日本地震工学会論文集　第 7 巻、第 5 号、2007

花折断層による京都盆地の 3 次元非線形有限要素法による強震動予測

土岐憲三 1)、岸本英明 2)、古川秀明 3)、酒井久和 4)

1) 名誉会員，立命館大学理工学部、教授　工博
e-mail : toki-k@se.ritsumei.ac.jp
2) 日本コンピューターコンサルタンツ、代表取締役社長
e-mail : kisimoto@ncc-consul.co.jp
3) 日本コンピューターコンサルタンツ開発部、部長
e-mail : furukawa@ncc-consul.co.jp
4）正会員，広島工業大学工学部、准教授　博（工）
e-mail :h-sakai@cc.it-hiroshima.ac.jp

要　約

京都盆地に点在する文化遺産に対する防災対策を目的に、花折断層を想定地震とした京都盆地全域の強震動予測を 3 次元非線形有限要素解析により行った。解析では、絶対応答変位による定式化、共役勾配法、修正 Newton-Raphson 法、並列計算を導入し、計算機資源および計算時間を節約した。京都盆地全域の非線形堆積地盤モデルに対して、シナリオ地震における基盤岩での強震動予測波形を多点異入力し、地震動評価を行った。検討の結果、文化遺産の集積密度の大きい東山山麓をはじめ、計測震度 7 の領域が京都市の第 3 次被害想定の計測震度分布よりも大きくなり、震源、深部地盤構造、堆積層の不整形性、土の非線形性を同時に考慮することの重要性が示された。

キーワード: 強震動予測、3 次元有限要素法、地盤非線形、多点異入力、波動伝播

1. はじめに

京都盆地は東山、北山、西山という言葉が使われることからも明らかなように、東西と北方は山に接し、南だけが開かれている地形を有している。そして、これらの山麓にはいくつもの活断層が展開しており、まさに京都盆地は断層によって形づくられていると言ってよい。一方、2001 年に国と京都市により実施された京都盆地の地下構造探査の結果、盆地の南方を東西に流れる宇治川の直下に巨大な伏在断層が見つけられた。これにより、京都盆地は東西、南北のいずれもが、活断層によって囲まれていることが明らかになった。このことは、京都の地震対策の策定に際しては、盆地の境界を形成する活断層を抜きにしては、何事も為し得ないことを意味している。

盆地の周囲に展開する活断層の中でも、盆地の北方 50 ㎞程のところから、盆地の東北隅を経て街中まで達する花折断層が最も脅威となるものと考えられている。また、この断層は歴史遺産の集積度の高い

東山山麓に強い影響を及ぼすであろうことから、文化遺産の地震被害を論じるに際しては、この断層の活動による地動を検討の対象とすることが肝要である。

断層活動に基づいたサイトの地震動を適切に評価する際に、震源、深部地盤構造、堆積地盤の不整形性、および土の非線形特性の影響を考慮することが重要であるとの指摘は古くから行われている。たとえば、深部地盤構造については、纐纈は[1]、San Fernando 地震の Pacoima ダムやメキシコ地震のメキシコ市での観測記録に基づいて、不整形地盤の影響が強く現れた例を示している。石井ら[2]は、1 次元解析と 2 次元解析を実施することにより、耐震設計上、基盤の不整形の影響を考慮する必要があることを示している。神山ら[3]は、不整形地盤のアレイ地震動記録と応答シミュレーションに基づき、不整形地盤によって短周期表面波が生成される可能性を示唆している。また、兵庫県南部地震の際の「震災の帯」の再現には、震源・深部不整形地盤を考慮することが必要であることが明らかにされている[4)~6)]。一方、地盤の非線形特性については、末冨ら[7]は、地盤のせん断強度により上方に伝達する加速度に上限値があることを示している。田蔵ら[8]は、強震記録に基づいて等価線形解析と非線形解析の応答の違いを検討している。吉田[9]は、表層地盤における地震動の増幅と地盤の非線形挙動が表層の地震動に与える影響について検討し、軟弱地盤における地震動増幅や長周期化などを示している。また、複合的観点からの検討として、岩田[10]は、兵庫県南部地震の「震災の帯」は、深い堆積層を持つ基盤形状及び表層近傍の低速度層の非線形応答の影響を受けていると結論づけている。江尻・後藤[11]は、線形 FEM 解析により、数種の不整形地盤の応答の増幅効果を示すとともに、竹宮ら[12]、常田ら[13]の非線形解析との比較により定量的には地盤非線形を考慮すると明らかな差があると言及している。

京都市の第 3 次地震被害想定[14]に際しても、上記の震源、深部地盤構造、堆積地盤の不整形性、および土の非線形特性の影響を考慮して、詳細に検討が行われている。まず、京都盆地周辺の 6 つの活断層の活動を想定して、ハイブリッド法により盆地の基盤岩での揺れの時刻歴を算定している。そして、各断層による基盤岩での時刻歴を入力として、盆地全体の震動解析を行っている。この震動解析では盆地全体を 100m 四方のメッシュで覆い、このメッシュの中心点での地下構造に基づいて 1 次元の地盤モデルを設定して、非線形応答計算を行っている。このようにして算定された地表面での地動に基づいて、京都盆地の全域に対して計測震度を試算して、地震動の予測地図を示している。

京都市では、この地震動予測値図を基に地域防災計画策定しているが、このような行政行為では計測震度のような段階表示で十分であり、必ずしも揺れの時刻歴は必要とされない。しかしながら、上述のように地盤構造の影響を強く受けるサイトに位置する特に重要な歴史的建造物については、その耐震性、安全性を評価する際に、堆積地盤における 3 次元波動伝播と土の非線形性をも考慮した地震動波形に対して検討することが必要である。

ここで、盆地構造における水平方向への地震波動の伝播に対する、堆積層の 3 次元波動伝播と土の非線形性を適切に考慮するためには、震源断層モデルに基づいた基盤岩での強震動波形を用いて、非線形堆積地盤モデルに対して多点異入力の問題として考える必要がある。広域な地盤モデルを含む同様の解析として、たとえば、堀ら[15]は、仮想都市の多数の構造物の地震時挙動を多点入力に基づく地震応答解析を行っている。市村・堀[16),17)]は、地盤の不確定性を考慮して 3 次元地盤・地殻構造の確率モデルを作成し、大領域の強震動シミュレーションを行っている。山田ら[18]は、多点入力による 3 次元 FEM 解析を行い、分岐部を有する地下トンネルの地震時挙動を求めている。ただし、これらの解析ではいずれも地盤は線形材料として取り扱われている。平野ら[19]は、大阪府域に上町断層系を横断するシールドトンネルの耐震設計を目的として、深部地盤構造、表層地盤の不整形性、および土の非線形特性の影響を考慮し、サイトの地震動を評価している。ただし、南北、東西各々数十 km の大阪平野のうち、3 次元非線形解析に用いた堆積層は南北 2km×東西 3km だけを取り出したにとどまっている。上述のように、近年、3 次元地盤構造や土の非線形特性の影響がサイトの強震動予測において重要であるとの認識から、また、計算機能力の向上により、堆積層や深部地盤構造、堆積層の非線形性を考慮した解析が散見されるようになっている。しかしながら、地盤を線形材と近似した解析や比較的限られた領域に対する解析に留まり、都市全体を含有する広域なエリアに対して、堆積地盤における 3 次6元波動伝播特性と土の非線形特性を

