

福岡県西方沖地震における 建物被害集中エリアの地盤震動解析

大塚久哲¹・古川愛子²・矢野恵美子³

¹九州大学大学院 工学研究院建設デザイン部門 教授 (〒812-8581福岡市東区箱崎6-10-1)

E-mail:otsuka@doc.kyushu-u.ac.jp

²九州大学大学院 工学研究院建設デザイン部門 助手 (〒812-8581福岡市東区箱崎6-10-1)

E-mail: furukawa@doc.kyushu-u.ac.jp

³九州大学大学院 工学府建設システム工学専攻 修士課程 (〒812-8581福岡市東区箱崎6-10-1)

E-mail:e-yano@doc.kyushu-u.ac.jp

2005年3月20日午前10時53分頃、福岡県西方沖を震源とする気象庁マグニチュード7.0の地震が発生し、福岡市中央区・東区と福岡県前原市などで震度6弱の揺れを記録した。この地震により、玄界島をはじめ、港湾施設・道路橋、建築物などの一部が被害を受けた。福岡市中央区の建物被害に関しては、天神地区の建物については、構造本体が損傷を受けた建物は確認されなかったのに対し、大名・今泉地区においては構造本体に損傷を受けた建物も多く、2つのエリアで被害に有意な差が確認された。本報告では、大名・今泉地区において建築物の被害が大きかった原因を検証するため、3次元有限要素法を用いた地盤の地震応答解析を実施した。

Key Words : *Fukuoka-ken seiho oki earthquake, structural damage, topographic effect, irregularly-shaped soil layer, 3D FEM*

1. はじめに

2005年3月20日午前10時53分頃、福岡県西方沖(北緯33.9度、東経130.2度、福岡市の北西約27kmの玄界灘)を震源とする地震が発生した。震源の深さは9km、地震の規模はマグニチュード(M)7.0と推定されている¹⁾。この地震により、福岡市中央区・東区と福岡県前原市、佐賀県みやき町で震度6弱、福岡県久留米市や長崎県壱岐市などで震度5強の揺れを記録したほか、九州地方を中心に近畿から東海地方までの広い範囲で震度1以上を観測した。気象庁によると、震源はこれまでに知られていない海底の断層がずれたことによる内陸直下型地震である。南北方向に引っ張る力と東西方向から押す力が震源付近で働くことによる左横ずれ断層であり、北西から南東方向にかけて地盤がずれたと推定されている。

自治省消防庁の調べでは²⁾、2005年3月30日現在で、福岡県およびその隣接県を含めた人的被害は、死者が1名、負傷者が771名である。住家被害は、全壊が443軒、半壊が1000軒、一部破損が3643軒である。避難者数は、地震発生翌日の3月21日が

最大で、総数2877名にのぼった。

九州で震度6弱以上の地震を観測したのは、1997年5月の鹿児島県北西部地震の際に、鹿児島県川内市で震度6弱を観測して以来である。福岡県では1898年8月に糸島地方を震源とするM6級の地震が起きた記録があるが、震度6弱を記録したのは、観測を開始した1890年以降初めてとされている。

今回の地震では、震源地に近い玄界島(福岡市西区)では非常に多くの住家が損壊し、島民706人のうちほぼ全員が船で福岡市の避難所等に避難した。埋立地を中心に各地で液状化現象も発生しており、港湾施設に関しても、須崎埠頭や中央埠頭の一部などにおいて大規模な被災を受けている。

また、福岡市中央区の建物被害に関しては、天神地区の建物については窓ガラスが多数破損して落下した被害があったが、構造部材が損傷を受けた建物は確認されなかったのに対し、大名・今泉地区においては構造部材に損傷を受けた建物も多く、2つのエリアで被害に有意な差が確認された。既往文献³⁾によると、福岡の基盤等高線は大名・今泉地区で等高線が密となる傾斜地盤であり、ほぼ南西の方向から北東の方向に傾斜している地層構成となっている。

