

FEM 地震応答解析による不整形地盤の地盤ひずみ分布特性と ばね質点モデルについての考察

Characteristics of the ground strains in the irregular grounds by seismic response analysis using FEM
and study on the spring-mass modeling

大塚 久哲*, 橘 義規**, 川野 亮***

Hisanori Otsuka, Yoshinori Tachibana and Ryo Kawano

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

** 工修 (株) オリエンタルコンサルタンツ 東京事業本部 (〒213-0011 川崎市高津区久本3-5-7)

*** 九州大学大学院 工学研究院建設システム工学専攻 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

It has been found that earthquake motion is amplified on the irregular ground. In seismic design for axial direction of the long underground structure, the ground strain seems to be important, because the behaviors of the underground structures are dominated by the ground motions. In this paper, 2-dimensional FEM analysis is carried out for various irregular grounds, and characteristics of the ground strains in the these grounds are investigated. Furthermore the spring-mass modeling for irregular grounds is discussed.

Key Words: irregular ground, ground strain, 2-dimensional FEM analysis, spring

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震では、橋梁をはじめとする土木構造物に甚大な被害が発生した。従来、耐震性の高いとされてきた地中構造物の中にも大きな被害を受けたものもあった。地上構造物と異なり、周囲を地盤に囲まれている地下構造物の地震時挙動は、地震時に地盤に生じる変形に追従するという特徴がある。そのため、地震時の地盤の挙動を正確に把握することは、地中構造物の耐震性を評価する上で必要不可欠である。特に、地形や基盤の深さ、土質定数等の地盤条件が急激に変化する不整形地盤では、成層地盤と比較して地震動が増幅することが指摘されている。

地震動の増幅特性に及ぼす地盤の不整形性の影響については、これまでに数多くの研究が進められている。江尻・後藤¹⁾、田村ら²⁾は基盤不整形構造をもつ地盤に対して、FEM地震応答解析を行い、水平成層地盤と比較した場合の地表面加速度応答スペクトルの増幅率を求めている。

ところで、既往の地震の被害調査によると、埋設管路の主要な被害要因の1つは地形・地盤条件の変化部における地盤のひずみであることが指摘されており、不整形地盤の地震時挙動について議論する場合、加速度等の地震動の大きさの外に、地盤のひずみ・応力についての議論も重要となる。神山ら³⁾は不整形地盤に起因する動ひずみ分布の特性をアレー観測地点における実測値と理論シミュレーションに基づき考察している。しかしながら、このような研究は未だ非常に少ない。

以上のような現状に鑑み、本研究では、6種類の不整形地盤モデルについて、FEMによる地震応答解析を実施し各不整形地盤における地下構造物軸線方向の耐震設計に資するため、ひずみ分布の特徴について検討した。

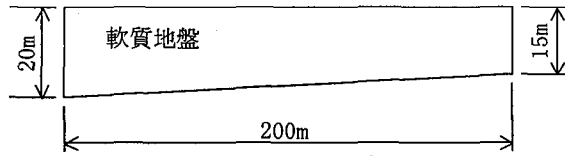
動的地盤変位分布の算定は、実務レベルではばね質点モデルによる地震応答解析で行うことが多いが、この場合質点の配置で地盤のひずみ分布が異なってくる可能性がある。そこで、同様の不整形地盤を対象にばね質点モデルにより解析し、FEMモデルとの解析結果の比較を行って、ばね質点モデルのモデル化についての考察を行った。

2. 現行指針における不整形地盤の取り扱い

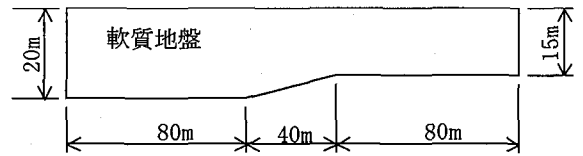
既往の地震における地下構造物の被害は、地震時にひずみが局所的に集中する地盤条件変化部付近で発生する傾向にあることから、各種設計基準では地盤条件変化部の取り扱いが示されている。

例えば共同溝設計指針⁴⁾では、地盤条件変化部を200m以内の区間で地盤の固有周期差が0.3秒以上の区間と定義し、このような条件に当てはまる場合は一様地盤において算出した地震時増分断面力に地盤条件変化部における断面力の割増し係数をかけることで、地盤の不整形性の影響を考慮している。

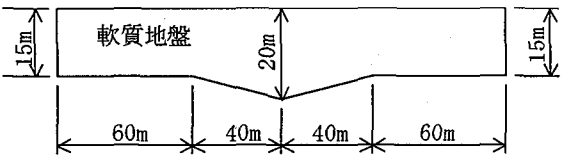
また高圧ガス導管耐震設計指針⁵⁾では、基盤傾斜角が5°以上の不整形地盤を対象とし、一様地盤における地盤ひずみに基盤面が傾斜していることによって生じる地盤ひずみを重ね合わせるにより地盤の不整形性の影響を考慮している。



