

局所的な地形条件が表層地盤の震動特性に及ぼす影響 ～ 名古屋大学東山キャンパス内の高密度強震観測に基づく検討～

名古屋大学大学院工学研究科

建築学専攻博士前期課程2年

構造設計工学講座 飛田研究室 昇 佐智夫

1. はじめに

一般に、我が国の表層地盤は幾何学的に特異な形状や状態にある不整形地盤であることが多く、崖地形や傾斜地形などの局所的な地形はいたるところに存在する。また、大都市地域においては、人工的な地形改変に伴う造成地や、土地利用の効率化および環境保全の面から地下鉄等の地下構造物が多く存在しており、その地形条件はきわめて多様である。

しかし、現在の耐震設計における設計入力地震動の設定では、性能規定化により、ようやく表層地盤を水平成層地盤と仮定し、1次元的な増幅特性による検討を始めたばかりで、周辺の局所的な地形効果は未だ考慮されていないのが現状である。

そこで本論では、名古屋大学東山キャンパス内の表層地盤を対象とし、局所的な地形条件が地盤震動に及ぼす影響について、高密度強震観測に基づく検討を行う。東山キャンパスは、起伏のある丘陵地帯に位置するため尾根や谷がいくつか存在し、原地形の複雑さと開発に伴う地形改変の影響で、表層地盤構造は場所によって大きく異なる。そこで、高密度に設置された強震観測地点の地震記録をもとに東山キャンパス内の表層地盤震動特性について検討を行う。また、キャンパス内で行われている地下鉄駅建設工事の各工事過程による地盤条件の変化に着目し、人工的な地盤の不整形性が周辺地盤の震動特性に与える影響について、地震記録に基づく検討を行い、FEM解析を用いて特性の定量的な把握を試みた。

2. 高密度強震観測システムと

表層地盤構造の概要

図1に東山キャンパス内の強震観測地点およびPS検層・ボーリングの分布を示す。キャンパス内では、地表14地点、地中4地点で強震観測が行われ、中でも地点直下GL-57mの地中観測地点は工学的基盤（ $V_s=500\text{m/s}$ 以上）に達しており、キャンパス内における基盤の記録として用いられている。また、約200ヶ所のボーリングと10ヶ所のPS検層が行われており、その地盤データをもとに作成した地点から地点までの表層地盤断面図を図2に示す。地点と地点の間には十数mの崖地形が見られ、また、切盛による地形改変の影響で表土層厚は場所によって異なる。そこで、地盤データや地形などの情報をもとにキャンパス内の地盤を4グループに分類し、各グループの地盤震動特性について検討を行う。尾

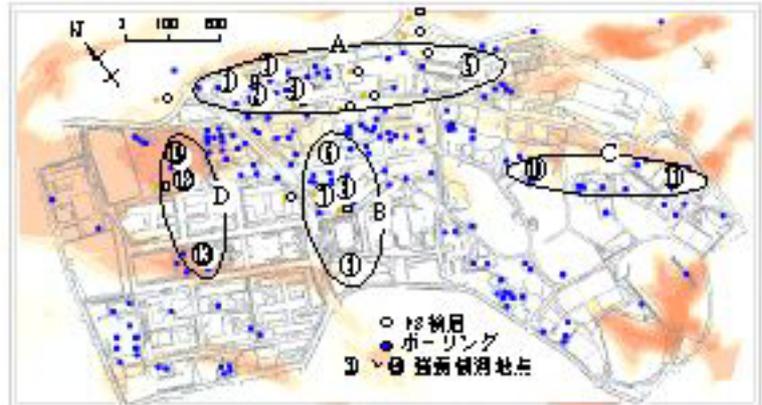


図1 東山キャンパス内の強震観測地点とPS検層・ボーリングの分布
(白い部分は切り土、色が濃くなるにつれて盛り土が厚くなる)