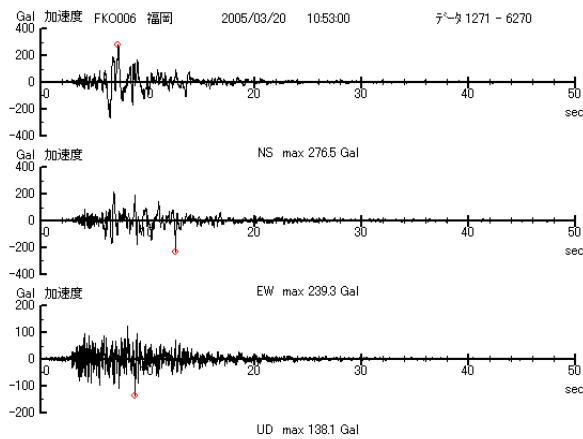


図 - 1 K-net 福岡での加速度波形

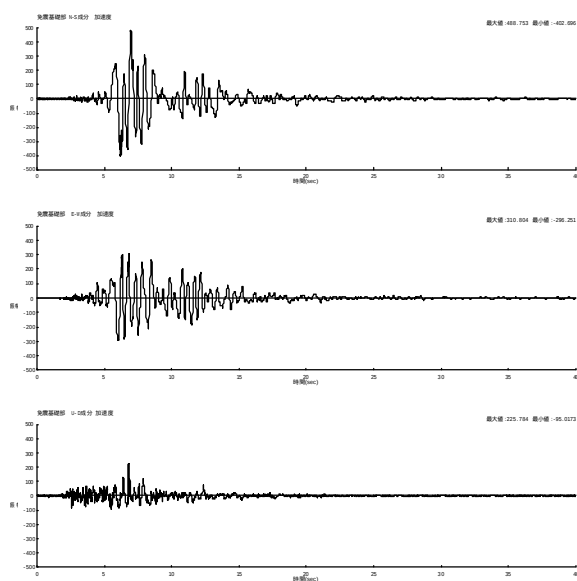


図 - 2 (株)建設技術研究所での加速度波形

過去の地震において、地盤の不整形性に起因すると思われる被害例は多く確認されている。国内では、1995 年兵庫県南部地震において所謂「震災の帯」と称される被害が集中したエリアでは、不整形な基盤のエッジから発生した波動⁴⁾や堆積層の側方から発生した表層波と下方からの直達波の相互干渉⁵⁾が被害を大きくした一因ともされている。海外の事例では、1985 年のメキシコ地震においては、厚く堆積した軟弱地盤上にあるメキシコ市において地震動が増幅され、震央から 350km 以上も離れているにも関わらず非常に大きな被害が発生した⁶⁾。

本報告では、大名・今泉地区において建築物の被害が大きかった原因を検証するため、3 次元有限要素法を用いた地盤の地震応答解析を実施した。

2. 福岡市中央区の市街地周辺の被害集中エリアと地震動記録および地盤構造の関連

(1) 被害集中エリアと地震波形について

天神 5 丁目 1-23 に設置されている防災科学技術研究所の強震ネットワーク (K-NET) による観測結果 (地表面地震動) の最大値は南北方向 277gal, 東西方向 239gal であった。観測波形を図-1 に示す。K-net 観測点・福岡 FKO006 のある天神付近の建物被害を調べたところ、柱などの構造物本体に損傷が発生した被害はなく、いずれも 2 次的な部材の損傷に留まっていた。

一方、大名 2 丁目 4-12 所在の (株) 建設技術研究所九州支社 (免震建物) の免震基礎部 (地表面相当) の最大加速度は南北方向 489gal, 東西方向 310gal であった。観測波形を図-2 に示す。ちなみに同一地点での地下 - 65m における基盤内での最大加速度は南北方向 203gal, 東西方向 124gal であった。大名など、警固断層近傍では、部分損傷のみならず本体部分が損傷した建物も多数あり、被害を受けた建物が集中しているエリアである。

