

東京ベイエリアにおける広域地盤震動解析

福武 毅芳 濁川 直寛 田地 陽一
(技術研究所) (技術研究所) (次世代リサーチセンター)

Wide-area Ground Response Analysis of Tokyo Bay Area

Kiyoshi Fukutake, Naohiro Nigorikawa and Yoichi Taji

東京ベイエリアの強震時の応答を把握するため、広域の地震応答解析を実施した。対象とした地域は東京湾北部の埋立地であり、東西 8.6km×南北 11.15km×深さ 100m にわたり三次元 FEM によりモデル化した。沖積層はその深度を文献に基づき正確にモデル化し、非線形モデル(三次元 R-O モデル)により表現した。入力地震動は東京湾北部地震とした。加速度分布と変位分布の結果は、埋没谷や沖積層基底コンターと強い相関があることがわかった。さらに位相差入力の解析も実施し、一様入力の場合と比較した。

In order to understand the response of reclaimed ground in the Tokyo Bay area to strong earthquake motion, the authors conduct a wide-area seismic response analysis. The land in question, on the northern shore of Tokyo Bay, is modeled by three-dimensional FEM over a range of 100m in depth, 11.15km in north-south extent, and 8.6km in east-west extent. Alluvium is expressed using a non-linear model (three-dimensional R-O model). The input ground motion is that of an earthquake recorded under northern Tokyo Bay in 2004. In the results, the displacement distribution and acceleration distribution are found to correlate strongly with the alluvium base contour and buried valley. In a further analysis, input motion with a phase difference is compared with the case of a uniform input in-phase.

1. はじめに

東京湾北部のベイエリアには、今後多くの構造物が建設される予定である。このエリア一帯は埋立地であり、軟弱な地盤である。しかも、場所により工学基盤の深度がまちまちで、埋没谷も存在し、非常に複雑な地層構成となっている。したがって、当該地盤の震動特性は複雑になることが予想される。不整形地盤の応答については、過去に数多くの研究がなされており、その影響が指摘されている。特に線形解析では非常に数多くの研究論文があり、いずれも基盤不整形の影響が無視できないことが指摘されている。濱野¹⁾は台形盆地の影響を等価線形解析により一次元解析と二次元解析の比較によりその影響を示している。非線形解析では例えば大槻ら²⁾や Nakai ら³⁾が傾斜基盤の影響を指摘している。ただしこれらはいずれも二次元解析の検討である。三次元の解析では、掘や本山⁴⁾が広域のエリアを対象に解析を実施している。広域のエリアを考えた場合、地震入力はエリア内で一様とはならず、位相差を

持ったものとなる。このように広範囲にわたる実地盤の三次元解析による検討はあまりなされていない。また位相差を考慮した解析も実施されていない。

そこで本論文では、東京ベイエリアの埋立て地盤の強震時の応答を把握するため、広域の地震応答解析を実施した。対象とした地域は東京湾北部の埋立地であり(図-1)、東西 8.6km×南北 11.15km×深さ 100m にわたり三次元 FEM によりモデル化した。沖積層はその深度を文献に基づき正確にモデル化し、非線形モデル(三次元 R-O モデル)により表現した。入力地震動は東京湾北部地震(2004)とした。加速度、速度、変位の面的な分布を算出し、その応答について考察した。さらに位相差入力の解析も実施し、一様入力の場合と比較した。

2. 解析条件

図-1 にモデル化の範囲を示す。図中の赤色の破線で囲まれた領域の地盤をモデル化した。FEM メッシュは、矩形になるように青色の一点鎖線のように

に領域を設定した。すなわち赤色破線のモデル化領域の外側には水平成層なダミー要素を設けている。陸地の輪郭と標高については、国土地理院のデータ⁵⁾をもとにモデル化した。海底地形については、海上保安庁国際海図⁶⁾を元に作成した。沖積層基底深度は、東京港地盤図⁷⁾に基づいてモデル化し、東京都のデータ⁸⁾と全国電子地盤図⁹⁾も参考にした。

地層構成としては、沖積層(非線形)、基盤層(線形 $V_s=400\text{m/s}$)の2層でモデル化した。単位体積重量 γ_t は便宜上一律に 17.8 kN/m^3 とした。沖積層は砂・シルト・粘土などの多層からなるが、ここでは便宜的に1つの物性(シルト層)としてモデル化した。ただし、地表でのせん断波速度 V_s を 90m/s とし、平均拘束圧 σ_m の依存性を考慮した($V_s \propto \sigma_m^{0.25}$)。これは初期剛性 G_0 が σ_m の0.5乗に比例することによる。図-1のA断面における V_s 分布を図-2に示す(鉛直方向を10倍拡大して表示)。