同時に考慮し、多点異入力問題として取り扱った例は見られない。これは、このような検討を行うために十分な地盤構造データが得られていなかったことともに、解析に要する計算機資源、計算時間が膨大なことも一因であると考えられる。そこで本研究では、非線形堆積地盤モデルに対して多点異入力の地震応答解析を行うにあたり、計算機資源および計算時間を縮減する方法を導入し、花折断層の活動による京都盆地における強震動予測を実現象に近づけることを試みた。

2. 京都盆地の強震動予測方法

2.1　解析方法

京都市の第 3 次地震被害想定では、花折断層の活動を想定したシナリオ地震に対し、京都盆地の基盤岩位置での広帯域での入射波が 100m メッシュで算定されている。本研究では、京都盆地の基盤岩以浅の堆積地盤モデルに対して、これらの入射波を多点入力とした 3 次元非線形有限要素解析を行う。

(1) 多点入力系の運動方程式

多自由度系の運動方程式は絶対変位表示で次式のように与えられる。

$$\mathbf{M\ddot{u}} + \mathbf{C\dot{u}} + \mathbf{Ku} = \mathbf{0} \tag{1}$$

ここに、**M**、**C**、**K** はそれぞれ質量、減衰、剛性マトリクス、**u** は絶対応答変位を表す。また、・（ドット）は時間による微分を意味する。

ここで、絶対加速度が既知である加振点と未知な節点における変位をそれぞれ $\mathbf{u_u}$、$\mathbf{u_k}$（$\mathbf{u}=\{\mathbf{u_u}、\mathbf{u_k}\}^T$）とおくと、式(1)は式(2)のように書き換えることができる。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M_{uu}} & \mathbf{M_{uk}} \\ \mathbf{M_{ku}} & \mathbf{M_{kk}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{\ddot{u}_u} \\ \mathbf{\ddot{u}_k} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C_{uu}} & \mathbf{C_{uk}} \\ \mathbf{C_{ku}} & \mathbf{C_{kk}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{\dot{u}_u} \\ \mathbf{\dot{u}_k} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K_{uu}} & \mathbf{K_{uk}} \\ \mathbf{K_{ku}} & \mathbf{K_{kk}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{u_u} \\ \mathbf{u_k} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{Bmatrix} \tag{2}$$

さらに、式(2)のうち未知節点に関する力の釣り合いのみを取り出すと式(3)を得る。

$$\mathbf{M_{uu}\ddot{u}_u} + \mathbf{C_{uu}\dot{u}_u} + \mathbf{K_{uu}u_u} = -\mathbf{M_{uk}\ddot{u}_k} - \mathbf{C_{uk}\dot{u}_k} - \mathbf{K_{uk}u_k} \tag{3}$$

ここで、Clough・Penzien[20]は仮想の静的変位を導入して、式(3)の右辺を地動変位と速度による外力項に変形している。ただし、Clough・Penzien の方法では、仮想の静的変位計算に剛性マトリクスの逆行列の計算を行うなど、同一加速度をモデル全体に入射する場合に比べて、計算量、記憶領域などの大きな計算コストが新たに必要となる。田中ら[21]は杭基礎などの地中構造物の多点入力問題を対象にして、剛体変位を導入して相対変位に関する定式化を行い、Clough・Penzien の方法に比べて大幅な計算量の低減を行った。しかし、広域な震動問題を取り扱う有限要素法においては、基盤での地震動に位相差があり、剛体変位が明確でないため田中らの手法は導入できない。そこで、本研究では式(3)の運動方程式をそのまま逐次積分する。これにより汎用性と計算コストの省力化が図られる。ただし、本研究では粘性境界を使用するため、式(3)における $\mathbf{M_{uk}}$=$\mathbf{K_{uk}}$=$\mathbf{0}$ で、$\mathbf{C_{uk}}$ は粘性境界の粘性項である。また、右辺の加振点の絶対加速度、速度、変位には 2.1(3) 項で示す運動方程式の時間積分法（Newmark のβ法）の関係が成立すると仮定した。

(2) 堆積地盤の非線形モデル

堆積地盤は土の非線形性を考慮し、式(4)の Drucker-Prager の降伏関数、関連流れ則に従う弾性－完全塑性体を採用する。

$$f = \sqrt{J_2} - \alpha I_1 - k \qquad (4)$$

ここに、I_1 および J_2 は、応力の第 1 不変量、偏差応力の第 2 不変量を表し、α、κは図 1 に示すように Mohr-Coulomb の破壊基準を 2 次元π平面で内接するように設定する。すなわち、α、κはそれぞれ次式で与えられる。

$$\alpha = \frac{2\sin\phi}{\sqrt{3}\cdot(3-\sin\phi)}、\quad k = \frac{6C\cdot\cos\phi}{\sqrt{3}\cdot(3-\sin\phi)} \qquad (5)$$

ここで、C、ϕ はそれぞれ、土の粘着力と内部摩擦角を表す。

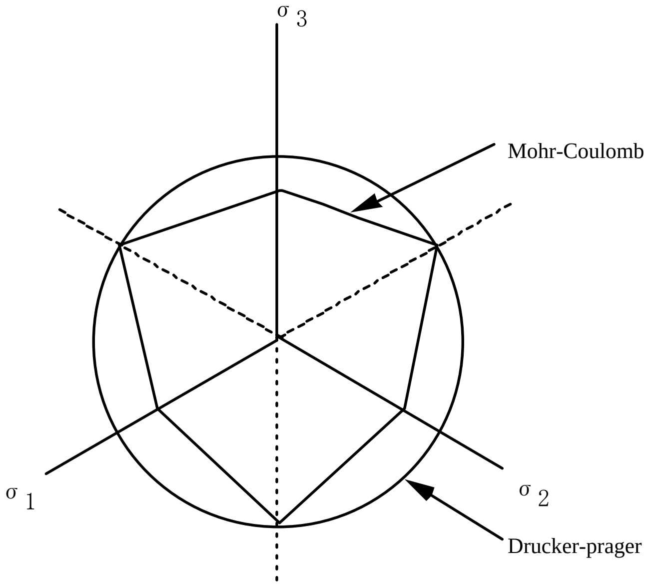


図 1　二次元π平面における Mohr-Coulomb と Drucker-Prager の破壊基準

(3) その他の解析条件

運動方程式の時間積分は Newmark のβ法（β=1/4）を採用し、解析時間間隔は 2/1,000 秒、継続時間 20 秒（強震動予測結果の 5 秒～25 秒の部分を使用）とする。減衰は Rayleigh 減衰を用いる。

京都盆地の地下構造に関する調査（京都市：平成 15 年 3 月）では、堆積層の Q 値を 2001 年 8 月 25 日に発生した地震を対象にしてシミュレーションを行い推定している。その結果、Q=Vs/15～Vs/30 の場合でよく対比していると報告がなされている。本解析では堆積層の Q 値(=1/2h)を S 波速度の 1/30 と設定する。たとえば、Vs=300m/s では減衰 h は 5%となり、Rayleigh 減衰で 1Hz～10Hz において減衰が 5%前後になるように 1.5Hz、6Hz で 5%に設定した。

また、本研究では約 50 万節点に及ぶ大規模な 3 次元非線形地震応答解析を行うため、膨大な計算機資源と計算時間が必要となる。そこで、解析に際して以下の 3 つの手法を導入する。

①共役勾配法[22)]

Rayleigh 減衰を用いた 3 次元有限要素法による地震応答解析では、未知ベクトルに対する係数マトリクスが非常に疎となる特性がある。このため、連立 1 次方程式の解法として、2 次元解析などで代表的に使用されているガウスの消去法ではなく、疎な正定値対称行列に対して計算機資源（メモリ、外部記