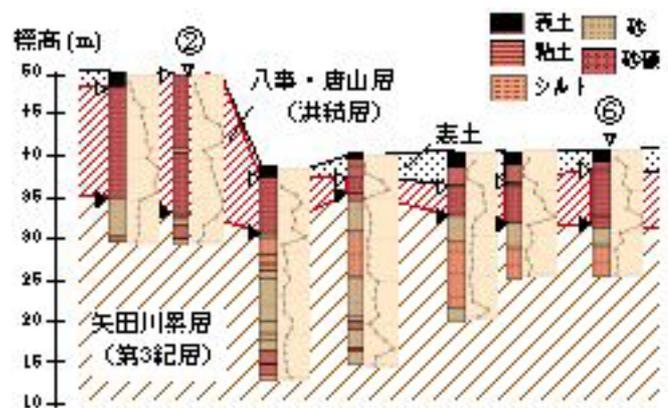


図2 地点から 地点までの表層地盤断面図

根に位置するA、Cグループの地盤は砂礫を主成分とした八事・唐山層（洪積層）が厚さ10m程度で存在する比較的硬質の地盤であり、逆に、谷に位置するB、Dグループの地盤は八事・唐山層が比較的薄く、風化作用で軟化した矢田川累層（第3紀鮮新世）が数mの深さから存在するため比較的軟弱な地盤である。

3. 東山キャンパス内の表層地盤震動特性

検討対象とした地震の震源情報を表1に示す。まず、図3の地表最大加速度の分布に着目すると、各地点で応答値にばらつきが見られ、その分布の様子は地震によって異なっていることが分かる。地震による分布の相違は入射地震動の振動数特性の相違から生じていると考えられる。次に、図4の各地表地点における加速度フーリエ振幅スペクトルに着目すると、地震基盤以浅の1次、2次固有振動数にあたる約0.4Hz、0.9Hz付近では各地点に共通したピークが見られるが、約1.5Hz付近より高い振動数では地点によるばらつきが見られ、異なる地点間の表層地盤構造の相違を反映した結果であると推測される。

そこで、各地点における表層地盤の伝達特性について、実測値および1次元重複反射解析による解析結果をもとに検討を行う。実測値は、キャンパス内で観測された各地震記録20.48s × 18波のアンサンブル平均により求まる、地表地点と -57m地点の間の伝達関数である。解析結果は、図5に示す地盤データをもとに作成した表層地盤モデルにおける地表と工学的基盤の間の伝達関数(2E/E+F)である。

図6に 地点における実測値および解析結果による表層地盤の伝達特性を示す。実測値および解析結果とともに約1.5Hz、約4.0Hz付近に明確なピークが見られ、この値が東山キャンパス内における工学的基盤で浅い表層地盤の1次、2次固有振動数であることが分かった。解析結果と実測値は、約10Hz付近までの振動数帯域では良く合っているが、それより高い振動数では、実測値との対応はあまり良くなく、1次元波動論では説明ができない2次元もしくは3次元的地形の変化の影響が示唆される。

そこで、伝達特性の方向性について検討したところ、図7が示すように、約12Hz付近で水平2方向の伝達特性の差が顕著な地点(地点)と、そうでない地点(地点)が見

表1 検討地震の震源情報

No.	発生時刻	震源地名	(km)	D (km)	M	震度
EQ1	1997.3.16 14:51	愛知県東部	57.07	39	5.8	4
EQ2	1998.4.22 20:32	岐阜県美濃中西部	36.27	5	5.4	3
EQ3	1998.11.9 9:12	愛知県西部	44.75	44	3.9	1