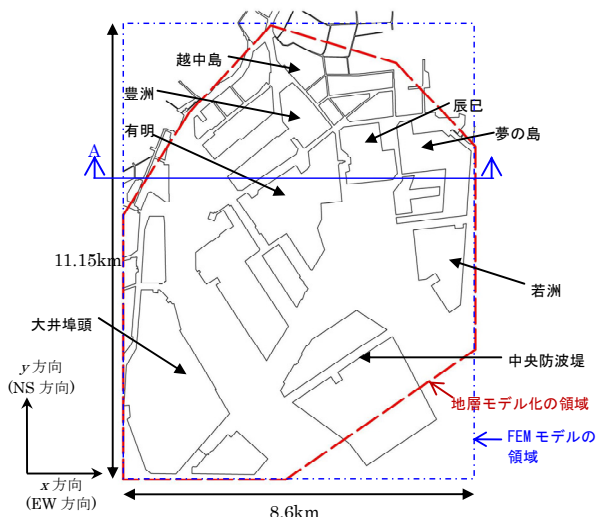


図-1 解析モデルの範囲

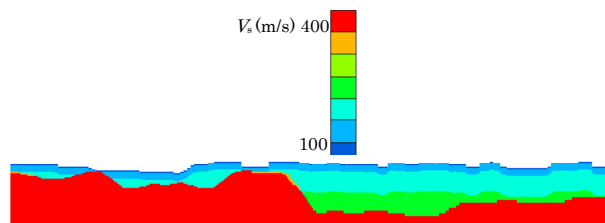


図-2 A断面図における V_s 分布

図-3にFEM解析の地盤モデルを示す。東西 8.6km ×南北 11.15km ×深さ 100m にわたり三次元FEMによりモデル化した。地形の高低差を見やすくするため、鉛直方向に10倍に拡大して表示している。色は標高を示している。海水は考慮していないので、モデルの上端は陸地と海底面が表示された

図となっている。メッシュの大きさは、平面方向(x, y 方向)には $50\text{m} \times 50\text{m}$ 、深さ方向(z 方向)には $TP-40\text{m}$ 以浅では 2m ピッチ、 $TP-40\text{m}$ 以深から $TP-100\text{m}$ までは 4m のピッチとしている。平面方向の分解能は 0.7Hz である。節点数は $1,269,751$ 、要素数は $1,205,543$ である。底面境界には、ダンパーとラージマスを設定し、ラージマスに入射波入力(2E入力)としている。側方境界は、FEMモデルの一番外周の節点と一つ内側の対応する節点と同変位となるようにした単純せん断境界である。

図-4には沖積層を剥ぎ取ったモデル、すなわち沖積層基底面を示す。この面は基盤上面である。基盤には2つの大きな埋没谷があり、図面左が古神田川谷であり、図面右が古東京谷である。深いところでは $GL-70\text{m}$ となっている。

沖積層の土の構成式は、多重バネにより三次元に拡張した Ramberg-Osgood モデル¹⁰⁾である。剛性と減衰定数のひずみ依存性($G/G_0 \sim \gamma, h \sim \gamma$ 関係)は、シルトの特性¹¹⁾を用いた。すなわち、最大減衰定数 $h_{\text{max}}=0.22$ 、平均有効応力 $\sigma'_m=1.0\text{kN/m}^2$ における基準せん断ひずみ $\gamma_{0.5}=8.0 \times 10^{-5}$ ($\gamma_{0.5} \propto \sigma'_m{}^{0.5}$)、である。基盤と沖積層はそれぞれ $V_s=400\text{m/s}$ と $V_s=300\text{m/s}$ の線形とした。

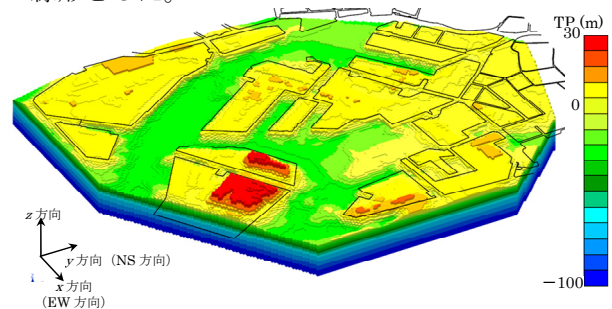


図-3 解析モデル(FEM)