憶装置）を大幅に低減可能で、かつ、並列計算に適した共役勾配法を採用する。
②修正 Newton-Raphson 法
　各タイムステップにおける剛性マトリクス作成に要する計算時間を削減するため、復元力の非線形性の計算は、修正 Newton-Raphson 法を採用し、タイムステップごとに不釣合い力に対する収束計算を行う。
③並列計算
　花折断層の活動による京都盆地の強震動予測計算に際して、上記の計算条件で地表面上の 1 辺を 200m とした場合には、節点数が 10 万強でワークステーション（Athlon64 64bit mode）による計算に約 1 週間要した。したがって、さらに予測精度を高めるために 1 辺が 100m メッシュでモデル化した場合には、節点数は 50 万弱で 1 回の計算に 1〜3 ヶ月要し、十分な検討が困難となるため、本研究では京都大学学術情報メディアセンター、HPC2500 の 64CPU を使用し、自動並列化による並列計算を導入する。これにより計算が約 1 週間で終了した。

2.2京都盆地モデル

　京都市は反射法、屈折法地震探査や微動アレイ探査等を実施し、京都盆地の 3 次元地質構造モデル、地盤物性モデルを作成している[23)]。本研究ではこれらのモデルに宇治市などの地盤データを組み込み、丹波層群に属する基盤岩（頁岩，砂岩，チャートなどよりなり、S 波速度は，岩質によって変化するがおおむね Vp=4〜5km/s，Vs=1〜3km/s）に達するまでの堆積層（大阪層群、段丘堆積層、沖積層）で構成される京都盆地モデルを作成した。ただし、計算機資源および計算時間の縮減のため、京都盆地全域（東西 20km、南北 35km）のうち、男山の南方 3km までの堆積層をモデル化し、南側の境界部の基盤岩の標高を地表まで急激に立ち上げた。このモデル化は、京都市中心部、清水寺近傍以北の地域には約 10km 以上の距離があり、それらの地域における主要動に与える影響は小さいと想定されるが、本研究結果を宇治川南部地域の地震動として採用する場合には注意が必要である。京都盆地モデルの基盤岩の等高線を解析メッシュのイメージ図とともに図 2 に示す。作成したモデルは、水平面上で東西および南北方向

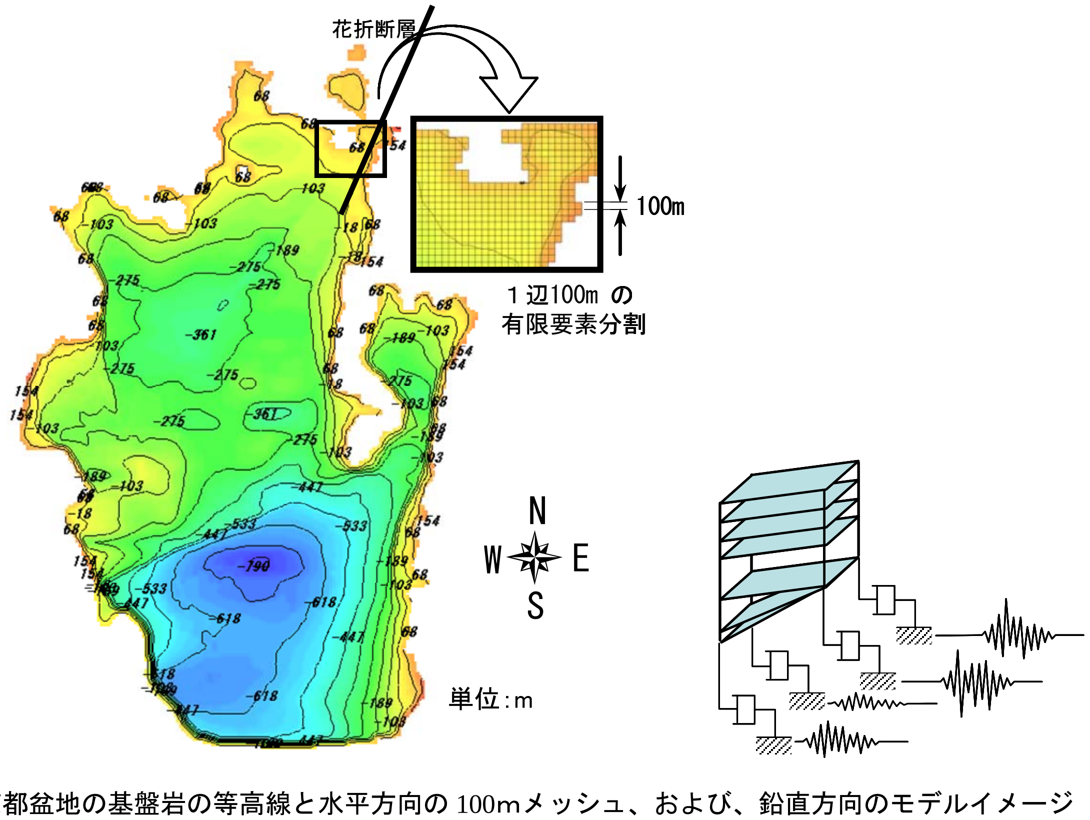


図 2　京都盆地の基盤岩の等高線と水平方向の 100mメッシュ、および、鉛直方向のモデルイメージ

に 100m ごとに分割した 1 辺 100m の正方形メッシュで、地表面から鉛直方向に岩盤まで厚さ 25m で分割する。ただし、地表面直下の 25m は表層地盤の S 波速度分布を考慮して、5m、5m、5m、10m の厚さに再分割した。ここで、S 波速度は表層付近で 200m/s 程度、堆積層の下半分で 700m/s 以上であるであるから、鉛直方向については弾性状態で 6Hz 程度以下の精度が保証される。一方、計算資源の制約の関係で、水平方向のメッシュサイズが 100m であり、この方向へ伝播する波の解析対象周波数は低くなっている。すなわち、本解析結果が水平方向に伝播する高周波数成分を若干過少に評価しているものと想定される。ただし、別途行った 50m と 100m メッシュによる線形解析の解析結果は大きな違いが見られなかった。

このようにして作成された 3 次元有限要素モデルは主として 6 面体アイソパラメトリック要素で構成され、節点数が 466,936、要素数が 435,381 である。解析モデルの地表面層の S 波速度分布、密度分布を図 3、図 4 に、京都盆地のほぼ中央を南北に貫通する堀川通り沿いの南北断面の S 波速度分布を**図 5** に示す。