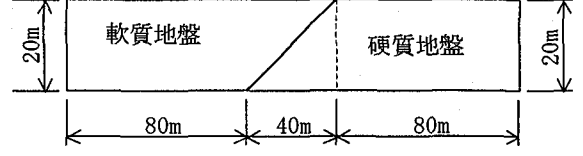
① 基盤面傾斜モデル



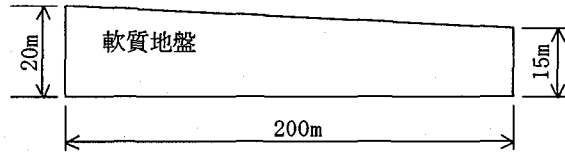
② 基盤段差モデル



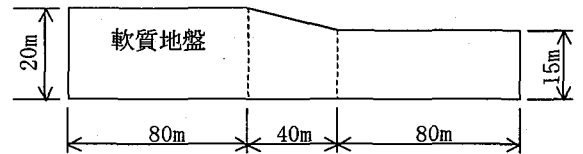
③ 埋設谷モデル



④ 硬質地盤露頭モデル



⑤ 地表面傾斜モデル



⑥ 地表面段差モデル

図-1 対象地盤タイプ

表-1 地盤物性値

	ポアソン比 ν	せん断波速度 V_s (m/sec)	せん断弾性係数 G_s (tf/m ²)	単位体積重量 γ (tf/m ³)	減衰定数 h
軟質地盤	0.45	100	1837	1.8	0.15
硬質地盤	0.45	300	18367	2.0	0.05

($G_s = \rho V_s^2$ とした)

表-2 簡易式によるせん断土柱の固有振動数

	せん断土柱の固有振動数(Hz)	
	浅い方または硬い方	深い方または軟らかい方
① 基盤面傾斜モデル	1.67	1.25
② 基盤段差モデル	1.67	1.25
③ 埋設谷モデル	1.67	1.25
④ 硬質地盤露頭モデル	3.75	1.25
⑤ 地表面傾斜モデル	1.67	1.25
⑥ 地表面段差モデル	1.67	1.25

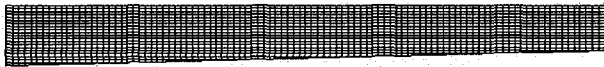


図-2 メッシュ図の一例 (① 基盤面傾斜モデル)

基盤面が傾斜していることによって生じる地盤ひずみは、同指針作成時に実施したFEM動的応答解析の結果から最大値の0.3%が基準として設定されている。

このように不整形地盤におけるひずみ増分の規定はあるものの、不整形地盤の種類の設定が少ないなど、今後のさらなる研究が必要である。

3. 対象地盤タイプおよび解析条件

3.1 対象地盤タイプ

本研究で対象とする地盤タイプは図-1に示す6種類の不整形構造である。①は基盤面が一様に傾斜しているモデルであり、②は基盤面の中央部に長さ40m、高さ5mの一方方向に傾斜した段差があるモデルである。③は基盤面の中央部に長さ80mの谷のある左右対称なモデルである。④は軟質地盤中に硬質地盤が露頭している場合を想定したモデルである。⑤は地表面が一様に傾斜しているモデルであり、⑥は地表面の中央部に長さ40m、高さ5mの段差があるモデルである。

地盤条件は④以外は軟質地盤のみの1層地盤とし、④は軟質地盤と硬質地盤の2層地盤である。解析に用いた地盤物性

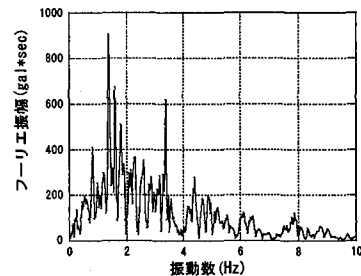


図-3 JMA神戸波のフーリエスペクトル

値を表-1に示す。また、すべてのモデルでモデル幅は200mとした。表層厚については表層厚の異なるモデル(④以外)では、最も厚い部分で20m、最も薄い部分で15mとし、④では20mとした。ここで、式(1)により浅い方と深い方(または軟らかい方と硬い方)のせん断土柱の固有振動数を求めれば表-2を得る。各モデルは表-2に示した値の中間に基本固有振動数があるものと思われる。

$$f = \frac{1}{T_G} = \frac{V_s}{4H} \quad (1)$$

3.2 解析条件

地震応答解析は二次元FEMで行った。メッシュ間隔は、水平方向2m、鉛直方向1mを基本とした。メッシュ図の一例を図-2に示す。地盤は地震時に強い非線形性を示すことが知られているが、ここでは基本的な応答特性を捉えるために線形解析とした。数値解析法はNewmarkの β 法による直接積分法で、 $\beta = 1/4$ とした。また、境界条件は側方では粘性境界、底面では固定境界とした。入力波は、まず地盤の固有振動数と入力波の振動数との関連を検討するためにさまざまな振動数をもつ正弦波として検討を行い、次いで道路橋示方書V編⁶⁾、I種地盤タイプIIの標準波形(JMA神戸NS)を用いた解析を行った。図-3に示すように、この波は1.37Hz付近に最大ピークをもつ波である。

4. 解析結果

この章では、FEMによる対象地盤の固有値解析、地震応答解析の結果について地盤の不整形性が地震時応答に及ぼす影響について考察する。

4.1 固有値解析結果

地震応答解析に先立ち、対象地盤モデルの基本的な振動特性を把握するために固有値解析を行った。各モデルの固有値解析の結果、主要と考えられるモードについて表-3に示す。表-2の結果と比較して、1次および2次の固有振動数は、地盤モデルの深い方と浅い方（軟らかい方と硬い方）のせん断土柱の固有振動数にほぼ対応していることが分かる。埋設谷モデルでは1次の有効質量が他のモデルと比べて大きく、硬質地盤露頭モデルでは1次と2次の差が大きいことが知られる。

4.2 正弦波入力の結果

この節では、正弦波により加震した場合の結果について考察する。正弦波の最大振幅は100galとし、④以外のモデルでは振動数を0.4Hzから4.0Hzまで、④では5.0Hzまで変化させた。