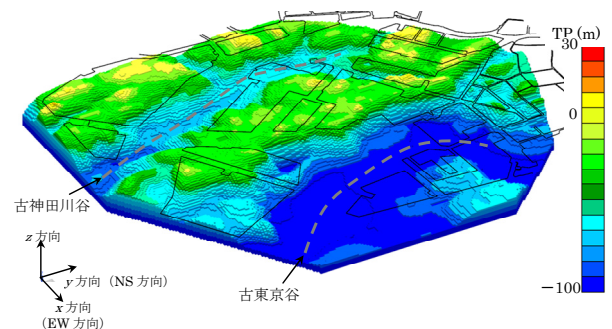
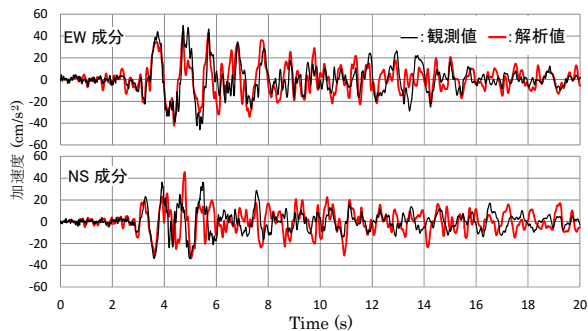


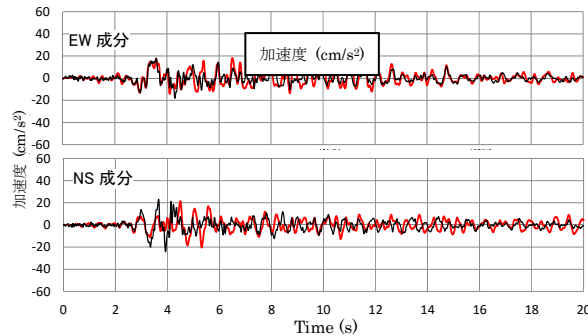
図-4 沖積層を剥ぎ取ったモデル

3. 解析モデルの検証

作成したモデルの妥当性を検証するため、2005年7月23日16時34分に発生した千葉県北西部

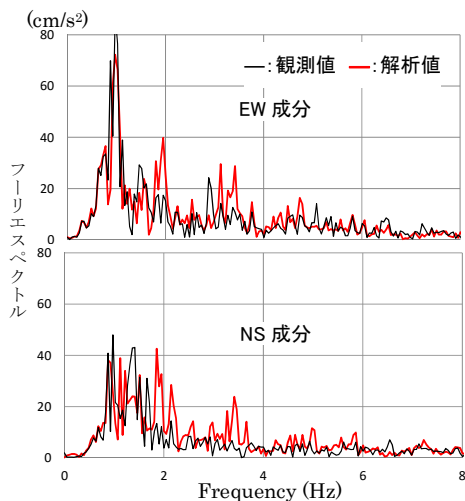


(a) GL-0m

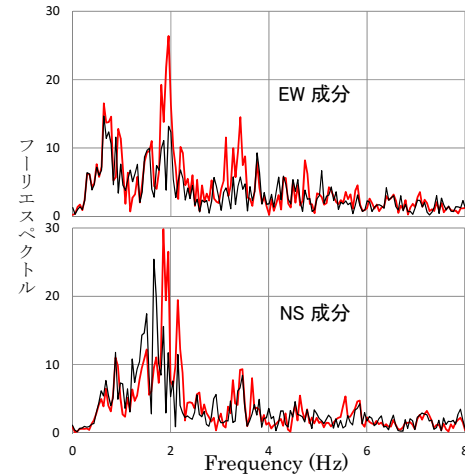


(b) GL-40m

図-5 実地震の加速度時刻歴の比較(越中島)



