

箇所別に異なる入力地震動を考慮した 不整形地盤の応答に関する研究

橘義規¹・大塚久哲²・古川愛子³・矢野恵美子⁴・田中宏典⁵

¹(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 ニッセイ新溝の口ビル)

E-mail:tachibana@oriconsul.co.jp

²九州大学大学院教授 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)

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

³九州大学大学院助手 工学研究院建設デザイン部門(同上)

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

⁴九州大学大学院工学府建設システム工学専攻(同上)

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

⁵九州大学工学部地球環境工学科(同上)

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

トンネルのような地中構造物の長手方向の耐震設計を行う場合、基盤面における入力地震動は一樣とは考えられない。設計では入力地震動が一樣でないことを地震波の位相をずらして入力することで考慮している。本研究では、この位相のずれによる入力手法の妥当性の検討を目的としている。まず断層モデルを用いて断層近傍の複数点での地震動を作成し、波形の違いや位相ずれを調べた。次に、地震動を一樣として入力した場合、断層モデルで抽出した地震動を入力した場合、位相ずれを考慮して入力した場合について、地盤の応答値を比較した。その結果、断層モデルで抽出した地震動を入力した場合と位相ずれを考慮して入力した場合では、地盤ひずみが大きく異なることがわかった。

Key Words: Phase, irregular ground, fault, ground motion, propagation speed

1. はじめに

共同溝などの線状地中構造物縦断方向の耐震設計は、地中構造物が周辺地盤の変形に追従するという基本的な地震応答特性が考慮され、また適用も簡便であることから応答変位法により行われるのが一般的である。現行の基準類¹⁾では、この応答変位法による外力としての地盤変位分布は、設計実務上の便宜を考慮して、正弦波分布を仮定していることが多い。しかしながら、このような仮定の下での計算は、特に表層の地盤条件の変化が著しいような不整形地盤において、実際の応答との間に無視できない誤差を生じる可能性がある。このため、高い安全性を要求される構造物の設計では、地盤条件の変化を考慮したモデル(質点モデルやFEMモデル)を作成し、動的解析により地盤変位分布が求められている。

質点モデルやFEMモデルによる地盤の解析では、表層地盤をモデル化し、耐震計算上の基盤面に地震動を与える。ここで、耐震計算上の基盤面に到達した地震動は、震源特性、震源から基盤までの伝播経路、および耐震設計上の基盤面以深の地盤の影響を受けたものである。また、断層面から地中構造物の建設地点までの水平距離が大きい場合は、地震波が耐震計算上の基盤面に到達する時刻にずれが生じ、見かけ上基盤面に沿って地震動が伝播することになる。以上の要因により、地中構造物の縦断方向解析で考慮する基盤地震動は、本来一樣ではないと考えるべきである。しかしながら、地震動の箇所別の違いに反映させるほど、伝播経路の影響や耐震計算上の基盤面以深の地盤情報は明らかとなっていない。このため、沈埋トンネルなどの耐震設計実務では、基盤面に地震波が到達する時刻がずれるものとし、位相差入力を

行うことにより両者の影響をまとめて考慮している．なお、直下型地震のように地中構造物の建設地点までの水平距離が小さい場合は、基盤面に到達する直達S波に関しては時間ずれはほとんど無いが、箇所別の地震動の違いを位相差で考慮し、時間ずれを表す見かけの伝播速度もプレート境界型の地震と同等の1～2km/sが用いられている場合が多い．また、沈埋トンネルなどの設計結果によれば、位相差入力を行った方が構造物の応答は大きくなることが多いが、地盤剛性急変部を対象としたFEM解析による地盤ひずみの解析結果によれば、位相差を考慮しない場合に地盤ひずみが最大となる結果が得られている．いずれにしても、位相差入力に関しては、伝播速度をいくらにするかも含め、まだ課題が多い．

本研究では、耐震設計上用いられている箇所別の地震動の違いを位相のずれによるものとして考慮する地震動入力の方法の妥当性についての検討を第1の目的としている．そのために、まず断層モデルを用いて複数の着目地点で地震動を作成し、それらの地震動の位相のずれの算定を行った．次に、箇所別の地震動の違いを直接考慮した入力地震動による2種類の不整形地盤の応答解析を行い、地震動の違いを考慮しない場合と、地震動の違いを位相ずれで便宜的に考慮する場合との3ケースにおいて地盤ひずみおよび地盤変位分布の比較・検討を行った．

2. 地震動の作成

(1) 断層モデル

本研究で使用した断層モデルを図-1、表-1に示す．これは、愛知県の尾張北東部、西三河北西部にある猿投・境川断層をモデル化したものである．[新編]日本の活断層²⁾によれば、実際の断層は2つの断層線から形成され、走向も断層1が226度、断層2が231度、断層3が187度と読みとれたが、本研究では断層の折れ曲がりには考慮せずに直線として扱った．

内陸型地震の場合、その震源深さは15km前後であることが観測記録より知られている．実際、Somerville et al.³⁾によると、すべり量はほとんど深さ5～12kmまでの範囲で生じている．また、兵庫県南部地震の余震の最も深い震源深さは21kmであった．以上の点及び、猿投・境川断層の長さが兵庫県南部地震の断層長さより短い点なども考慮し、断層の最深部が15km程度になるように断層幅を17kmに設定した．