この 2 観測点、すなわち K-net の観測点・福岡 FKO006 と免震オフィスビルとの距離は直線距離にしてわずか 1.3km であるにも関わらず、最大加速度に約 1.8 倍の差が見られたこと、これに対応して建物被害においても本体部分に損傷を受けた被害件数に有意な差が認められたことは、特筆に値する。

同社の地表面地震動の観測波形の加速度応答スペクトル (減衰定数を 5% で試算) の南北成分は 2000gal を越えている。図-3 に両地点の加速度応答スペクトルを比較している。地下 65m で観測された基盤波の加速度応答スペクトルも併せて記す。建築物の被害の集中した地区において地表面加速度が他の地域と比べて大きいことは、これらの観測結果の比較から明らかであるが、本報告では、この地震動の増幅の原因を 3 次元有限要素法による数値解析によって検証することを試みる。

(2) 被害集中エリアと地盤特性との関連について

図-4 は、福岡市中央区の大名、今泉地区における想定地質断面図である。図-5 の基盤等高線図に橙色で示す東西方向の実線で切った断面図である。図-4 から明らかなように、断層の西側と東側で地層構造が大きく異なっている。断層の西側の基盤面は浅く、東側では基盤が深くなっており、東側には厚い堆積層が存在している。最大加速度 489gal を記録した免震オフィスビルは、この不整形地盤上に位置している。被害はこの不整形地盤のところに集