(a) GL-0m



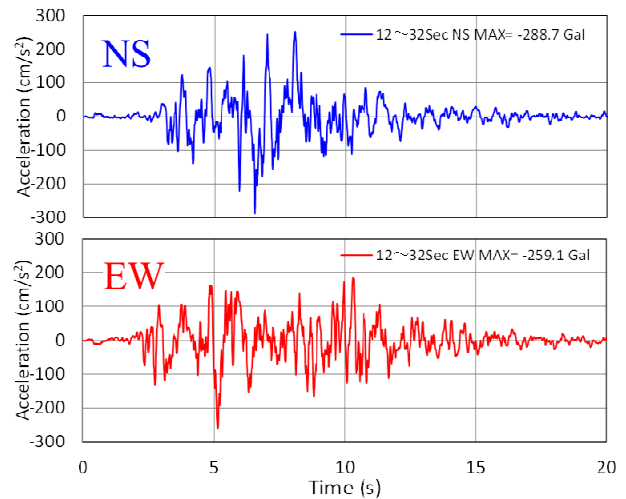
(b) GL-40m

図-6 実地震の加速度フーリエスペクトルの比較

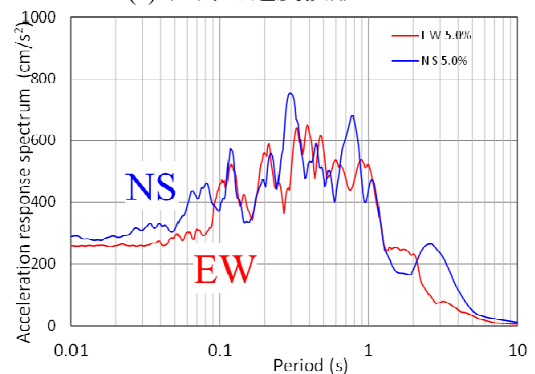
地震($M6.0$)の工学基盤での観測記録を入力し、地表の応答を比較した。江東区越中島における地中GL-100mの観測記録(最大振幅 18cm/s^2)を $E+F$ 波として入力した(このときは底面固定)。図-5、図-6に清水建設技術研究所(越中島)における地中GL-40mと地表の加速度時刻歴とフーリエスペクトルの比較を示すが、両者は比較的良好一致している。

4. 入力地震動

入力地震動は、内閣府より提供を受けた東京湾北部地震¹²⁾のNS成分とEW成分であり、それらを同時に入射波入力している(NS成分は y 方向へEW成分は x 方向へ入力)。入力波形と応答スペクトルを図-7に示す。源波を12~32秒で切出した20秒間の波である。



(a) 入力加速度波形



(b) 加速度応答スペクトル($h=5\%$)