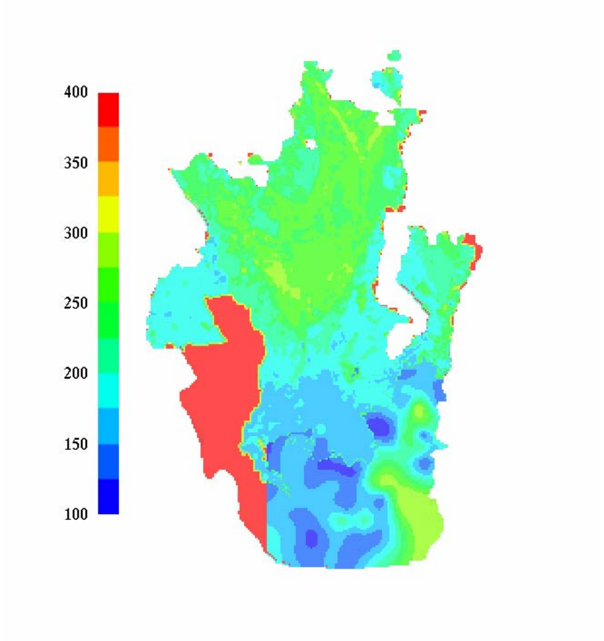


図 3　地表層地盤の S **波速度分布（単位**：m/s）

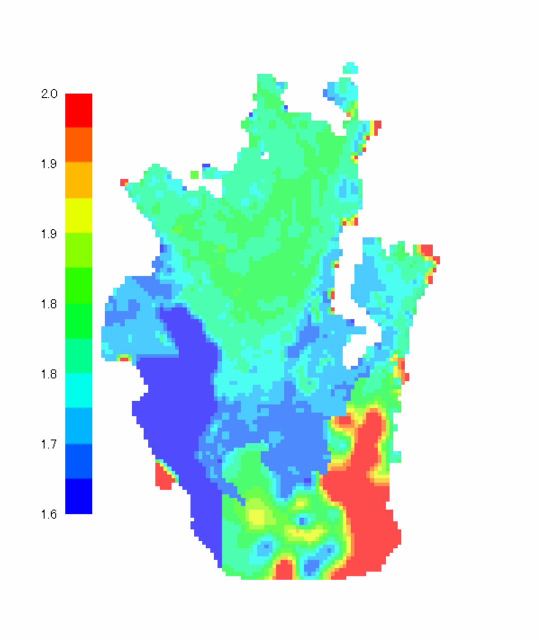


図 4　地表層地盤の密度分布（単位：t/m^3）

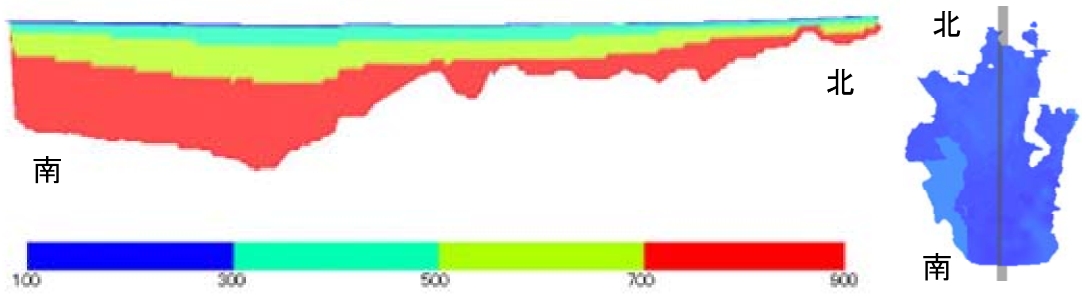


図 5　京都盆地のＳ波速度の概要（堀川通り沿い南北断面，単位：m/s）

図 2 に示すように、京都盆地の基盤岩は宇治川断層付近で落差約 150m と急激に深くなっており、旧巨椋池干拓地付近が約 780m で最深となっている。一方、宇治川以北については比較的良好な地盤構成

であり、図 3 に見られるように、表層地盤の S 波速度も大きくなる傾向にある。また、図 5 に示すとおり地表面付近以外は S 波速度が 300m/s 以上であり、盆地の北方では地下数 m の浅い所まで基盤岩が上昇している。

ただし、京都盆地モデルは六面体を主とした 1 次要素により構成し、モデル底面部については五面体、四面体要素を使用した。質量マトリクスは整合質量マトリクスとしている。また、盆地モデルの底面は堆積層直下に底面粘性境界を導入する。以上により、京都盆地モデルは堆積層のみのモデル化であり、側方は岩盤が地表に露頭する。

2.3 基盤入射波

前述のように、京都市の第 3 次地震被害想定では、京都盆地周辺の 6 つの活断層について、3 次元差分法と統計的グリーン関数法とのハイブリッド法に基づいて広帯域の地震動を予測している。本研究では、このうち、京都駅周辺および歴史遺産の集積度の高い東山山麓に大きな影響を及ぼすと想定される花折断層の活動を想定として、強震動予測を行う。具体的には、京都盆地の基盤岩における京都盆地モデル底面の各 100m メッシュに対して、京都市の被害想定で策定された節点ごとに異なる基盤入射波 3 成分(2E)を粘性境界（図 2 参照）を介して入力する。京都市の地震被害想定で使用された花折断層のアスペリティ配置と破壊開始点を図 6 に、断層諸元を表 1 に示す。また、上記の被害想定において用いられた基盤入射波の水平、鉛直各成分の最大値分布を図 7 に示す。

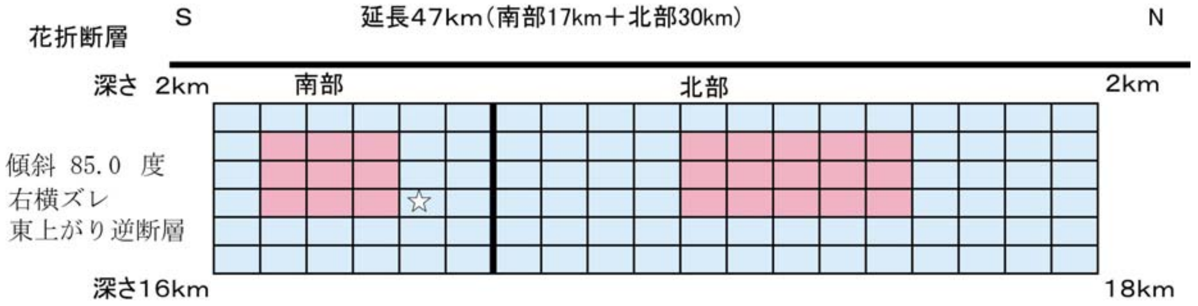
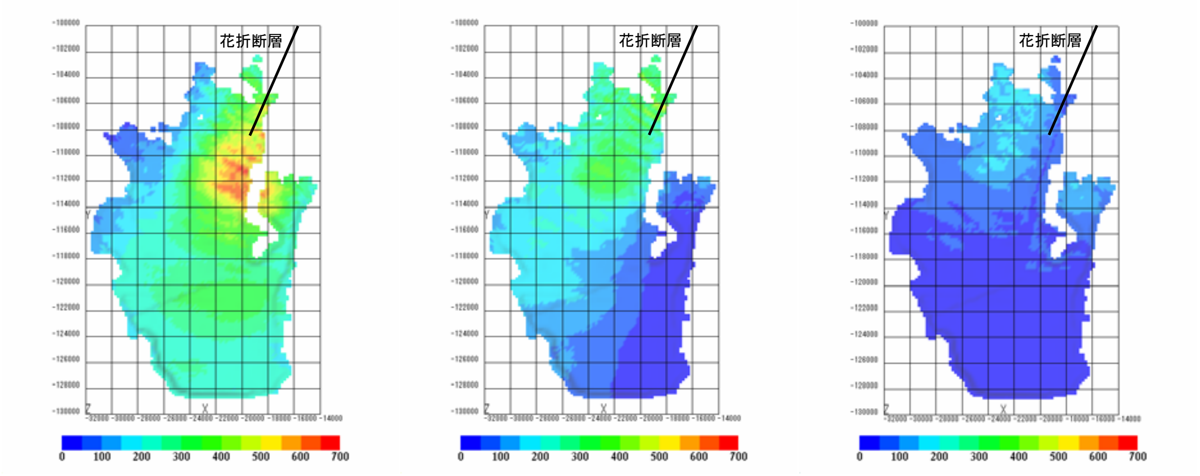