(1) 最大加速度

各振動数における加速度応答倍率を図-4に示す。図-4を見ると①では1.3Hzと1.6Hzの2箇所に明確なピークがあり、倍率はそれぞれ4.6倍、4.2倍である。この振動数は地盤モデルの1次と2次の固有振動数に対応していることから、共振が起こり応答が増幅したものと考えられる。同様に②、⑤、⑥では、地盤モデルの1次と2次の固有振動数付近でピークが表れている。

③では1次の固有振動数付近の1.5Hzで5.1倍のピークがあるのみである。固有値解析の結果を見ると、このモデルでは1次モードの有効質量比が70%となっており、1次モードの影響が支配的であるために加速度応答倍率にピークが1箇所しか表れなかったと考えられる。

④では1.3Hzで4.5倍、3.7Hzで8.0倍となっている。硬質

表-3 固有値解析結果

	①基礎面傾斜モデル		②基礎段差モデル		③埋設谷モデル	
次数	1	2	1	2	1	3
固有振動数(Hz)	1.35	1.57	1.31	1.62	1.53	1.84
刺激係数	18.67	12.65	18.33	11.19	20.46	-7.38
有効質量比	0.55	0.25	0.54	0.20	0.74	0.10
	④硬質地盤露頭モデル		⑤地表面傾斜モデル		⑥地表面段差モデル	
次数	1	2	1	2	1	2
固有振動数(Hz)	1.33	3.90	1.35	1.57	1.30	1.61
刺激係数	15.93	14.07	18.51	-12.82	18.46	10.16
有効質量比	0.34	0.26	0.55	0.26	0.55	0.17

地盤の応答倍率が高いのは、表-1に示すように硬質地盤の減衰定数を0.05と軟質地盤より小さな値を設定しているためである。

図-5に各モデルの代表的な最大加速度の分布を示す。まず①について見てみると、低振動数（0.4～1.3Hz）では、表層地盤の厚い部分の地表面で最大値が発生し、振動数が高くなっていく（1.4～3.4Hz）と表層地盤の薄い部分へ移動していく。さらに高振動数（3.6Hz～）になると地中部に最大値が表れる。②、③、⑤、⑥についても同様に入力波の振動数の変化とともに最大加速度発生位置が移動していき、地盤の固有振動数を超えた正弦波の場合には最大加速度が表れる場所が地中の深いところへ移動していく。

④ではモデル全体にわたって表層地盤の厚さに変化はないが、モデルの左右で地質が異なっている。このため、まず低振動数（0.4～1.3Hz）では軟質地盤の地表面で最大値が表れ、振動数が高くなる（2.4～3.2Hz）と軟質地盤と硬質地盤の層境界付近の地表面および硬質地盤の地表面で最大値が表れるようになる。さらに高振動数になる（3.6Hz～）と硬質地盤地表面のみに最大値が表れるようになり、地中部の応答は大きくならない。

(2) 地盤の直ひずみ

図-6にそれぞれの地盤モデルの中央部から左右60m間における地盤の最大水平直ひずみ分布を示す。ひずみ分布は、地表面が水平モデルでは地表面を深度0mとし、深度0m、5m、10m位置の水平線に沿ってまとめたものであり、地表面が水平でないモデルでは、地盤厚の最も薄い方の地表面を深度0mとし、深度0m、5m、10m位置の水平線に沿ってまとめたもので