図-7 入力加速度波形と加速度応答スペクトル

5. 解析結果と考察

最大加速度分布、最大相対変位分布を真上から見た結果を、図-8に示す。同図(a)には沖積層の基底コンターも併せて示す。沖積層の物性は一樣である

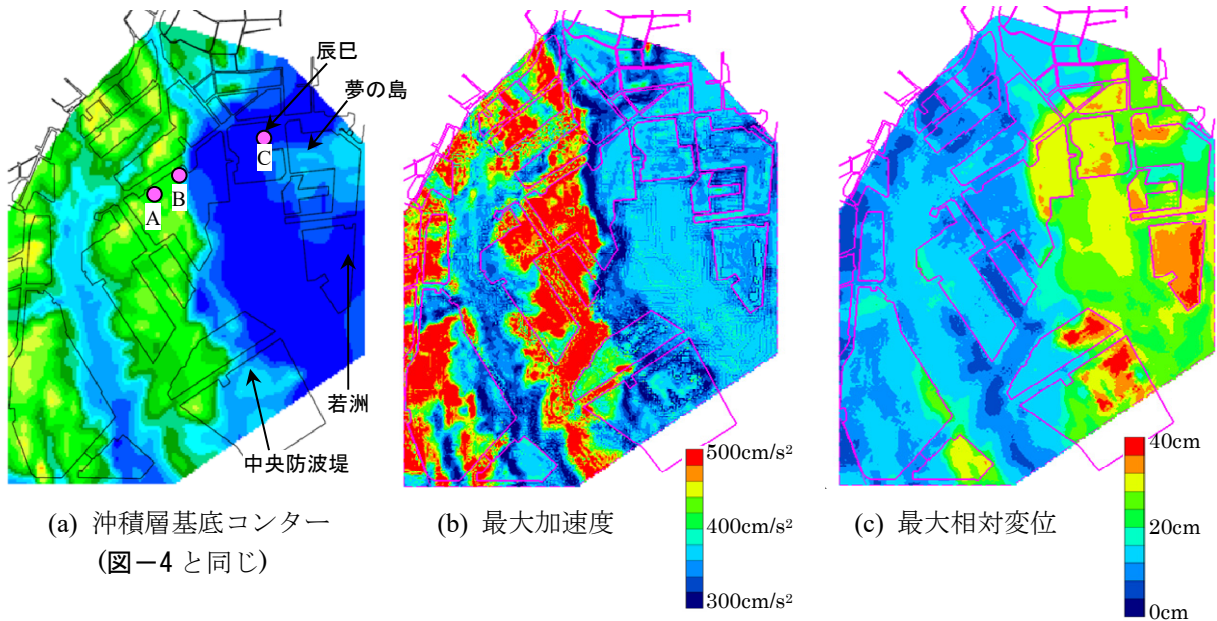


図-8 沖積層基底コンターと最大値分布

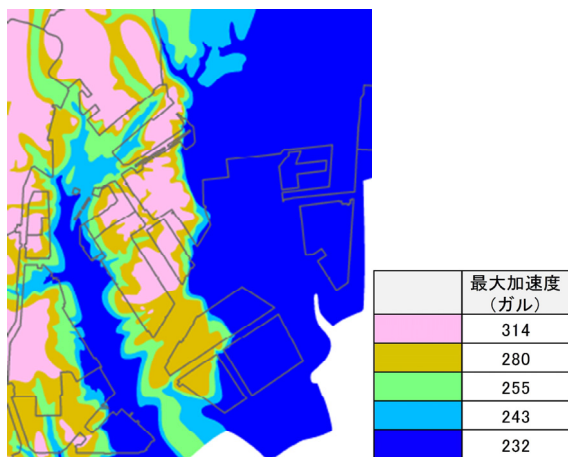


図-9 一次元の等価線形解析を多数地点で行った結果(八戸波、新宿波、神戸PI波の平均)¹³⁾

にも関わらず、加速度は非一様な分布を示している。すなわち、沖積層が浅い所で大きく、深い所で小さくなる傾向が見られる。この関係は、図-9に示す東京都が実施した一次元の等価線形解析を多数地点で行った結果(八戸波、新宿波、神戸PI波の平均)¹³⁾と整合している。ただし、三次元解析の方が沖積層基底面の不整形性を反映した複雑な分布性状を示している。また、沖積層が深くなり始めるライン上で加速度応答は小さくなっている。すなわち埋没谷の淵に沿って加速度は小さくなっている。埋没谷の淵に沿って加速度が小さくなるのは、一種のスネルの法則と考えられる。図-10にそのメカニズムを示す。すなわち、傾斜した硬質地盤から軟弱地盤に波動が伝播するとき、屈折することにより埋没谷の淵

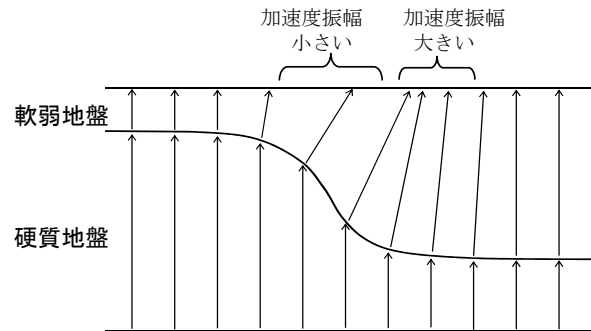


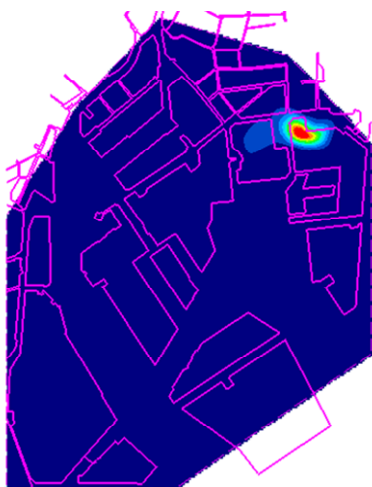
図-10 埋没谷の淵における波動の伝播

の上では加速度振幅の小さい領域と大きい領域が形成される。図-9の一次元解析ではその様子はいかがいえない。変位は沖積層が浅い所で小さく、深い所で大きくなっている。特に変位が大きな地点は、辰巳、夢の島、若洲、中央防波堤である。若洲、中央防波堤は盛土されており、その高さはそれぞれ10mと30mである。辰巳、夢の島は、固有値解析においても大きくなっている。なお、固有値解析においては沖積層の V_s は一律180m/sとしている。表-1にはx方向とy方向の有効質量比の大きな順にそのモード次数と振動数を示す。卓越する固有振動数は約0.54Hzである。図-11には固有モード図を示す。x方向の41次モードはダミー要素が変形しているのを省いた。絶対速度の最大値分布を図-12に示す。絶対速度から計測震度Iへの変換は次式に示す翠川の式¹⁴⁾を用いた。

$$I = 2.68 + 1.72 \log PGV_s \quad (1)$$

表-1 固有値解析結果

x方向(水平)の有効質量比順			
順位	次数	振動数	有効質量比
1	41	0.565	0.016
2	11	0.537	0.009
3	94	0.592	0.009
4	97	0.593	0.009
5	16	0.542	0.006
y方向(水平)の有効質量比順			
順位	次数	振動数	有効質量比
1	13	0.539	0.012
2	71	0.581	0.010
3	20	0.547	0.008
4	83	0.587	0.007
5	3	0.515	0.006



(a) 11次モード (0.537Hz)

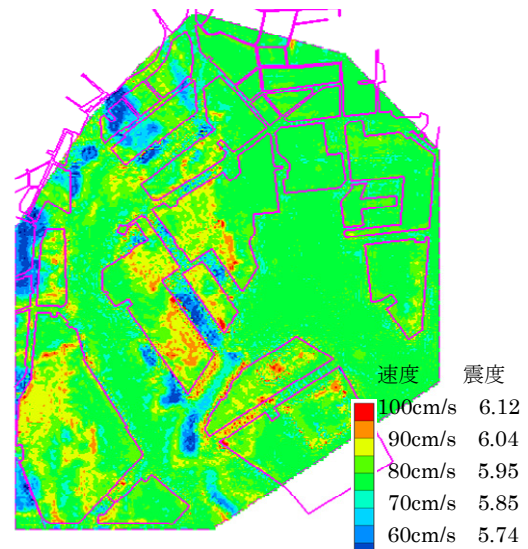


(b) 13次モード (0.539Hz)