図 6　花折断層のアスペリティ配置と破壊開始点 [14)]

表 1　花折断層の震源パラメータ [14)]

	北部	南部
長さ	30.0km	16.5km
断層幅	16.1km	14.1km
面積	483km^2	233km^2
平均応力降下量	36.3 bar	
想定される総地震モーメント	2.85E+26 dyn・cm	
モーメントマグニチュード	6.9	
マグニチュード	7.5	
平均スベリ量	124 cm	
アスペリティ領域応力降下量	172 bar	
アスペリティ領域平均スベリ量	270 cm	
震源モデルのアスペリティ面積	93km^2	58km^2
モーメント	8.87E+25dyn・cm	4.27E+25dyn・cm
ライズタイム	1.93sec	1.52sec

図 7 から分かるように、基盤入射波は南北方向よりも東西方向が卓越しているが、これは花折断層がほぼ南北方向の走行を持つ右横ずれ断層であることによるものである。



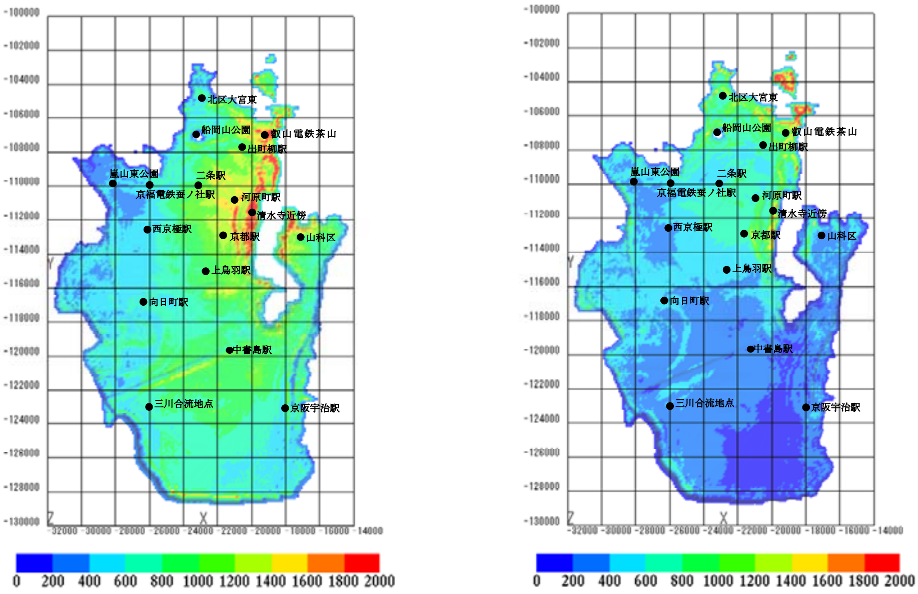
(a)　EW 成分　　(b)　NS 成分　　(c)　UD 成分

図 7　解析モデルにおける基盤入射波(2E)の最大値分布(Gal)[14)]

3. 解析結果

3.1　強震動分布

上述のような花折断層の活動による地震波動が京都盆地基盤に作用した場合について、3 次元非線形解析による各メッシュ位置での地表面での最大加速度の分布図を図 8 に、算定した計測震度を図 9 に示す。また、比較のため、京都市第 3 次被害想定による計測震度を図 10 に示す。ただし、本解析では、地震応答解析の結果からフィルター処理が必要な高周波応答が見られないため、フィルター処理を行っていない。また、京都市の被害想定における基盤岩での入射波は、地盤の非線形特性を Hardin-Drnevich モデルとした 1 次元地震応答解析により算定されたものである。



a)　EW 成分　　b)　NS 成分

図 8　地表面の最大加速度分布(Gal)