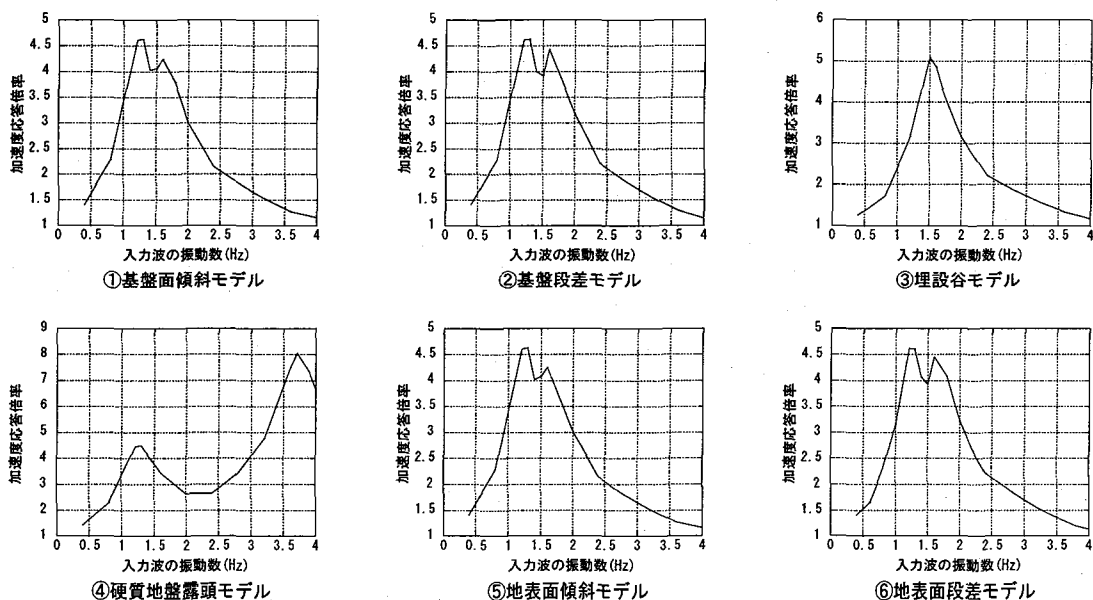


図-4 加速度応答倍率（正弦波入力）

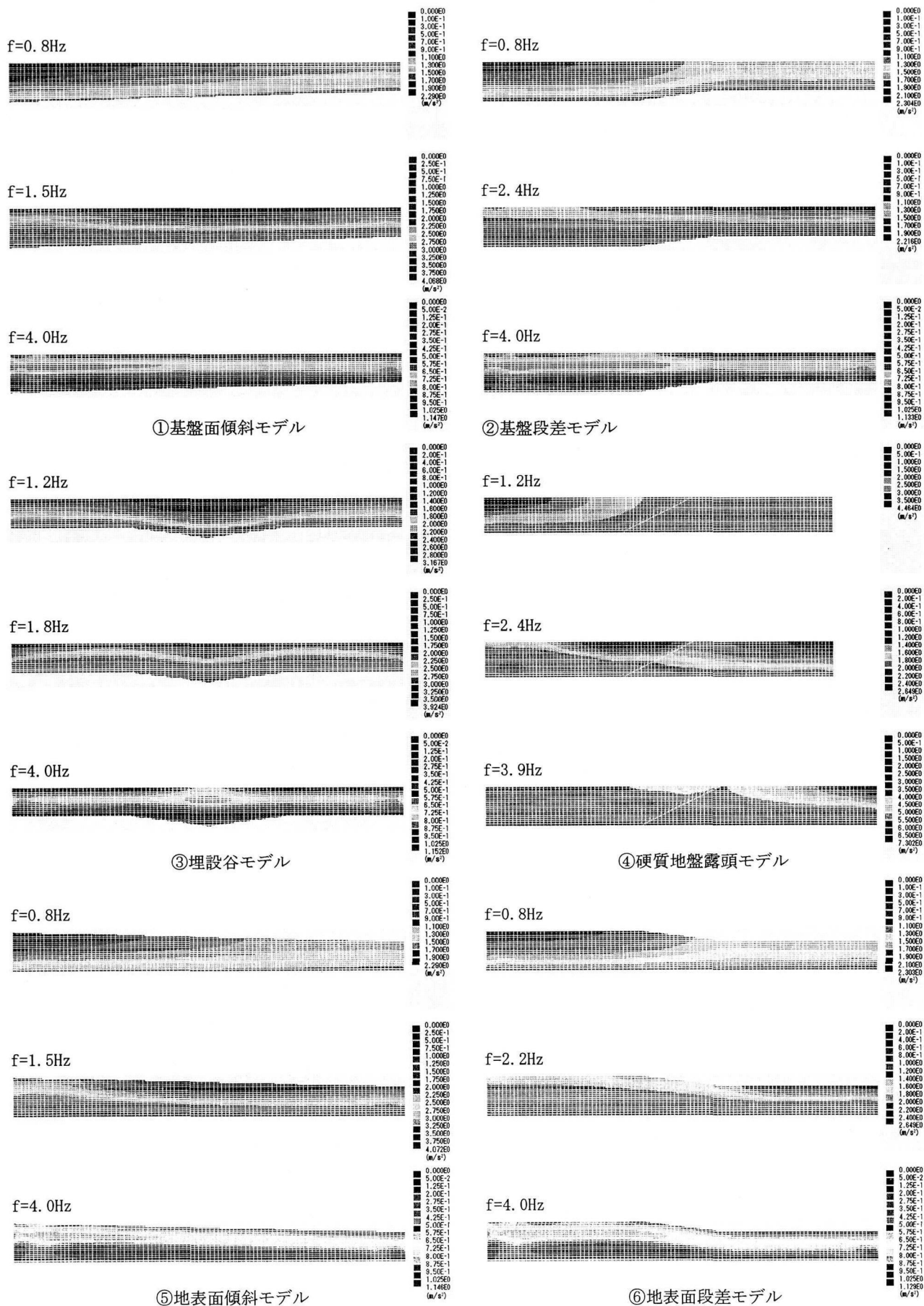


図-5 最大加速度分布（正弦波入力）

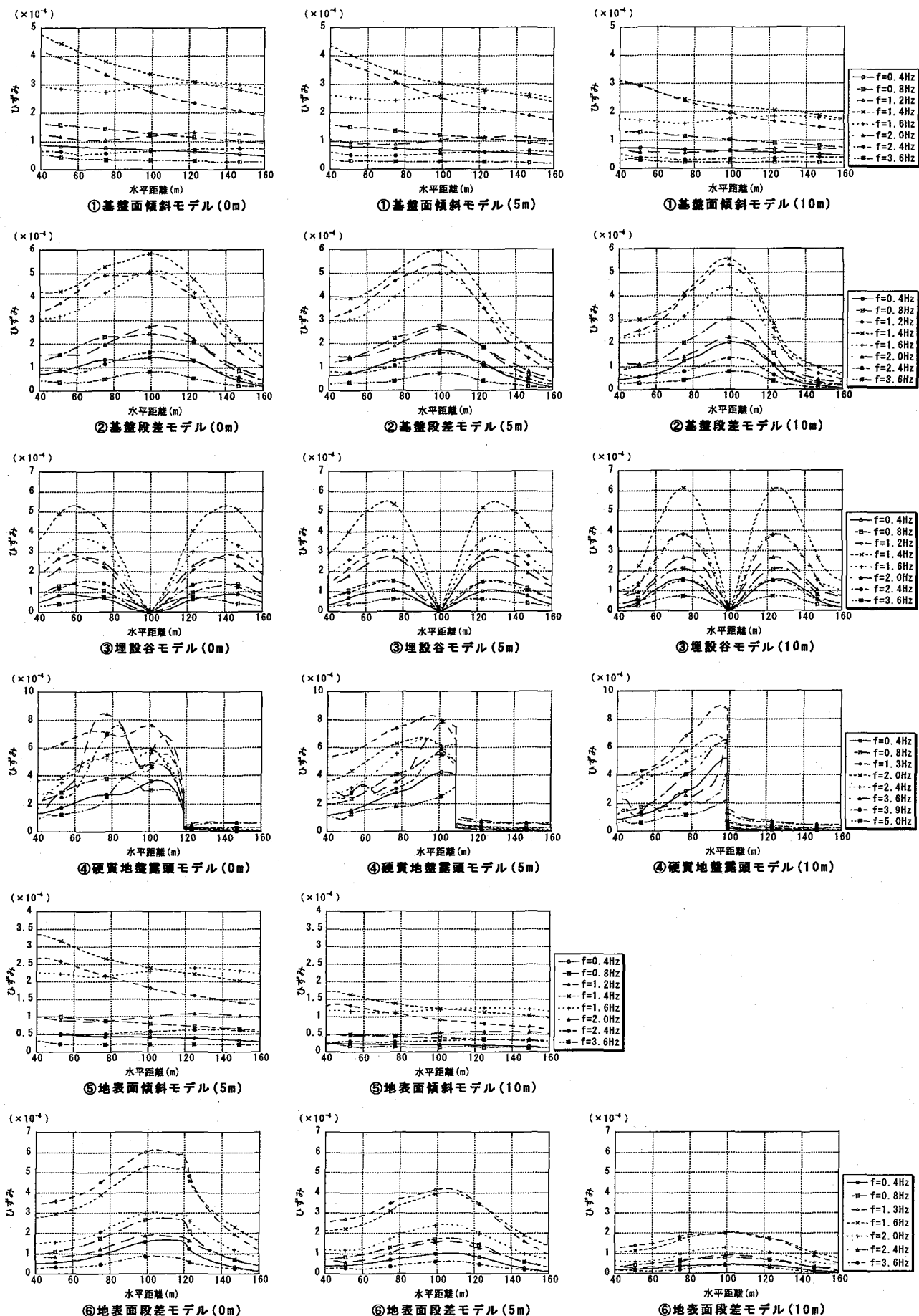


図-6 地盤ひずみ分布 (正弦波入力) [注: 水平距離 100m の位置が地盤モデルの中央]