: 震央距離 D: 震源深さ

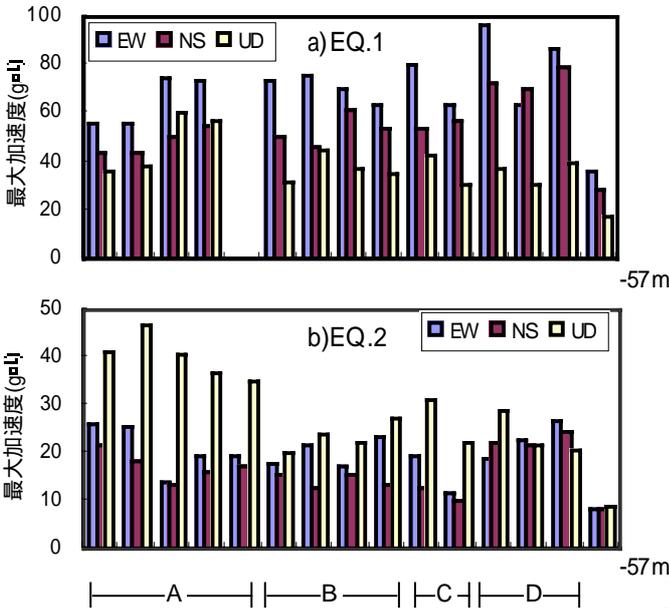


図3 地表最大加速度の分布

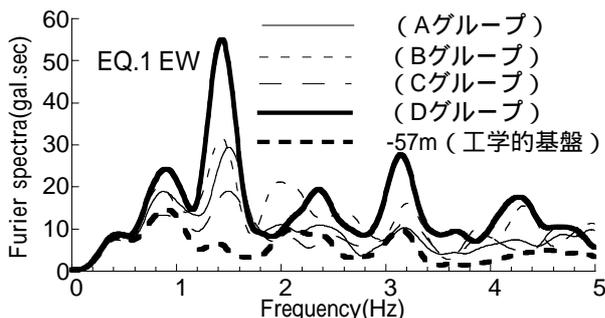


図4 各地表地点のフーリエスペクトル

られた。EQ.3の加速度波形に10~15Hzの振動数帯域でフラットなバンドパスフィルターをかけ、その波形から求めた各地表地点の水平面内オービットを図8に示す。尾根上に位置し切り土地盤である

地点のオービットは小さく、偏向性が見られないのに対して、逆に、谷部に位置し盛り土地盤である 地点のオービットは比較的大きく、偏向性が顕著に見られる。このことから、盛り土による極表層地形の不整形性が工学的基盤の伝達特性の方向性に影響を与えていると考

図5 地点の地盤データ

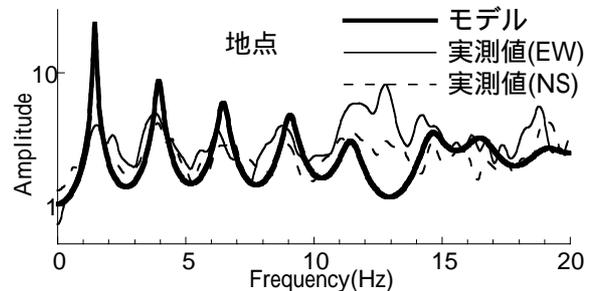
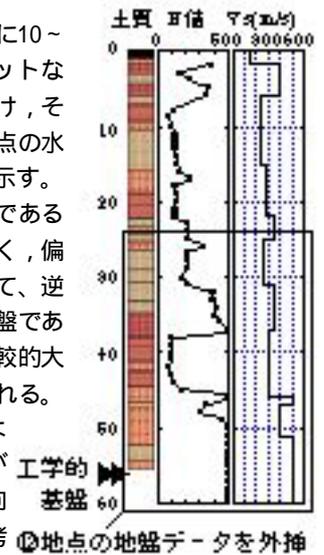