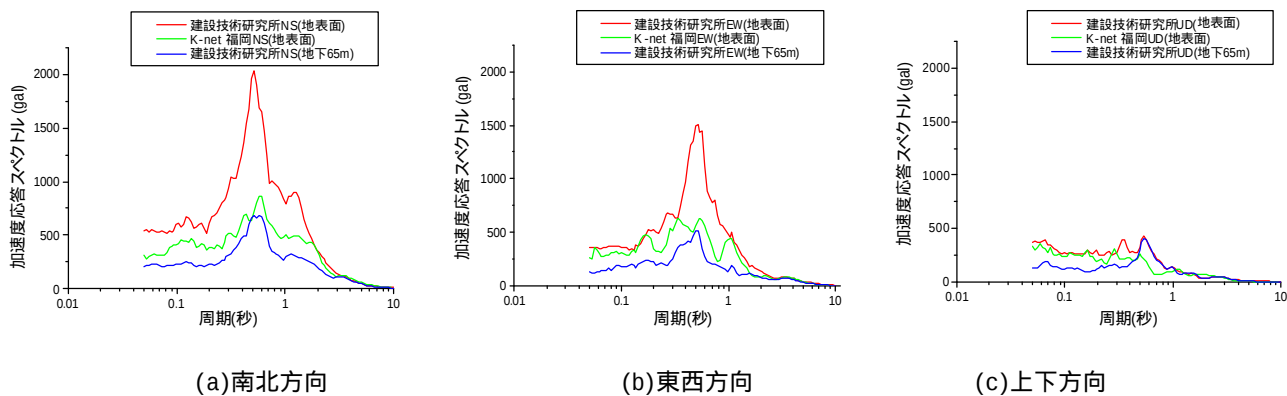


図-3 加速度応答スペクトルの比較

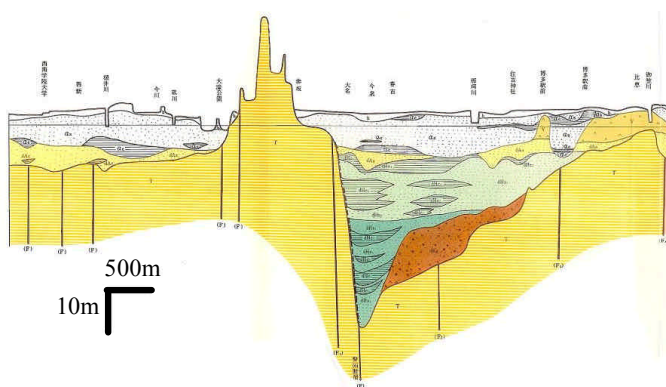


図-4 想定地質断面図

中しており、地盤特性が被害の差異に与えた影響が大きいと考えられる。

3. 解析概要

(1) 基盤等高線

不整形地盤においては、地震動の増幅や地盤内ひずみの増大が指摘されているが、既往文献³⁾によると、福岡の基盤等高線は、大名・今泉地区で等高線が密となる傾斜地盤であり、ほぼ南西の方向から北東の方向に傾斜している地層構成となっている。この傾斜地盤は断層運動によって形成されたと言われており、結果的に地下において、図-5に示すような不整形地盤が形成されていることはボーリングデータから明らかである。この地区から、図-5に併記するような長方形の地区を対象にして、3次元有限要素法による線形時刻歴応答解析を実施した。

(2) 解析領域

解析地盤の大きさは、長辺方向1000m、短辺方向400m、深さ方向50mであり、対応するメッシュ数は $50 \times 10 \times 10$ である。解析モデルの方向については、図-5の長辺方向(x方向)が北東方向となるように設定した。地盤データについては、図-5に示す箇所のボーリングデータを用いて基盤より上は成層地盤として作成した。地層構成、N値、地盤のせん断弾性係数の深さ方向分布を図-6に示す。減衰は、1次と2次モードの減衰定数を10%とするレーリー減衰を採用した。境界条件については、モデルの底面は固定、側方は鉛直方向固定、水平方向自由としている。

入力波は前述の建設技術研究所において観測された基盤波(-65m)の3成分を使用し、3方向同時加振とした。観測波形を図-7に示す。

工学的基盤の等高線図を参考にして、図-8に示すような3次元の地盤モデルを作成し、上記の基盤波を入力して、当該地表面の加速度を計算した。(注：図-5のモデルのコーナー部のアルファベットA~Dと図-8のアルファベットが対応している。)

図-5に示す直線(モデルの長辺方向の中央線)で切った地盤モデルの断面図を図-9に示す。黒の実線で基盤面を図示する。図の左側(南西側)から200m~600mのところが基盤面が傾斜している領域であり、600m~760mが基盤面が最も深い領域である。

図-9に示す断面図より、道路橋示方書・同解説・耐震設計編⁷⁾に従って地盤の特性値 T_0 を算出すると、図-10のようになる。地盤の特性値 T_0 は次式により算定される。

$$T_G = 4 \sum_{i=1}^n \frac{H_i}{V_{si}} \quad (1)$$

ここに、 T_G は地盤の特性値(s)、 H_i は i 番目の地層の厚さ(m)、 V_{si} は i 番目の地層の平均せん断弾性波速度(m/s)、 i は当該地盤が地表面から耐震設計上の基盤面まで n 層に区分されるときの地表面から i 番目の地層の番号である。せん断弾性波速度 V_{si} は、 N 値を用いて次式により算定した。

$$\left. \begin{array}{l} \text{粘性土層の場合} \\ V_{si} = 100N_i^{1/3} (1 \leq N_i \leq 25) \\ \text{砂質土層の場合} \\ V_{si} = 80N_i^{1/3} (1 \leq N_i \leq 50) \end{array} \right\} \quad (2)$$