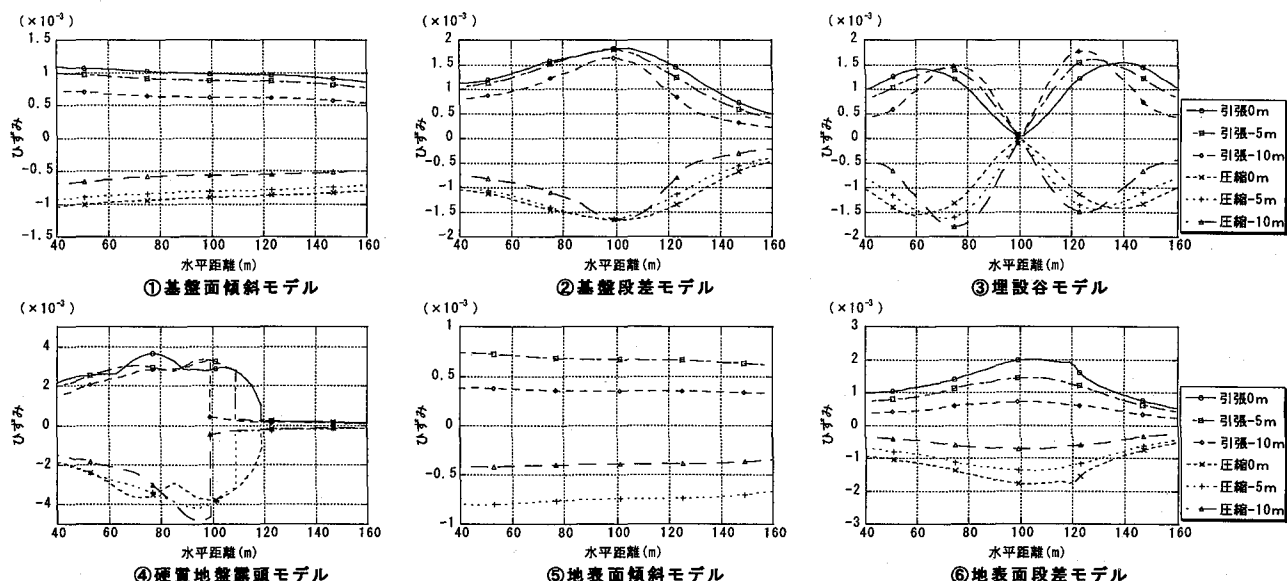


図-7 地盤ひずみ分布 (地震波入力)[注: 横軸は図-5と同じ]

ある。またここでひずみという場合、水平直ひずみのことをさす。以下にそれぞれの地盤モデルでの最大ひずみ分布の特徴を述べるが、基本的に入力波の振動数が地盤の基本固有振動数に近くなれば地盤が共振して、ひずみは大きくなる傾向にあることはいずれの地盤モデルでも同じである。