図6 表層地盤の伝達特性

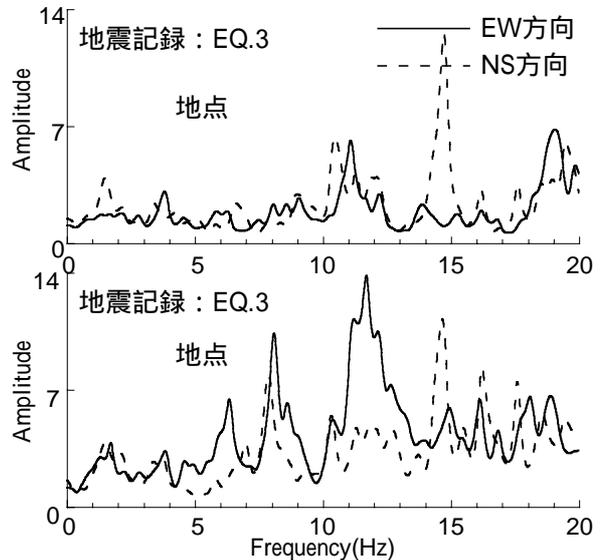


図7 -57mに対する各地点のフーリエスペクトル比

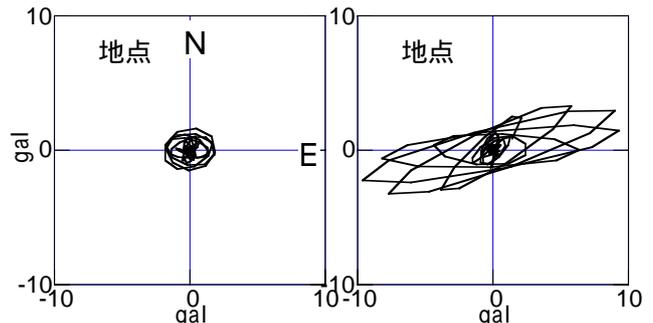


図8 各地表地点の水平面内オービット (EQ.3)

4. 地下鉄駅建設工事に伴う地盤の不整形性が 周辺地盤の震動特性に及ぼす影響

図9に工事区域付近の平面図と表層地盤断面図を示す。地下鉄駅の建設工事は、キャンパス内の中央部で行われ、ほぼNS方向に平行で、駅部の工事延長が253.9m、幅は場所により15m~20m、掘削深さはGL-25m~-30mとなっている。

本節で対象とする強震観測点は、GL-1.0mに設置された工事区域に近いA・B地点(図1中の、地点)とやや遠いC・D地点(、地点)、またB地点直下GL-25mのBi地点、D地点直下GL-11mのDi地点、および工学的基盤の記録として工事区域から約300m離れたEi地点(-57m)とする。工事区域周辺の地盤は、比較的平坦な地形で、B地点とD地点の地盤構造は類似している。従って、工事区域に近いB地点とやや遠いD地点の震動特性を比較し、工事による地盤の不整形性の影響の検討を行う。

表2に検討に用いた地震の震源情報を、図10に各工事過程の地盤・構築躯体の様子を示す。工事は開削工法で行われ、連続地中壁を施工する土留壁工事、地表から順に内部の掘削を行う掘削工事、下部から順次内部躯体を構築する構築工事の順で行われる。

図11に、各地震記録において、B地点の最大加速度をD地点の最大加速度で除した最大加速度比を、B地点付近の工事状況とともに示す。掘削面直交方向に着目すると、掘削工事・構築工事前半に相当するEQ ~ にかけてB地点の最大加速度がD地点に比べて約1.3倍程度大きくなっており、掘削工事に伴う切り欠きの影響と考えられる。構築工事後半から内部躯体完成に相当するEQ ~ では1.0に近い値をとり、両地点の最大加速度はほぼ同じである。これは掘削範囲内の地盤と内部躯体の水平剛性がほぼ等価であることが考えられる。次に、掘削面平行方向に着目すると、構築工事後半から内部躯体完成に相当するEQ ~ にかけて、B地点の最大加速度がD地点に比べて約0.7倍程度と比較的小

さくなっている。これは床スラブ等の内部躯体が構築されることによって掘削面平行方向成分の動きが拘束された結果であると考えられる。

次に、各工事過程における掘削面直交方向の地盤増幅特性について、実測値および2次元FEM解析に基づく検討を行う。解析は、B地点付近を対象とし、図5に示した地盤データをもとに2次元でモデル化した。連続地中壁・内部躯体は梁要素とし、比較のため1次元の水平成層地盤モデルによる解析も行っている。入力はそのそれぞれの工事過程においてEi地点で観測された地震波を用いる。

