予測のための拡張統計的グリーン関数法とそのハイブリッド法への適用に関するコメント, *日本建築学会構造系論文集*, 586, pp. 37-44, 2004.
  - 10) Somerville, P. G., K. Irikura, R. Graves, S. Sawada, D. Wald, N. Abrahamson, Y. Iwasaki, T. Kagawa, N. Smith, A. Kowada: Characterizing crustal earthquake slip models for the prediction of strong ground motion, *Seism. Res. Lett.*, 70, pp. 59-80, 1999.
  - 11) 入倉孝次郎・三宅弘恵: シナリオ地震の強震動予測, *地学雑誌* 特集号「地震災害を考える—予測と対策」, 110, pp. 849-875, 2001.
  - 12) Irikura, K., Miyake, H., Iwata, T., Kamae, K., Kawabe, H., Dalgner, L.A. (2004): Recipe for predicting strong ground motion from future large earthquake, *Proceedings of the 13WCEE*, No.1371, 2004.
  - 13) 釜江克宏, 入倉孝次郎: 1995年兵庫県南部地震の断層モデルと震源近傍における強震動シミュレーション, *日本建築学会構造系論文集*, 500, pp. 29-36, 1997.
  - 14) 山田雅行, 平井俊之, 岩下友也, 釜江克宏, 入倉孝次郎: 兵庫県南部地震の震源モデルの再検討, *日本地震学会講演予稿集*, 1999年度秋季大会, A14, 1999.
  - 15) Wald, D. J. and P. G. Somerville: Variable-slip rupture model of the great 1923 Kanto, Japan earthquake: geodetic and body-waveform analysis, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 85, pp. 159-177, 1995.
  - 16) 宇佐美龍夫: 最新版日本被害地震総覧[416]-2001, 東京大学出版会, 2003.
  - 17) Sato, T., R. W. Graves and P. G. Somerville: Three-Dimensional Finite-Difference Simulations of Long-Period Strong Motions in the Tokyo Metropolitan Area, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 89, pp. 579-607, 1999.
  - 18) 大阪府土木部: 大阪府土木構造物耐震対策検討委員会報告書, 1997.
  - 19) 愛知県設計入力地震動研究協議会: 愛知県設計入力地震動の作成 想定地震による強震動予測, 2002.
  - 20) 工藤一嘉, 成田章, 本間芳則: 震動台 (E-Defence) 利用のための強震データベースの試作, *日本地震工学会論文集*, 7, pp. 249-260, 2007.

(2007.?? 受付)

## Three componet simulations of strong ground motion to to drive the E-Defence

Takao Kagawa, Kojiro Irikura, and Kennichi Abe

The methodology to predict three component strong ground motions is proposed for use in E-Defence. Simulation methods are examind from a view point of generating three component waveforms with accuracy in wide frequency band. Characteristic source model is configured from the recipe for strong ground motion estimation. After validation of estimated ground motions with those observed by previous large earthquakes, destructive strong ground motions are simulated assuming the situations of heavydamage area due to the past large earthaurkes and assuming future events. The resulting waveforms shall be checked carefully if they do not exceed the crtical performance level of the shake table. We hope the prepared waveforms are put to practical use in E-Defence