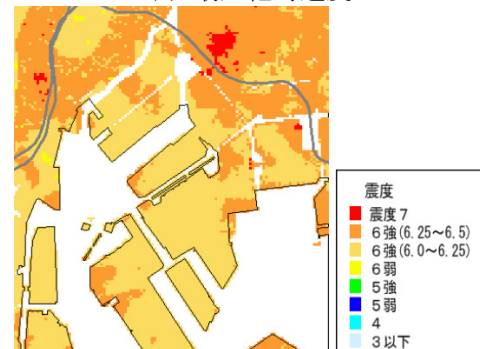
図-11 固有値解析結果

ここで、 PGV_s は地表の速度である。解析で得られた絶対速度の最大値をもとに計算すると、計測震度は5.6~6.1(6弱~6強)となる。同図(b)には内閣府中央防災会議の首都直下地震モデル検討会による震度分布¹⁵⁾も合わせて示す。全体として震度6強の領

域が多く、解析結果よりも若干大きな震度となっている。



(a) 最大絶対速度



(b) 内閣府中央防災会議、首都直下地震モデル検討会の想定する震度分布¹⁵⁾

図-12 最大速度分布と震度分布

図-13には図-8(a)に示す三地点A, B, Cにおける加速度、速度、相対変位の地表面のNS方向(y方向)応答波形を示す。地点A, B, Cの順に沖積層が深くなっており、地点Bはちょうど埋没谷の淵に位置する。相対変位は解析モデル底面に対する相対値である。全ての波形において、沖積層が深くなるに従い長周期となっており、位相も遅れている。振幅に着目すると、相対変位はA, B, Cの順に明らかに大きくなっており、速度もやや大きくなっている。加速度は埋没谷の淵(地点B)で振幅が小さくなっている。この傾向は図-8(b)とも一致する。