図12に各工事過程の解析モデルと加速度増幅率の深さ方向の分布を示す。1)土留壁工事完了において、2次元モデルは実測値と良く一致しているが、1次元との差は小さい。2)底面スラブ構築では、2次元モデルによる応答が掘削底面付近から浅い領域で1次元より大きくなっている。しかし、実測値(EQ)ほどの増幅は再現できなかった。この原因として、D地点でも大きな増幅を示していることから、工事区域周辺に分布する盛り土による局所的な地形効果の影響であると推測される。3)内部躯体完成後では、内部躯体が構築されている領域にかけて2次元モデルの応答が1次元モデルに比べて小さく、実測値Bi地点の増幅率も約1.0と低く、内部躯体のような剛体が近傍に存在することによって、掘削面直交方向成分の動きが拘束された結果であると考えられる。

次に、図12の各工事過程におけるD地点に対するB地点のフーリエスペクトル比、および各モデルにおけるNo.1/No.2の伝達関数を図13に示す。1)土留壁工事完了において、解析結果、実測値ともに近傍地点と遠方地点の差は小さい。2)底面スラブ構築において、B地点およびNo.1とともに約3Hzで増幅が大きくなっており、切り欠きにより励起された振動数と考えられる。また、3)内部躯体完成後では、No.1において約8Hz、13Hzで増幅が見られるが、B地点では有意義な増幅は見られない。

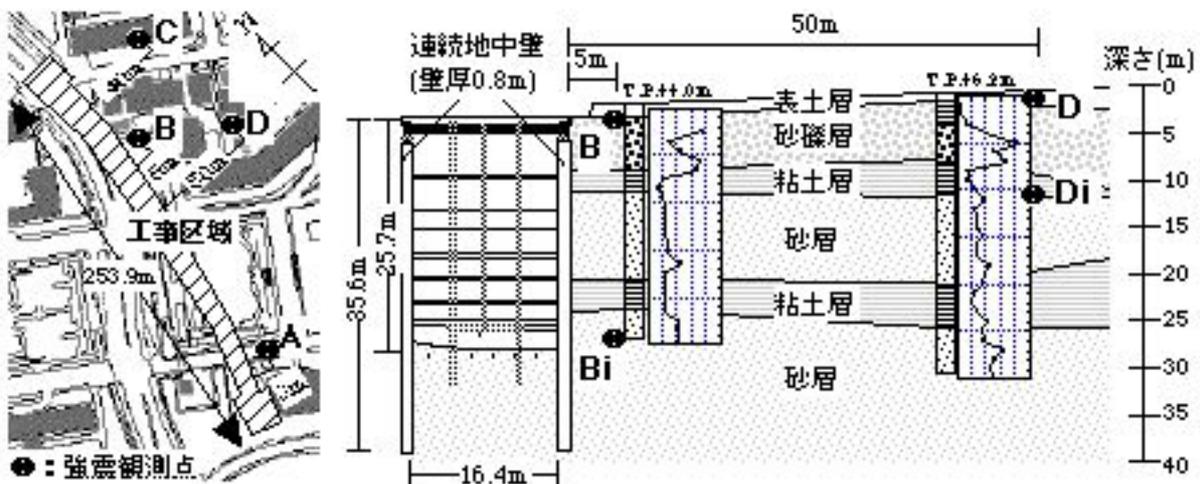


図9 建設工事区域付近の平面図とB地点からD地点までの表層地盤断面図

5. まとめ

高密度強震観測で得られた地震記録をもとに、東山キャンパス内の表層地盤震動特性について検討を行い、表層地盤構造の相違や局所的な地形の影響で、キャンパス内という狭い領域にもかかわらず場所によって地盤震動性状が大きく異なることを示した。また、地下鉄駅建設時の各工事過程に伴う地盤の不整形性について地震記録およびFEM解析に基づく検討を行い、切り欠き地盤や内部躯体の影響が実測記録に明確に現れていることを示した。以上の結果から、大都市地域でよく見られる局所的な地形が地盤震動に与える影響は大きく、耐震設計においては、周辺の地形を考慮した地震動の評価が必要である。