まず、①では地盤の固有振動数程度の波 ($f=1.4\text{Hz}$) までは地盤が厚いほどひずみが大きい、それ以上の振動数の波になると地盤が薄いほどひずみが大きくなる。これは土柱としての地盤の基本固有振動数が厚い方で小さく、薄い方で大きくなることに対応している。

②では基礎変化部での応答が大きくなっており、①のひずみ分布と明らかな差異が生じている。入力波の振動数が地盤の基本固有振動数より大きくなると、最大応答は、段差部中央より地盤の浅い方へシフトする。応答値の大きさは入力波の振動数に依存するが、分布形状においては振動数の影響は小さい。また深度が大きい方が段差の影響を受けて基礎変化部でのひずみの増加が顕著である。

③では深度0mにおいては、谷の始まり部で最大応答値が現れているが、深くなるにつれ谷の底の方(モデル中央部)へ最大応答値の発生位置が移動する。地盤モデルが左右対称なためひずみ分布は逆対称となり、中央部でのひずみは零となる。

④では深度が大きいほどひずみが大きく、軟質地盤と硬質地盤の層境で最大値が発生しているが、深度が小さくなるにつれて最大値の発生地点は層境から離れる。特に、深度0mにおける分布では、高振動数(硬質地盤の固有振動数に近い振動数)の正弦波を入力した場合に、軟質地盤と硬質地盤の層境から離れた位置(水平距離80m付近)で最大値が発生している。深度5m、10mではこの傾向は見られない。深度5mの分布では、1次の固有振動数(表層地盤の固有振動数にほぼ対応)を越えるといったん応答は減少するが、硬質地盤の固有振動数付近では再び応答が大きくなる。

また、硬質地盤に比べて軟質地盤のひずみが極端に大きく、軟質地盤の固有振動数付近で最大値をとる。

⑤では①と同様に地盤の固有振動数程度の波 ($f=1.4\text{Hz}$) までは地盤が厚いほどひずみが大きい、それ以上の振動数の

波になると地盤が薄いほどひずみが大きくなる。

⑥では②と同様な傾向となっているが、傾斜部が地表面にあるため深度が浅いほど段差部のひずみの増大が顕著になる。

各モデル間でのひずみの大小関係について見てみると、不整形性の顕著な④が最も大きく、次に②、③、⑥が大きい。不整形性の程度が小さい①、⑤はそれと比較して小さい。④のような地盤では設計上特に留意すべきであるといえる。

4.3 地震波入力結果

前節では正弦波を入力した場合の地盤の応答について見たが、本節では、地震波を入力した場合の結果について考察する。図-7に地震波入力時の各地盤モデルのひずみ正負(引張、圧縮)の分布を示す。JMA神戸NS波は1.37Hz付近に最大ピークをもつ波であり、これは解析地盤の1次固有振動数より若干大きい。

①、⑤では表層が厚いほど、ひずみは大きくなる。各深度で比較すると深度が浅くなるにつれて、ひずみは大きくなる。

②では最大値は基礎変化部中央で発生している。また各深度で比較すると深度が浅くなるにつれて最大値は大きくなる。

③では最大値の発生位置は深くなるにつれてモデル中央(表層地盤が一番厚い所)に近づく。また各深度で比較すると深度が大きくなるにつれて最大値は大きくなる。

④では軟質地盤と硬質地盤でのひずみを比較すると、軟質地盤で極端に大きなひずみが発生することが分かる。圧縮ひずみでは深いほど最大ひずみが大きくなり、逆に引張ひずみでは浅いほど最大ひずみが大きくなる。最大値の発生位置は深くなるほど軟質地盤と硬質地盤の層境に近くなる。

⑥では最大値は地表面変化部で発生している。また各深度で比較すると深度が浅くなるにつれて最大値は大きくなる。

ここで正弦波加震時のひずみの分布形状と比較してみると②、③、⑥は傾向が同じであり、①、⑤についても地盤の基本固有振動数程度までの正弦波を入力した場合と同様の傾向となっている。④では軟質地盤で大きなひずみが発生する点、深くなるほど最大発生位置が層境に近づく点が一致している。

5. ばね質点モデルによる地震応答解析

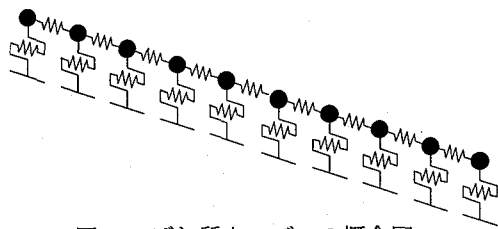


図-8 ばね質点モデルの概念図

表-4 モデル中央位置の最大変位 (ばね質点モデル)