図-14には次式から求められる卓越周期 T のコーナーを示す。基盤の傾斜部分と中央防波堤の盛土部分で周期が長くなっている。

$$T = 2\pi \frac{PGV}{PGA} \quad (2)$$

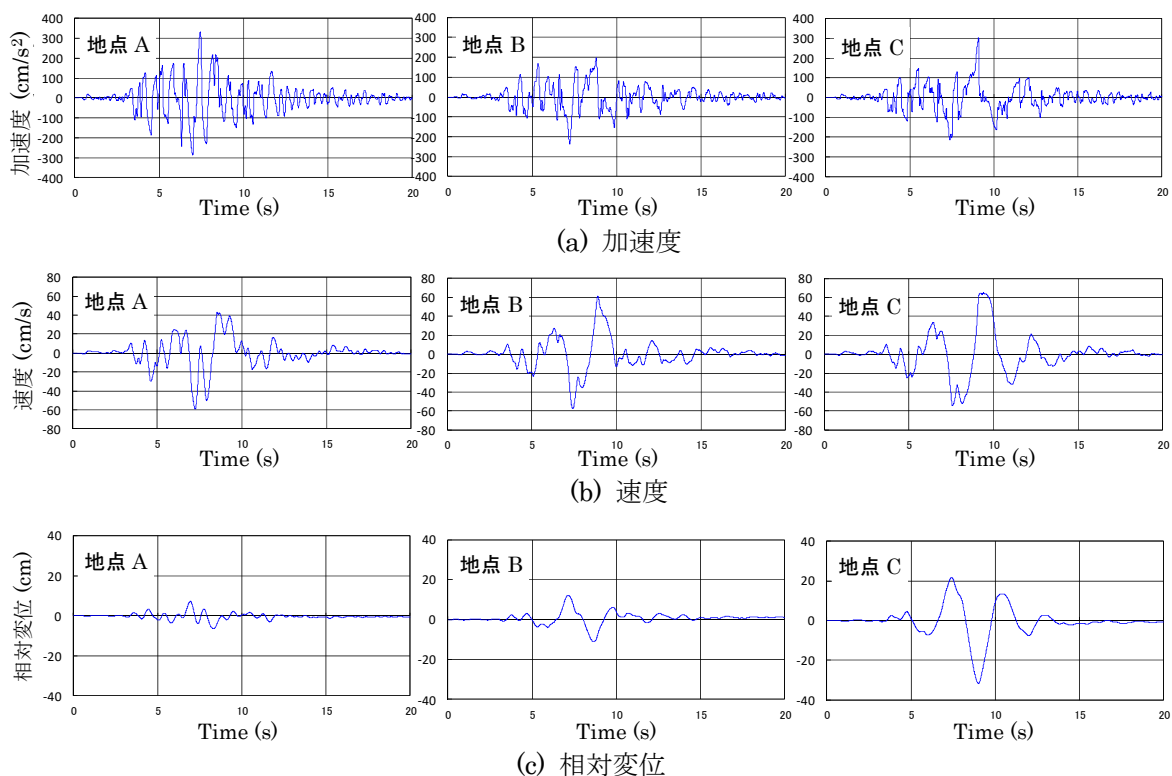


図-13 地表面における波形(NS方向)

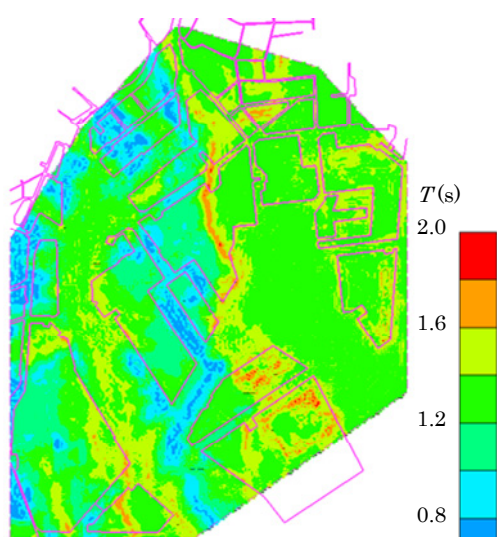


図-14 卓越周期

ここで、 PGV は地表の最大速度、 PGA は地表の最大加速度である。

6. 一様入力と位相差入力の比較

ここでは、基盤に一樣に入力した場合と位相差入力した場合の比較を行う。位相差入力の方法を図-15に示す。解析底面をセグメント(幅1km)に分割し、それぞれのセグメントに同じ波を0.1秒ずつ遅らせ

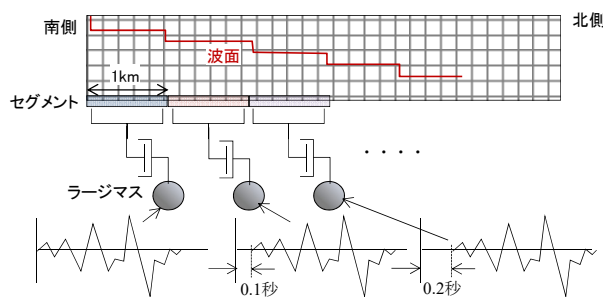


図-15 位相差入力の方法

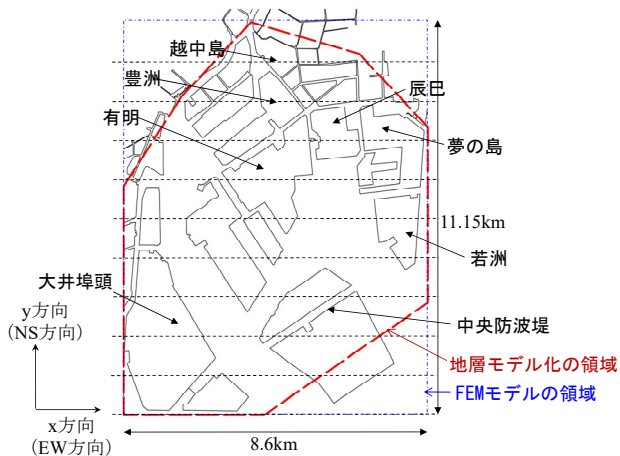


図-16 位相差入力のセグメント分割(破線)