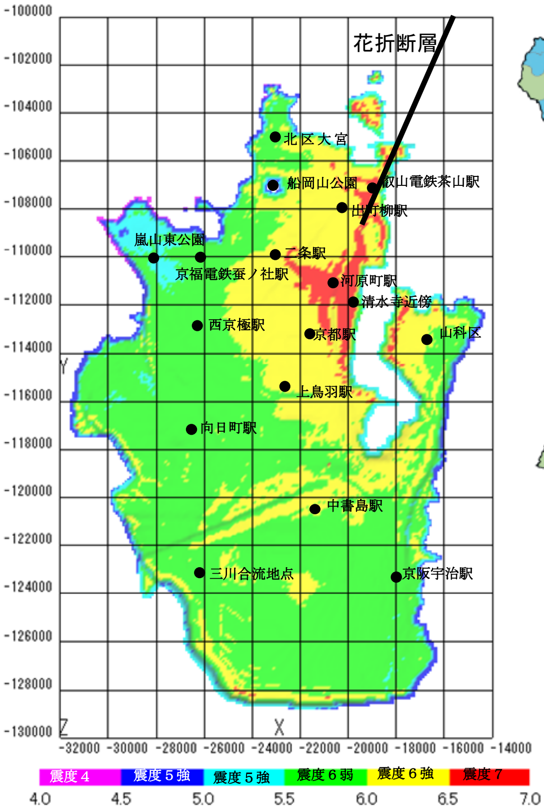


図 9　花折地震による計測震度

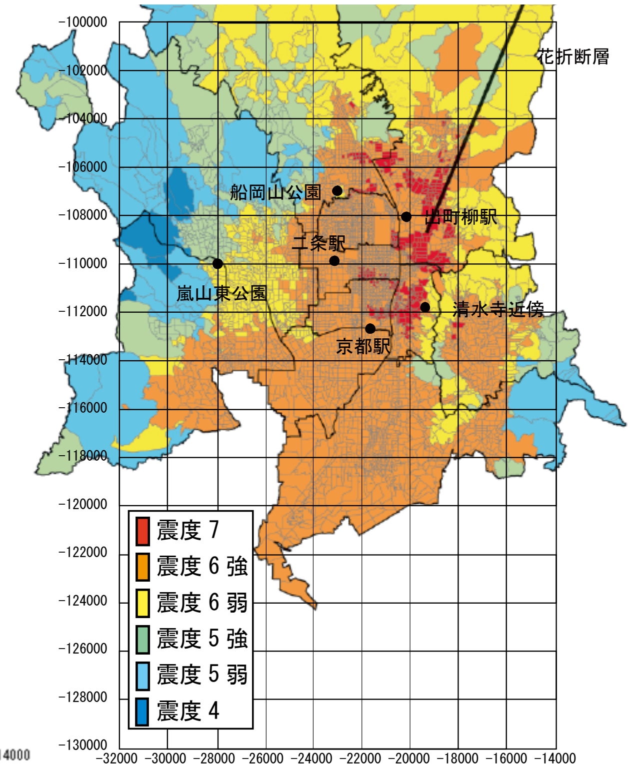


図 10　京都市被害想定による計測震度
（文献 14 に加筆）

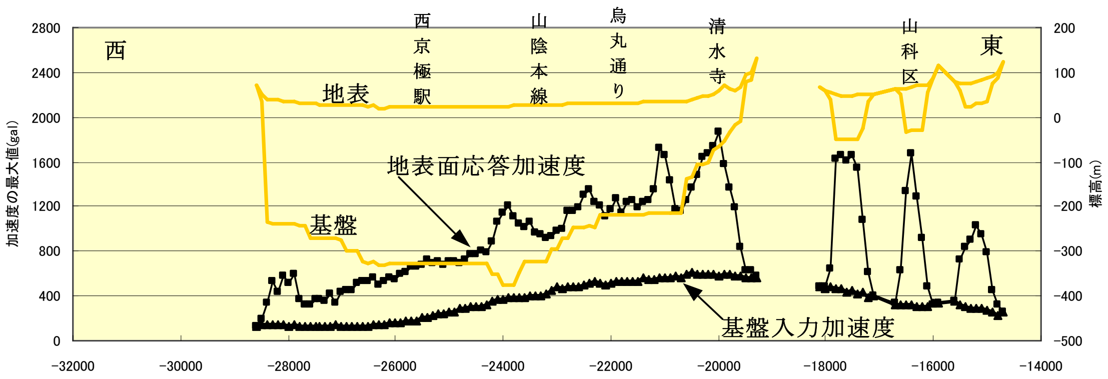
図 9 より、震度の大きなのは山麓部や巨椋池近辺など、地下構造の急変するところである。これは 1995 年の阪神淡路大震災に際して、震災の帯と称される地域が六甲山麓から平地部への遷移領域であったのと同じ理由によるものであり、この現象がここでも再現されている。

この結果によると、京都盆地の東北部において計測震度が 7 に達する部分が多く見られるが、これは花折断層が盆地の東北隅から盆地に入り、東山山麓から南方に延びることによるものである。そして、この地域は上述のように山麓であることから、堆積厚が急変することによる増幅効果とが相俟っていることが原因であろう。

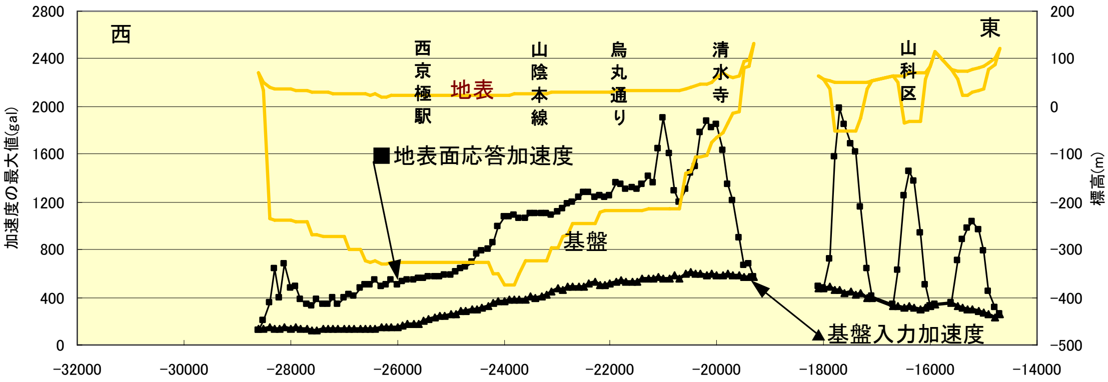
一方、盆地の西、特に嵐山近辺では計測震度は 5 程度であり、これは被害があったとしてもそれほど大きくはならないと判断される揺れである。このように、花折断層のような内陸の断層の活動による地震では、断層の近辺では強い揺れを示すが、断層線から 10km も離れればそれほど強い揺れにはならず、断層近辺では激甚な揺れを伴うが、その範囲は限定的であるという内陸の活断層の特徴をよく表しているものである。

ここで、図 10 の京都市第 3 次被害想定の計測震度分布と比較すると震度 7 の清水寺近傍から二条駅に至る領域、出町柳付近の領域の分布状況が被害想定と異なっており、特に京都駅の南側の震度 6 強の分布が被害想定よりも著しく小さくなっていることが分かる。

上述のように、短周期成分の卓越する内陸の活断層による地震動では、地下構造の急変部で揺れが増幅されることが知られているが、京都盆地全体についてのこの現象を示したのが図 11 である。図には参考のため、地盤の初期せん断波速度をもつ線形弾性体でモデル化した解析結果も示す。



a)　非線形解析



b)　線形解析

図 11　花折断層による基盤岩と地表面の震動振幅

図 11 では、山麓から盆地内部に至る遷移領域においての揺れがその周辺地域より卓越している。1 次元解析では遷移領域でのこのような地震動増幅はなく、ほぼ堆積層厚に依存した増幅結果が得られると想定される。したがって、京都盆地全体の耐震対策の策定においては、こうした地下構造の急変することの影響を加味することが是非とも必要なことを示唆している。これは、京都盆地全体の 3 次元解析において、基盤岩からの入力と堆積地盤の震動との相互作用によるものであり、図 10 でも示したように 1 次元解析では考慮されえない現象であると考える。

また、b)の線形解析の結果と比較すると各領域における地震動の増幅傾向は同じであるが、非線形解析では土の非線形特性の影響で加速度の最大値が全体的に小さくなることが見て取れる。