ここに、 N_i は標準貫入試験による i 番目の地層の平均 N 値である。

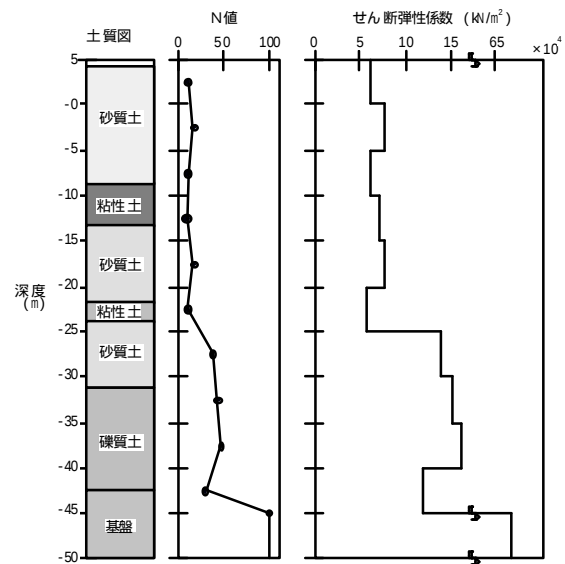


図-6 地盤の土質定数

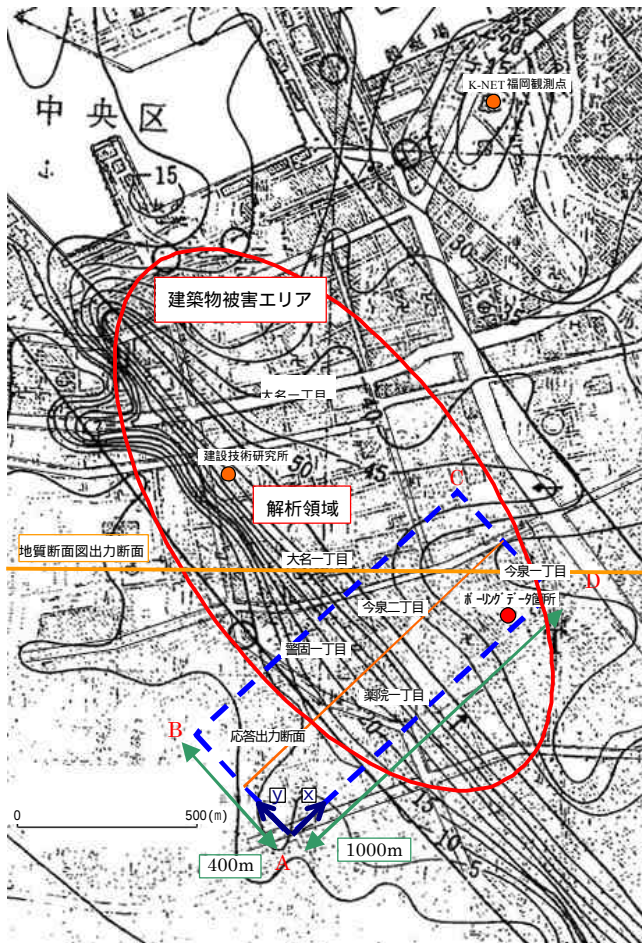


図-5 基盤等高線図と解析領域

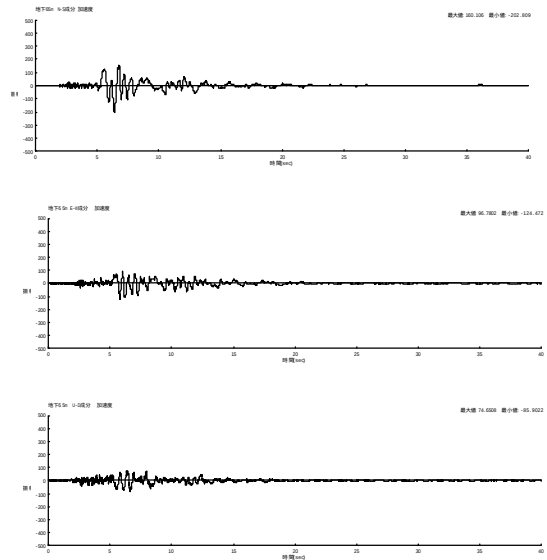


図-7 基盤波(-65m)