	質点間隔		
	2m	5m	10m
②基盤段差モデル	0.1658	0.1658	0.1658
③埋設谷モデル	0.1779	0.1781	0.1789

単位: m

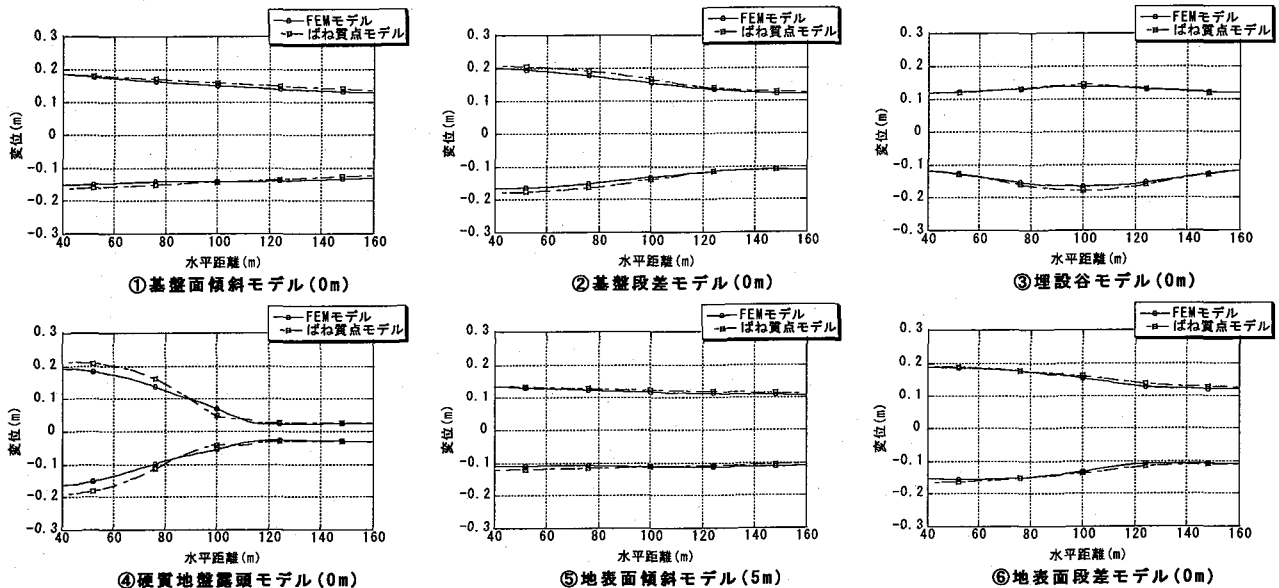


図-9 地盤変位分布 (地震波入力) [注: 横軸は図-5 と同じ]

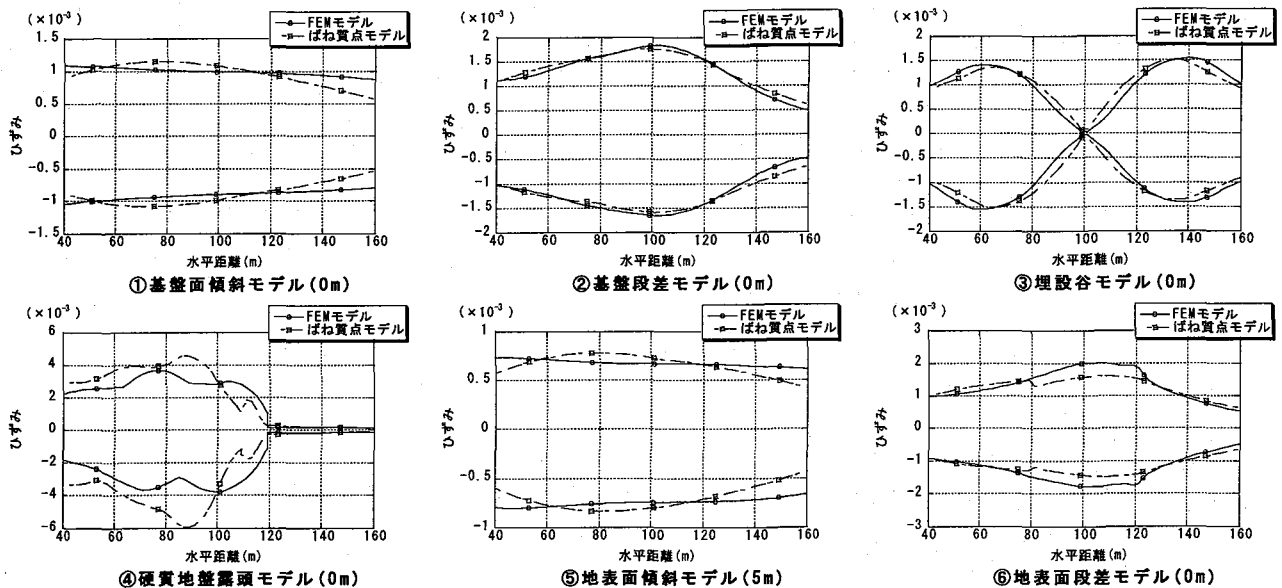


図-10 地盤ひずみ分布 (地震波入力) [注: 横軸は図-5 と同じ]

前章までは、FEMによる地震応答解析に基づき、不整形地盤のひずみ応答特性について考察してきた。本章では、動的地盤変位分布の算定に用いられるばね質点モデルの適用性について、FEM解析との比較により検討を行う。

5.1 ばね質点モデルについて

ばね質点による地盤のモデル化は、対象地盤を適当な間隔で鉛直方向にスライスし、各スライスを一質点系でモデル化した各質点間を地盤の弾性変形に基づいて求めたばねで結合して行う^{7,8)}(図-8参照)。本研究では、ばね質点モデルの質点間隔をFEMモデルの要素間隔と同じ2mとしたケースを基本と

し、②、③については質点間隔を5m、10mとした解析も行い検討している。

5.2 最大変位分布

図-9にFEMおよびばね質点モデルの地盤表面の最大応答変位分布を示す。④以外は地盤変化部でばね質点モデルの応答が大きくなっているが最大で9%程度の差であり、全体的にばね質点モデルとFEMモデルの結果はよく一致している。④について見てみると、分布に明らかに差異が見られ、最大で30%程度の差となっており精度が悪い。ばね質点モデルの質点間隔を変えた②、③において、モデル中央位置の最大変位