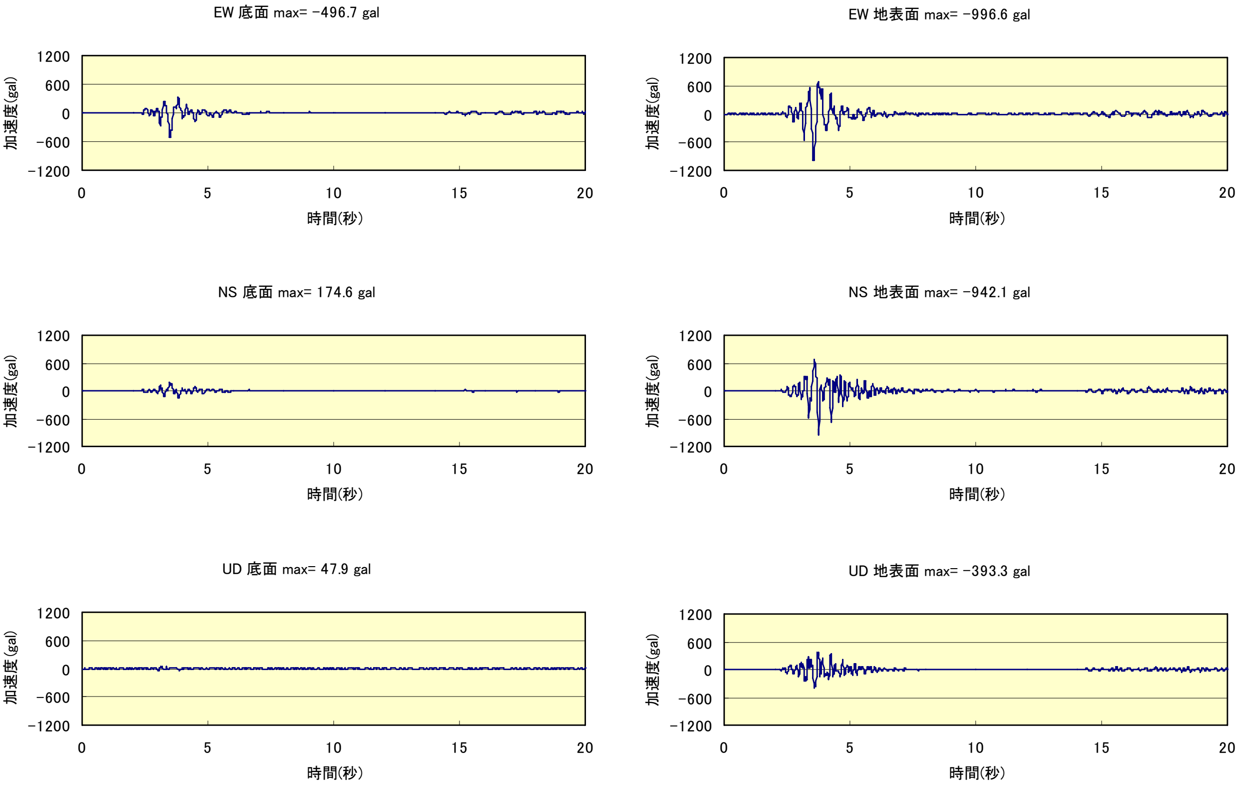
3.2　清水寺周辺

次に、東山山麓に位置する清水寺に着目する。**図 12** に示す清水寺近辺の基盤岩と地表面での加速度波形を図 13 に、その加速度軌跡を図 14 に示す。

図 14 より、基盤岩においては東西（EW）成分が卓越しているが、これは上述のように、花折断層の走行がほぼ南北方向の横ずれ断層であることによるものである。一方、地表面での軌跡においては、南北方向の成分が付加され、東西成分よりも南北成分が増幅されて、最大振幅においてはほぼ同程度に達している。換言すれば加速度の主軸が 15～20 度程度回転することを意味しているが、これは現地の地形条件に因るものである。

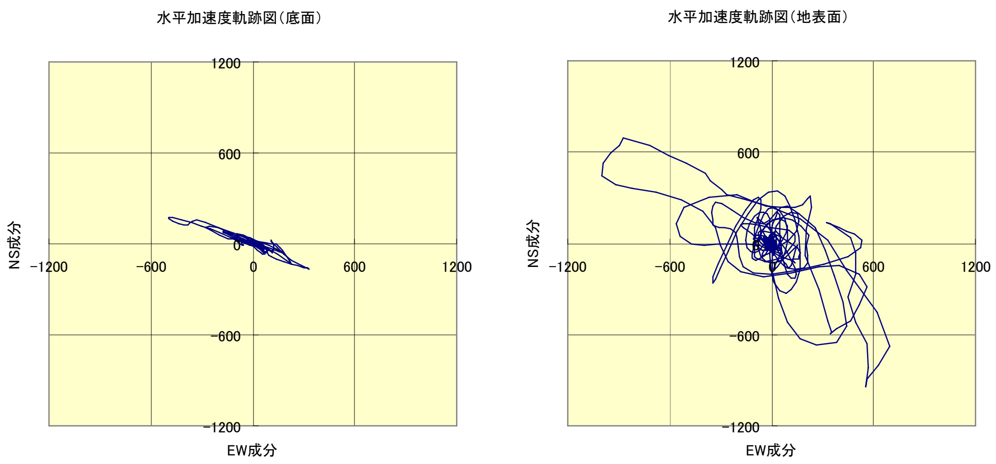
さらに、清水寺近辺での加速度波形に基づいて、線形加速度応答スペクトルを図 15 に示す。

図 12　清水寺近辺の加速度参照位置図



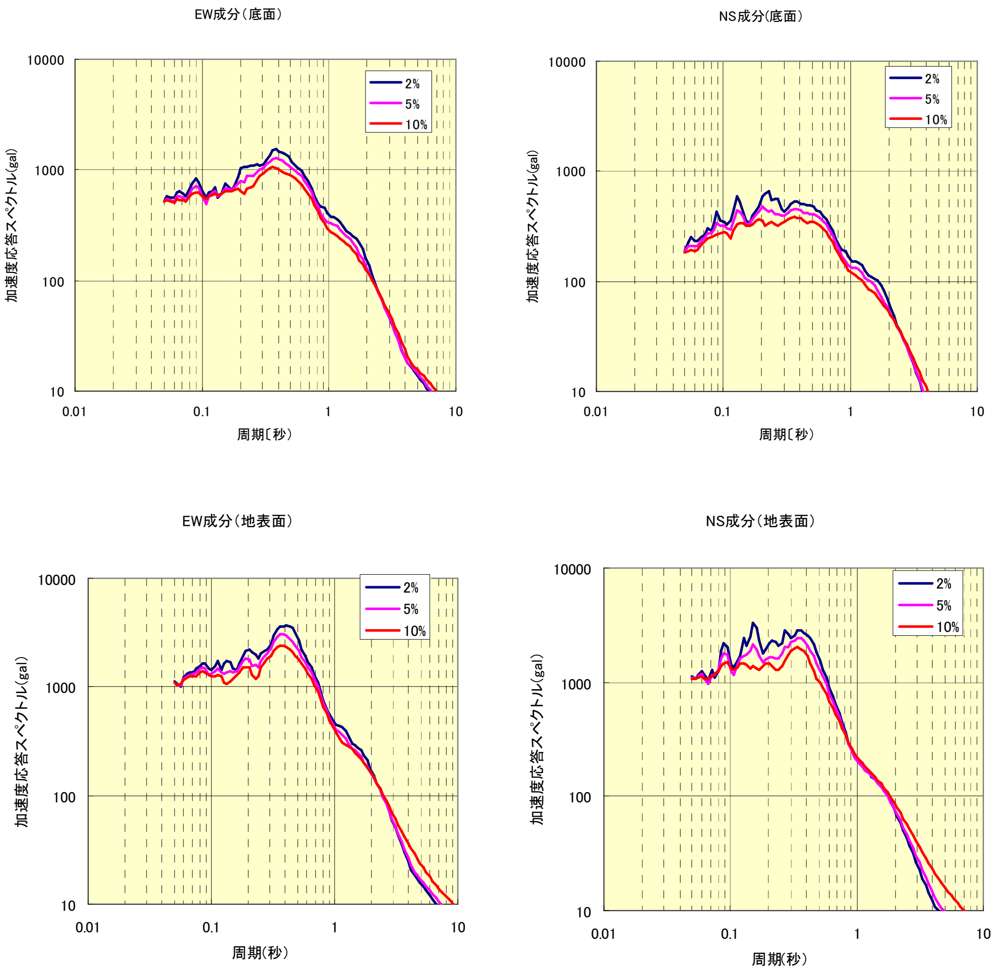
a)　基盤　　　　　　b)　地表面

図 13　清水寺近傍の地表面での加速度波形



a)　基盤岩　　　　　　　　　　　　　b)　地表面

図 14　清水寺近辺での加速度の軌跡



a)　EW 成分　　　　　　　　　　　　b)　NS 成分

図 15　清水寺周辺での基盤と地表面の加速度応答スペクトル

図 15 によると、EW 成分と NS 成分の時刻歴の最大値はいずれも 1 G 程度であるが、スペクトルの形状には差異が認められる。しかしながら、それは短周期成分であり、0.7 秒程度以上の周期成分に対しては増幅効果は小さく、規模の大きな建造物や施設に及ぼす影響は大きくないことが予想される。

4. まとめ

行政目的のために京都市によって行われた京都盆地の震動予測においては、花折断層の活動による開放基盤岩での波動が算定されている。一方、基盤岩から上方の堆積地盤の震動解析には 1 次元の線形応答解析が用いられている。

本研究は COE プロジェクトの一環をなすものとして行われており、特定の建造物の耐震安全性の検討などに入力地動を提供したり、地域計画のための基礎資料としても用いられることから、より現実的で実際に起きるであろう現象を忠実に取り入れた解析が必要となる。そこで、堆積地盤の震動解析において重要な働きをすると考えられる堆積地盤の 3 次元波動伝播と土の非線形性などの項目を取り入れた解析を実施した。