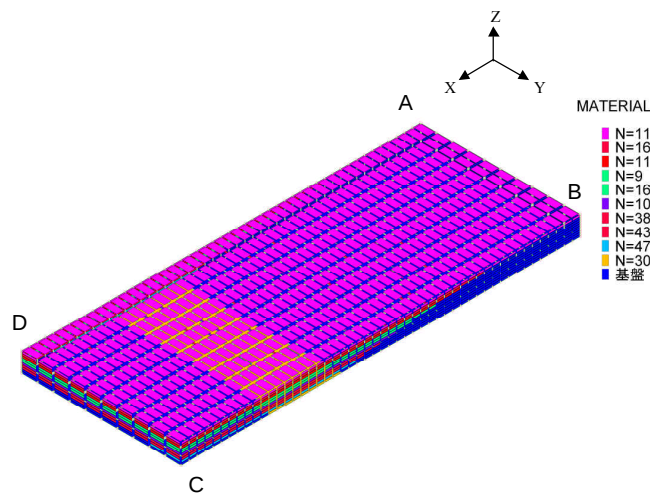


図-8 地盤モデル

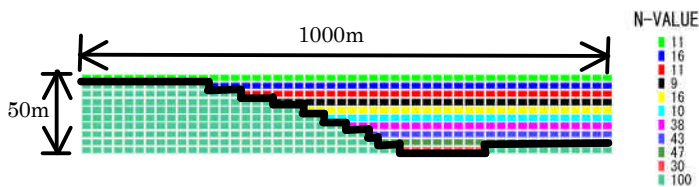


図-9 モデル中央断面(南西 - 北東方向)における
地盤モデルと N 値の分布 (ZX 平面)

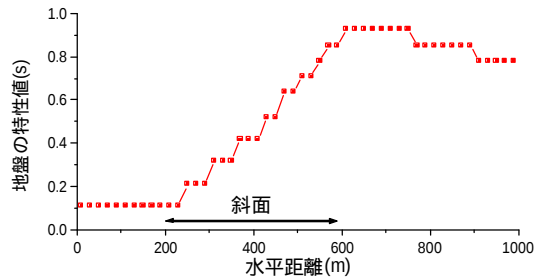


図-10 モデル中央断面(南西 - 北東方向)における
地盤の特性値 T_G の分布

4. 解析結果

(1) 最大変位

図-11 は、図-5 に示す直線（モデルの長辺方向の中央線）に沿った x 方向、および y 方向の最大変位のコンター図である。

傾斜に直交する x 方向の最大変位分布を見ると、地表面では、軟質土層が水平に堆積している場所で、大きな最大変位が生じている。軟質土層が水平に堆積している場所のうち、特に基盤面が最も深いところで、他より大きな最大変位を示している。

一方、傾斜に平行な y 方向の最大変位分布を見ると、地表面では、軟質土層が水平に堆積している場所だけでなく、基盤面が傾斜しているところでも大きな最大変位が出ている。軟質土層が水平に堆積している場所のうち、特に基盤面が最も深いところと、基盤面が傾斜しているところで、他より大きな最大変位を示している。

(2) 最大加速度

図-12 は、図-5 に示す直線（モデルの長辺方向の中央線）に沿った x 方向、および y 方向の最大加速度のコンター図である。

傾斜に直交する x 方向の最大加速度分布を見ると、地表面では、基盤面が傾斜しているところと、軟質土層が水平に堆積している場所で、大きな最大加速度が生じている。

一方、傾斜に平行な y 方向の最大加速度分布を見ると、地表面では、軟質土層が水平に堆積しているところではなく、基盤面が傾斜しているところで大きな最大加速度が出ている。

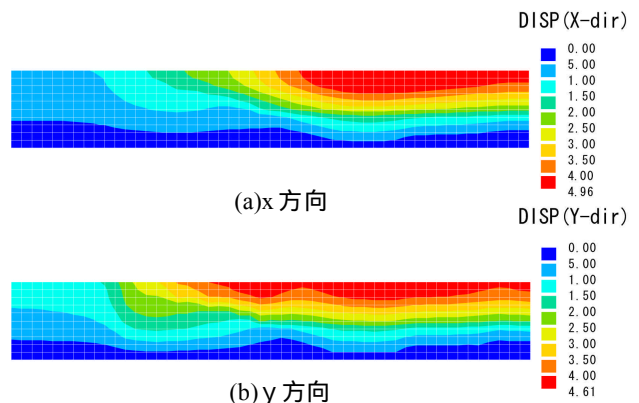


図-11 モデル中央断面(南西-北東方向)における X および
Y 方向の最大変位分布(ZX 平面)のコンター図(単位:cm)