表-5 モデル中央部の最大ひずみ（ばね質点モデル）

	質点間隔		
	2m	5m	10m
②基盤段差モデル	1.765E-03	1.768E-03	1.772E-03
③埋設谷モデル	1.509E-03	1.513E-03	1.543E-03

を比較すると表-4 のようであり、ほとんど差はないといえる。

5.3 最大ひずみ分布

図-10 に FEM およびばね質点モデルの地盤の最大ひずみ分布を示す。図中には示されていないが、すべてのモデルに共通の傾向として、ばね質点モデルではモデル端でひずみが 0 に近づくことを確認している。以降、各モデルについて個別に見ていく。

①、⑤では FEM モデルのひずみ分布は地盤が厚いほどひずみが大きくなるが、ばね質点モデルではモデル端でひずみが 0 に近づくため、中央部で最大値をとり、ひずみの勾配が大きい。

②では FEM モデル、ばね質点モデルともに基盤変化部で大きなひずみが生じており、大きさ、分布形状ともかなり一致している。

③では両モデルの最大値は同程度であるが、発生位置が若干異なっており、ばね質点モデルの方がモデル中央寄りに最大値を生じている。

④では軟質地盤で大きなひずみを生じているのは両モデルで共通であるが、その値はばね質点モデルの方が FEM の値の最大で 2 倍となっており、精度が悪いことがわかる。

⑥ではばね質点モデルの値の方が FEM の値より小さく、この差はモデル中央部で 20% 程度である。

また、ばね質点モデルで質点間隔を変えた②、③において、モデル中央部の最大ひずみを比較すると表-5 のようであり、質点間隔による差はほとんどないといえる。

以上のようにばね質点モデルでは、④の硬質地盤露頭モデルで最も精度が悪く、実務設計上の許容範囲を超えていると判断される。

6. 結論

本研究では、不整形構造を有する地盤を対象に正弦波と実地震波に対して FEM による地震応答解析を行った。また、同様の地盤に対してばね質点系でのモデル化を行い、解析結果を FEM モデルと比較した。本研究により得られた知見を以下に記す。

(1) 地盤の加速度倍率と分布に関し、

- ・正弦波加震時の加速度応答倍率は共振現象のために地盤モデルの固有振動数付近で最大となる。硬質地盤露頭モデルでは硬質地盤の減衰定数が軟質地盤より小さいため、加速度倍率が大きくなっている。

- ・正弦波加震時の最大加速度の分布は、正弦波の振動数によって異なり、硬質地盤露頭モデル以外では正弦波の振動数が地盤の固有振動数を超えて大きくなるにつれて地中部に最大応答値が生じる。

(2) 地盤の直ひずみに関し、

- ・基盤もしくは地表面が傾斜しているモデルでは、入力波が正弦波の場合、地盤の固有振動数と入力波の振動数の大小関係でひずみ分布に差異が見られた。入力波が地震波の場合、ひずみは地盤の厚い方で一様に大きい。

- ・基盤もしくは地表面に段差があるモデルでは、入力波に関わらず段差の影響を受けて段差中央部付近でひずみが大きい。

- ・埋設谷モデルでは入力波に関わらず基盤変化のはじまり部分で最大値が発生する。

- ・硬質地盤露頭モデルでは、硬質地盤に比べて軟質地盤のひずみが極端に大きく、深度が深くなるにつれてひずみ最大点が層境に近づいてくる。

(3) ばね質点モデルに関し、

- ・最大変位分布は硬質地盤露頭モデル以外では FEM モデルとよく一致する。

- ・最大ひずみ分布は、基盤段差モデルと埋設谷モデルでは FEM モデルとほぼ同等の結果が得られた。しかし、硬質地盤露頭モデルにおける両者の結果の相違は実務設計上の許容範囲を超えていると判断される。

- ・基盤段差モデル、埋設谷モデルについて、モデルの質点間隔を変えて解析を行った。結果、これらのモデルでは質点間隔の影響は小さく、質点間隔を 10m としても 2m の場合と同程度の結果が得られた。

本研究では、6 種類の不整形地盤の水平直ひずみ分布について分布傾向を明らかにすることができたが、一様地盤に対する割増しに関しては定量的な評価を行うには至らなかった。今後、地盤の非線形性を考慮した上で数値計算を重ねるとともに、異なる地震波に対しても解析を行うつもりである。

謝辞：本研究の数値計算の一部には、九州大学工学部地球環境工学科 4 年吉村茂君の協力を得た。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 江尻謙嗣, 後藤洋三: 基盤不整形性の影響の設計震度スペクトルへの導入に関する基礎的検討, 土木学会論文集, No. 501/ I -29, pp173-182, 1994. 10
- 2) 田村敬一, 千葉光, 本田利器, 中尾吉宏: 不整形地盤における地震動増幅特性の簡易評価法, 第10回日本地震工学シンポジウム論文集, pp. 869-874, 1998. 11
- 3) 神山真, 須藤鉄矢, 佐藤勉, 鈴木猛康: アレー観測および応答シミュレーションによる不整形地盤の地震動ならびに動ひずみ特性, 第25回地震工学研究発表会講演論文集, 1999. 7
- 4) (社) 日本道路協会: 共同溝設計指針, 1986. 3
- 5) (社) 日本ガス協会: 高圧ガス導管耐震設計指針, 2000. 3
- 6) (社) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 1996. 12
- 7) 建設省土木研究所: 沈埋トンネルの軸線上の断面力および変位の地震応答解析法に関する研究, 土木研究所資料第1193号, 1977. 3
- 8) 土木学会: 開削トンネルの耐震設計, 1998. 10

(2000 年 9 月 14 日 受付)