表2 検討地震の震源情報

No.	発生時刻	震源地名	M	D(km)	(km)
EQ	1996.10.5 9:51	静岡県中部	4.4	26	98.47
EQ	1996.10.6 21:56	静岡県中部	3.9	23	97.57
EQ	1997.3.16 14:51	愛知県東部	5.8	39	57.07
EQ	1997.3.16 15:36	愛知県東部	3.9	40	56.22
EQ	1997.10.21 19:55	静岡県中部	4.3	33	115.09
EQ	1998.2.10 1:20	岐阜県飛騨地方	4.2	11	65.57
EQ	1998.4.22 20:28	岐阜県美濃中西部	4.0	8	36.27
EQ	1998.4.22 20:32	岐阜県美濃中西部	5.4	5	36.27
EQ	1998.11.7 15:49	静岡県西部	3.7	40	63.39
EQ	1998.11.9 9:12	愛知県西部	3.9	44	44.75
EQ	1998.12.2 11:01	三重県北部	3.9	46	35.45
EQ	1999.3.3 3:20	岐阜県美濃中西部	3.6	47	45.76
EQ	1999.5.7 21:48	山梨県中西部	4.7	20	124.27
EQ	1999.8.21 5:33	和歌山県北部	5.4	70	185.68
EQ	1999.11.18 19:41	愛知県西部	3.2	45	35.67