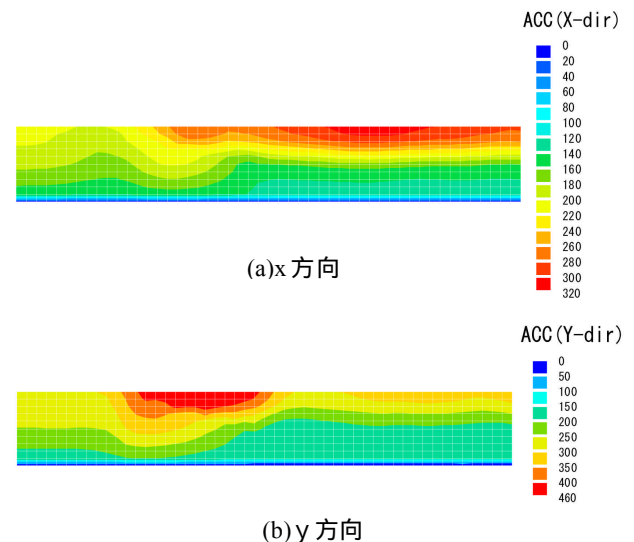


図-12 モデル中央断面(南西-北東方向)における X および
Y 方向の最大加速度分布(ZX 平面)のコンター図(単位:gal)

図-13は、図-5に示す直線（モデルの長辺方向の中央線）に沿ったx方向、およびy方向の地表面の最大加速度の分布である。傾斜に直交するx方向の加速度分布を見ると軟質土層が水平に堆積している場所で、最大加速度が生じているが、傾斜に平行なy方向の加速度分布を見ると地層の傾斜している場所で最大加速度が卓越している。

図-2 に示した基盤波の加速度応答スペクトルと図-10 に示した地盤の特性値 T_G の分布を比較する。図-2 より、基盤波の卓越振動数は約 0.5 秒～0.6

秒である．地盤の特性値 T_0 は，微小ひずみ振幅領域における表層地盤の基本周期であり，ここでは地盤の固有周期を表していると考えと，図-9 より基盤面が傾斜している領域内において地盤の固有周期が基盤波の卓越振動数と一致することになる．

傾斜に平行なy方向の最大加速度分布が基盤面が傾斜しているエリアにおいて最大値を示すのは，入力地震動と地盤の卓越周期が一致することによるものである．傾斜に直交するx方向では，基盤面が傾斜するエリアにおいては入力地震動と地盤の共振によって大きな加速度を示している．軟弱地盤が堆積しているエリアでは，地震波と地盤の卓越周期は一致していないが，地盤の不整形性の影響によって地震動が増幅されたものと考えられる．

傾斜に直交・平行な方向の2つの波を合成して南北・東西の加速度分布を示せば，図-14のようになり，斜面に平行なy方向の最大加速度がx方向の最大加速度を上回っていたため，結果として，南北・東西両方向とも傾斜地盤直上で加速度が増幅している．

解析結果の南北方向の最大値は420gal，東西方向は311galで，観測記録と比較して計算値が小さいが，地盤定数は1カ所のボーリングデータを使用して，それが解析モデル全体に広がっている仮定したこと，およびモデルのメッシュ分割が粗いこと等に問題があると考えられる．今後は解析モデルを精緻化してさらに検討を加える予定である．

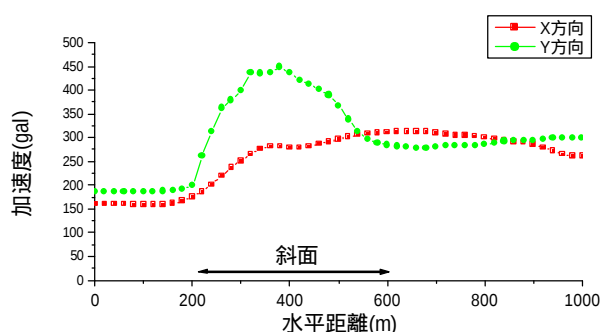


図 - 13 モデル中央断面(南西 - 北東方向)における Xおよび Y 方向の加速度分布 (地表面)