て入力した。これにより波面は階段状となり(図-15)、本当の意味での斜め入射ではない。セグメント

は南北方向に分割し、入力は南から北へと入力した。
図-16中の横の破線は各セグメントの領域分割を示す。

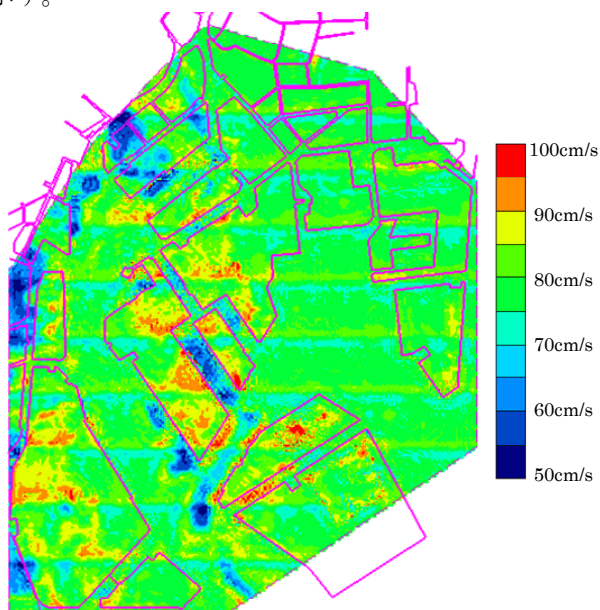


図-17 位相差入力時の最大速度分布

図-17には絶対速度の最大値分布を真上から見た結果を示す。一様入力と位相差入力を比較すると(図-12と図-17)、位相差入力の方がやや大きな応答値を示している。位相差入力では波が干渉し、打ち消しあって小さくなる所と重なり合っ大きくなる所が見られる。すなわち位相差入力では、鋸の歯のような分布になっている。位相差入力の場合でも溺れ谷の影響を反映した大きなうねりのような分布や渚効果のような現象は見られない。なお位相差入力による時間差は今回は0.1秒としたが、応答値の大きさは時間差によっても変わってくる。

7. まとめ

本論文では、東京ベイエリアの埋立て地盤の強震時の応答特性の把握を目的として、広域の三次元非線形FEM解析を実施した。加速度、速度、変位の面的な分布を算出し、その応答について考察し以下の結論が得られた。

- (1) 当該地盤は全域が埋立て地盤であるが、一様な揺れとならず、応答結果は沖積層基底面の影響を強く受ける。
- (2) 加速度は沖積層基底深度の浅い箇所が大きくなっている。その傾向は東京都が実施した一次元の等価線形の値と大まかには整合している。ただ

し、三次元解析の方が沖積層基底面の不整形性を反映した複雑な分布性状を示している。

- (3) 加速度は埋没谷の傾斜部に沿って値が小さい箇所と大きい箇所が見られた。この原因として硬質基盤の傾斜による屈折の影響が考えられる。
- (4) 位相差入力を考慮すると速度応答がやや大きくなる。

謝辞

本研究をまとめるにあたり、当社の桂豊氏、奥村俊彦氏、佐藤智美氏、早川崇氏、中村豊氏から有益な助言を頂いた。ここに記して謝意を表します。

<参考文献>

- 1) 濱野 雅裕：5.5.4節、表層地盤の不整形の影響、実務に役立つ耐震設計入門、土木学会、pp.152-154、2011.
- 2) 大槻明、渡辺浩平：2次元非線形解析による不整形地盤の地震時挙動の検討、第19回土質工学研究発表会、pp.703-706、1984.
- 3) Nakai, K., Asaoka, A. and Sawada, Y: Liquefaction damage enhanced by interference between the body wave and surface wave induced from the inclined bedrock, The 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Fukuoka, 2015.
- 4) 本山紘希：高性能計算を利用した大規模鉄筋コンクリート構造物の地震応答解析の品質保証に関する基礎的研究、東京大学博士論文、2107
- 5) 国土地理院基盤地図情報サイト、入手先
<<http://www.gsi.go.jp/kiban/>> (参照 2015.4.17)
- 6) 海上保安庁国際海図、2010.
- 7) 新版 東京港地盤図、東京都、2001.
- 8) 東京の地盤(GIS版)、東京都土木技術支援・人材教育センター、入手先
<<http://doboku.metro.tokyo.jp/start/03-jyouhou/geo-web/00-index.html>> (参照 2015.4.17)
- 9) 全国電子地盤図、地盤工学会、入手先
<<http://www.denshi-jiban.jp/index.htm>> (参照 2015.4.17)
- 10) 福武毅芳：おわんモデルと履歴関数モデルを併用した構成式、地盤材料の構成式ワークショップ(第1回)、地盤工学会、2012.
- 11) 吉見吉昭・福武毅芳：地盤液状化の物理と評価・対策技術、技報堂出版、pp.28-30、2005
- 12) 内閣府、防災情報のページ(詳細)、入手先
<http://www.bousai.go.jp/jishin/syuto/syousai/higai_syousai.html> (参照 2015.4.17)
- 13) 東京の液状化予測(平成24年度改訂版)、東京都建設局・港湾局、2013.

- 14) 翠川三郎, 藤本一雄, 松村郁栄: 計測震度と旧気象庁震度および地震動強さの指標との関係, 地域安全学会論文集, Vol.1, pp.51-56, 1999.
- 15) 首都直下地震モデル検討会, 内閣府中央防災会議, 入手先
<http://www.bousai.go.jp/kaigirep/chuobou/senmon/shutoc_hokkajishinmodel/index.html> (参照 2015.4.17)