最も重要な要因は京都盆地の山麓に多くの文化遺産が展開するのが京都盆地の特徴であるから、こうした地域での震動現象に大きな影響を及ぼすと考えられる山地から平地への遷移領域で見られる特異な挙動の解析が可能でなければならない。そのためには 3 次元解析が必須であると同時に、高い振動数領域までの解析を可能にするためには要素のサイズを小さくすることが必要となるが、これは同時に膨大な要素数を要求することになる。

したがって、このような問題を解決するには単に要素のサイズを小さくするのみならず、無限ではない計算機資源の下での、より信頼度の高い計算法が開発されねばならない。本研究はこうしたいくつかの困難な問題の解決方法を提案しつつ、今後の京都盆地での文化遺産防災に対して有用な資料を提供した。

また、本解析例においても文化遺産の集積密度の大きい東山山麓をはじめ、計測震度 7 の領域が京都市の第 3 次被害想定の計測震度分布では小さく評価されている。すなわち、基盤からの 1 次元の地震応答解析による強震動評価は危険側であり、貴重な文化財の耐震性評価に用いる地震動として不十分であることが示された。

ただし、本解析例では計算資源の制約により、鉛直方向の解析メッシュ厚 5～25m に対し、水平方向は 100m ピッチを採用した。そのため、水平方向に伝播する地震動の解析対象周波数が鉛直方向に比べて低く、解析結果における水平方向伝播の高周波数成分が過小評価されている可能性がある。また、京都市の被害想定で採用された 1 次元解析の Hardin-Drnevich モデルは、本解析の完全弾塑性モデルよりも土の動的せん断変形特性をより近似していると考えられる。今後、計算機の能力向上するに従い、より細かなメッシュ分割が解析結果に及ぼす影響についての検討、および、より土の非線形特性を反映した構成モデルを用いた地震動予測を進めたい。

謝辞

本研究を進めるにあたり、京都市には花折断層の活動による京都盆地基盤岩における入射波を提供いただいた。深部地盤情報は京都市と関西地震連絡協議会のデータベースを利用した。ここに関係各位に対し謝意を表す。

参考文献

1) 纐纈一起：不整形地盤における地震動、土木学会論文集、No.437、1991 年、pp.1-18.
2) 石井武司、室野剛隆、西村昭彦：表層地盤の地震動に及ぼす基盤形状の影響評価、第 54 回土木学会年次学術講演会講演概要集、第 1 部 B、1999 年、pp.190-191.

3) 神山眞、佐藤勉、鈴木猛康：不整形地盤の地震応答における短周期表面波の工学的重要性に関する研究、土木学会論文集、No.682、2001 年、pp.225-243.
4) 土岐憲三、後藤洋三、江尻譲嗣、澤田純男：兵庫県南部地震の震源特性と地盤震動特性、土木学会誌、Vol.80、No.9、1995 年、pp.32-43.
5) 入倉孝次郎：「震災の帯」をもたらした強震動、科学、Vol.66、No.2、1996 年、pp.86-92.
6) 源栄正人、永野正行：深部不整形地下構造を考慮した神戸市の地震動の増幅特性解析－兵庫県南部地震における「震災の帯」の解釈－、日本建築学会構造系論文集、No.488、1996 年、pp.39-48.
7) 末冨岩雄、吉田望、澤田純男、土岐憲三：地震動の上限値と地盤のせん断強度の関係、土木学会論文集、No.654、2000 年、pp.195-206.
8) 田蔵隆、清水勝美、佐藤正義、広瀬利光、横田治彦：地盤の非線形地震応答特性に関する研究、清水建設研究報告、Vol.47、1988 年、pp.25-45.
9) 吉田望：大振幅地震動と地盤非線形化の問題、地震ジャーナル、No.28、1999 年、pp.66-74.
10) 岩田知孝：兵庫県南部地震と地盤震動－強震動と地盤構造－、地盤震動シンポジウム、Vol.23、1995 年、pp.29-38.
11) 江尻譲嗣、後藤洋三：基盤不整形性の影響の設計震度スペクトルの導入に関する基礎的検討、土木学会論文集、No.501、1994 年、pp.173-182.
12) 竹宮宏和、石山基、Luan Maotian：不整形沖積地盤の 2 次元非線形解析、第 21 回地震工学研究発表会、1991 年、pp.69-72.
13) Tokida,K et. al : Effects of geological irregularities on ground motion characteristics, 10WCEE, 1992, pp.669-672.
14) 京都市：京都市第 3 次地震被害想定報告書、2003.10.
15) 堀宗朗、市村強、中村光、若井明彦、海老澤健正、山口直也：都市内全構造物の地震応答シミュレーションに関する基礎的研究、応用力学論文集、Vol.7、2004 年、pp.132-140.
16) T. Ichimura and M. Hori : Strong ground motion prediction using macro-micro analysis method, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.35, 2006, pp.395-417.
17) T. Ichimura and M. Hori : Macro–micro analysis method for wave propagation in stochastic media, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.35, 2006, pp.419-432.
18) 山田岳峰、市村強、大保直人、佐茂隆洋、池田清宏、堀宗朗、大規模三次元 FEM 解析によるトンネルジャンクションの地震時挙動評価、応用力学論文集、Vol.7、2004 年、pp. 909-916.
19) 平野敏彦、長沼敏彦、西岡勉、鈴木直人、藤野秀隆：地域特性を考慮した設計地震動の検討及びシールドトンネル縦断方向の耐震検討、土木学会地震工学論文集、Vol.28、2005 年、CD-ROM.
20) R. W. Clough and J. Penzien : Dynamics of structures, McGraw-Hill Kogakusha, Ltd., 1975.
21) 田中勉、吉田望、亀岡裕行、長谷川豊：地中構造物の多入力解析、第 38 回土木学会年次学術講演会講演概要集、第 1 部、1983 年、pp.49-50.
22) 戸川隼人：共役勾配法、シリーズ新しい応用の数学 17、教育出版、1977 年.
23) 京都市：平成 14 年度地震関係基礎調査交付金－京都盆地の地下構造に関する調査成果報告書、2003 年.

（受理：2007年1月30日）
（掲載決定：2007年7月30日）

Strong Ground Motion Prediction based on 3-Dimensional Non-elastic FEM in Kyoto Basin Area from a Scenario Earthquake of the Hanaore Fault

TOKI Kenzo[1], KISHIMOTO Hideaki[2], FURUKAWA Hideaki[3] and SAKAI Hisakazu[4]

1) Honorary Member, Professor, Ritsumeikan University, Dr. Eng.
2) President, Nippon Computer Consultant Co., Ltd.
3) Manager, Nippon Computer Consultant Co., Ltd.
4) Member, Associate Professor, Hiroshima Institute of Technology, Dr. Eng.

ABSTRACT

We conduct a three-dimensional earthquake response analysis to evaluate the ground motion in the Kyoto basin from a scenario earthquake of the Hanaore Fault, in order to perform the seismic estimation of important cultural assets in the city. The analysis is based on a non-linear finite element method to calculate the non-elasticity of soil, and considers the multi-input of earthquake motion at the bedrock, and the wave propagation through an irregular underground structure. The results show that it is necessary to consider the source ground motion, wave propagation and soil response at each site simultaneously, for the purpose of the estimating the seismic ground motion on the surface of basin structure like Kyoto.

Key Words: earthquake strong motion prediction, 3-dimensional finite element analysis, geological non-elasticity, multiple input analysis, wave propagation