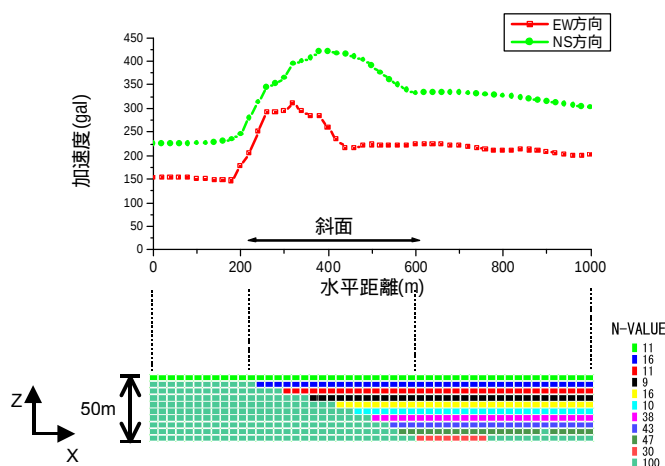


図-14 モデル中央断面(南西-北東方向)における 南北および東西方向の加速度分布(地表面)

5. まとめ

本研究では，福岡県西方沖地震で特に建築物の被害が大きかった大名・今泉地区の地表面揺れの原因を検証するため，有限要素法を用いて不整形地盤の時刻歴応答解析を行った．被害が大きかった基盤面が傾斜しているところで，大きな地表面加速度が得られ，観測結果とほぼ整合する結果を得ることが出来た．

謝辞

(株)建設技術研究所には，地表面および地下 - 65 m地点での加速度データを提供して頂いた．また，防災科学技術研究所の K-net の強震記録を使用した．記して謝意を表します．

参考文献

- 1) 気象庁：2005年3月20日10時53分頃の福岡県西方沖の地震について(第4報)，報道発表資料，平成17年3月24日14時30分
- 2) 消防庁災害対策本部：福岡県西方沖を震源とする地震(第21報)，平成17年3月30日9時00分
- 3) (社)九州地質調査業協会，福岡地盤図作成グループ：福岡地質図 基盤岩表面等高線図，帝国地図，1981
- 4) 川瀬博，松島信一，R.W.Graves，P.G.Somerville：「エッジ効果」に着目した単純な二次元盆地構造の三次元波動場解析 - 兵庫県南部地震時の際の震災帯の成因 - ，地震第2，第50巻，pp.431-449,1998

- 5) 竹宮宏和，川東靖：深層地盤構造の不整形性による地震波の増幅特性，第2回阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集，pp.73-87,1997
- 6) 工藤一嘉，東貞成：強震動と2・3次元の地下構造，物理探査，Vol.43,pp.430-442,1990
- 7) 社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編，平成14年3月
- (2005. 6. 13 受付)

SEISMIC ANALYSIS OF IRREGULAR GROUND MOTION WHERE MANY STRUCTURES DAMAGED DURING FUKUOKAKEN SEIHOOKI EARTHQUAKE

Hisanori OTSUKA, Aiko FURUKAWA and Emiko YANO

A large earthquake with $M_J=7.0$ occurred at 10:53 on March 20, 2005 in the westward offshore of Fukuoka Prefecture. Japanese seismic intensities of 6- were recorded at the central and eastern wards of Fukuoka city, Maebara city and Miyaki town. As for structural damage in the central ward of Fukuoka city, structures in Tenjin area suffered slight damage and no structure were found whose main structural members were damaged. In contrast, many structures in Daimyo and Imaizumi areas were damaged, and these areas are located on the irregularly-shaped soil layer. To investigate the reason of the difference in structural damage, we conducted the seismic analysis of ground motion of irregularly-shaped ground using 3-dimensional finite element method.