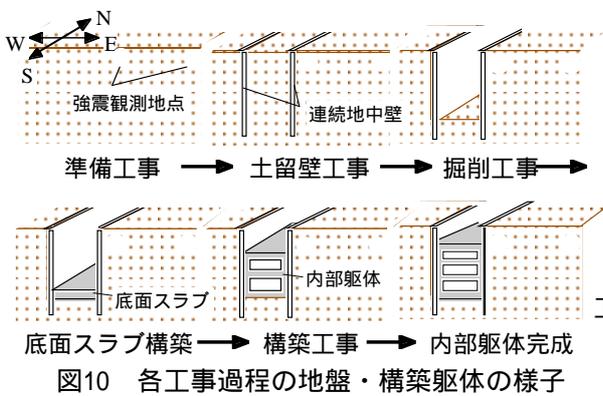


図10 各工事過程の地盤・構築躯体の様子

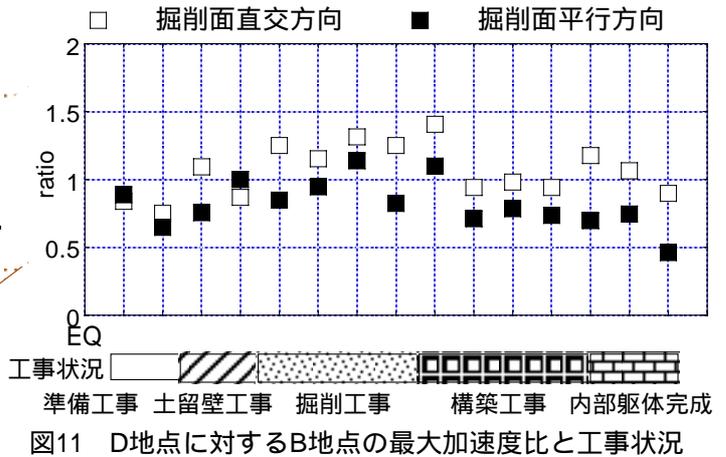
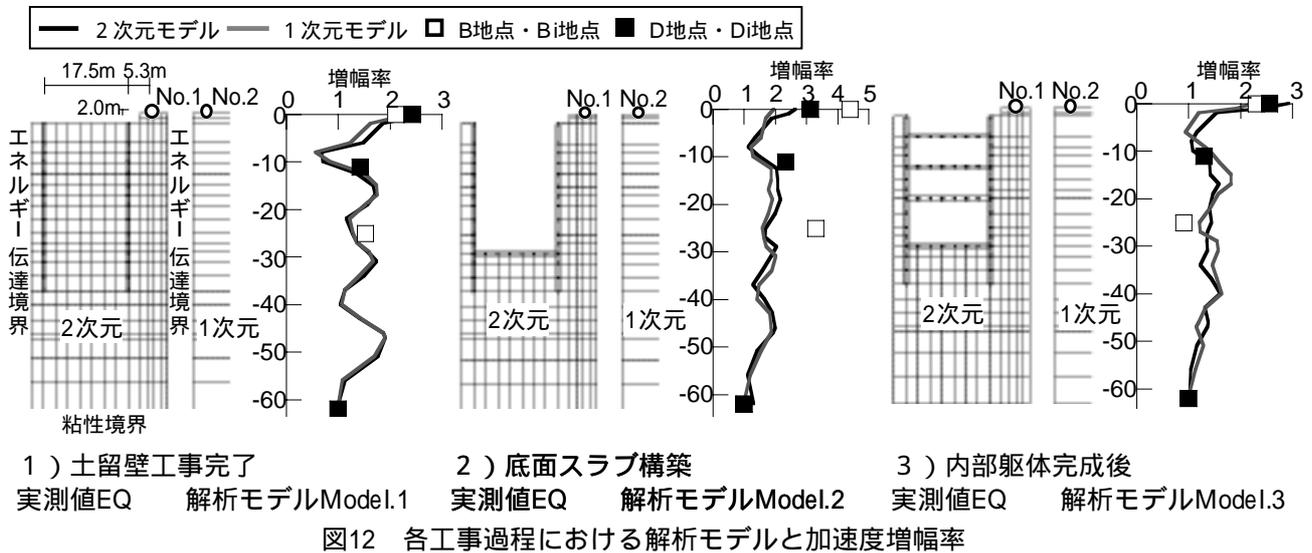
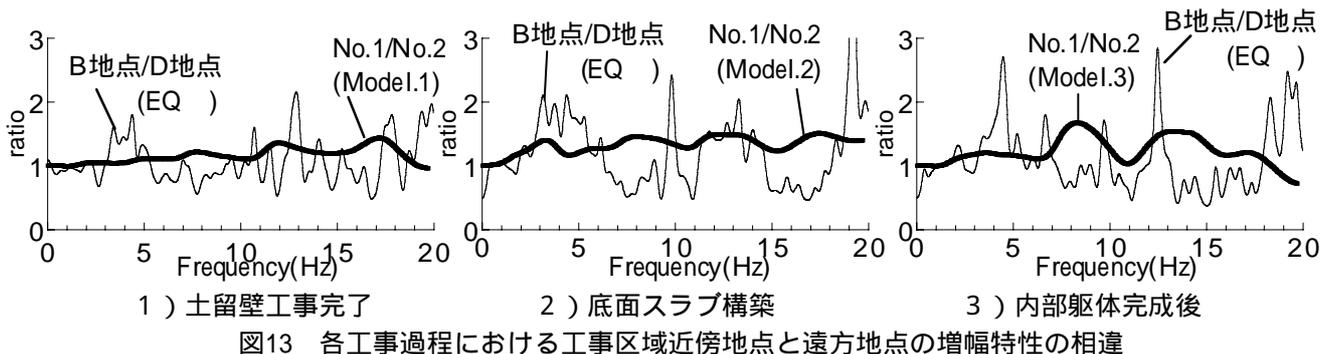


図11 D地点に対するB地点の最大加速度比と工事状況



1) 土留壁工事完了 2) 底面スラブ構築 3) 内部躯体完成後
 実測値EQ 解析モデルModel.1 実測値EQ 解析モデルModel.2 実測値EQ 解析モデルModel.3

図12 各工事過程における解析モデルと加速度増幅率



1) 土留壁工事完了 2) 底面スラブ構築 3) 内部躯体完成後

図13 各工事過程における工事区域近傍地点と遠方地点の増幅特性の相違