(2) 要素地震動の定義

ここでいう要素地震動とは、アスぺリティを分割してできる小断層による地震の地震動を意味してい

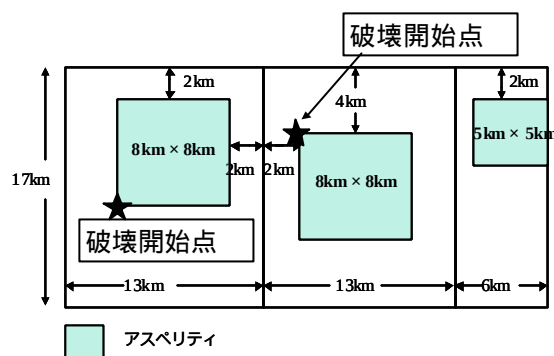


図-1 断層モデル

表-1 断層パラメータ

	断層1	断層2	断層3
断層長さ (km)	13	13	6
断層幅 (km)	17	17	17
傾斜角 (DEG)	65	65	65
せん断波速度 (km/sec)	3.5	3.5	3.5
破壊伝播速度 (km/sec)	2.5	2.5	2.5
地震モーメント (dyna·cm)	5.55×10^{25}	5.55×10^{25}	2.56×10^{25}
ライズタイム (sec)	0.7	0.7	0.5
アスぺリティの面積 (km ²)	8km × 8km	8km × 8km	5km × 5km

る．小断層は1km × 1kmとした．アスぺリティ以外の部分では破壊は起こらないとしている．

今回、想定する大規模の地震動を合成する解析手法として、入倉・釜江の方法⁴⁾を用いる．この方法を用いて大規模地震動を合成する場合、想定する大断層の近傍で発生し、かつ地震動の推定地点で観測された小地震の観測記録（要素地震動）が必要となる．しかしながらほとんどの場合、このような理想的な要素地震動を入手することはできず、本研究においても、猿投・境川断層地点の観測記録は得られなかった．このような場合、釜江らは要素地震動をBooreの方法⁵⁾によって経験的に求め、大規模地震動の合成を行っている．よって本研究でも、要素地震動は人工的に作成したものを用いた．

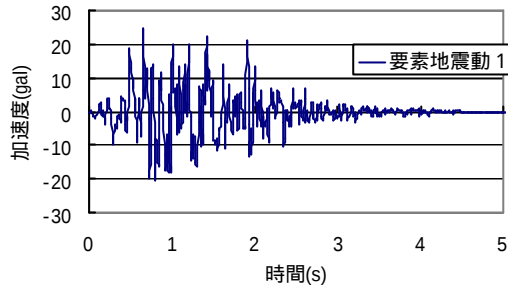
Booreの方法⁵⁾を用いる場合、パラメータとして、震源距離、せん断波速度、密度、応力降下量、地震モーメント、Q値、地震動継続時間が必要である．各断層の要素地震動の地震モーメントはそれぞれ異なるので、各断層毎に要素地震動を作成する．表-2に要素地震動のパラメータを、図-2に各断層毎に作成された要素地震動を示す．

(3) 地震動の増幅の考慮

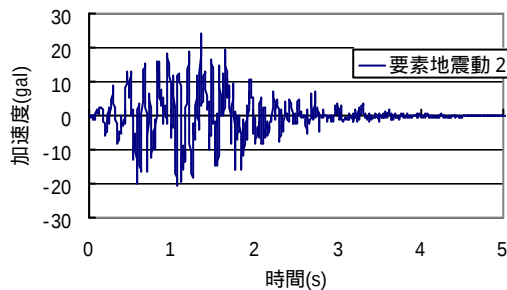
図-2に示した要素地震動は断層面から放出される地震動である．一方、地盤応答解析（後述）では、工学基盤から地震動を入力するため、断層を含む地震基盤面から工学基盤までの地盤条件に応じた増幅を考慮する必要がある．一般には、要素地震動から合成した地震基盤上面における地震動に対して工学基盤までの地盤特性に応じた増幅を考慮し、工学基盤面

表 -2 要素地震の緒元

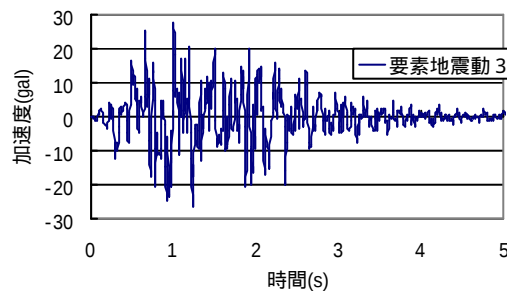
	断層 1	断層 2	断層 3
震源距離 (km)	10	10	10
せん断波速度 (km/sec)	3.5	3.5	3.5
密度 (gf/cm ³)	2.7	2.7	2.7
応力降下量 (bar)	50	50	50
要素地震モーメント (dyna/cm)	1.08×10^{28}	1.08×10^{28}	2.05×10^{28}
マグニチュード	4.6	4.6	4.9
継続時間 (sec)	4.5	4.5	5.6



(a) 断層 1 の要素地震動



(b) 断層 2 の要素地震動



(c) 断層 3 の要素地震動

図 -2 各断層での要素地震動

における地震動を作成するが、本研究では要素地震動にこの増幅を考慮したあとで地震動の合成を行った。これは、後述するように多数の地点で地震動を評価することに配慮したものであるが、工学基盤までの地盤特性を線形モデルとしてとり扱うため、手順の違いによる評価結果の差異はないと考えられる。

今回推定断層として取り上げた猿投・境川断層に近い地点のボーリングデータを Kik-Net (防災科学技術研究所の基盤強震観測網) で検索した。最も近いボーリングデータとして、長久手 (観測コード AICH14, 北緯 35°10'51.6", 東経 137°3'1.4") を採用する。ただし、当該データは深度 210m までで、 $V_s=2.2\text{km/s}$ までしか確認されていない。そこで、最

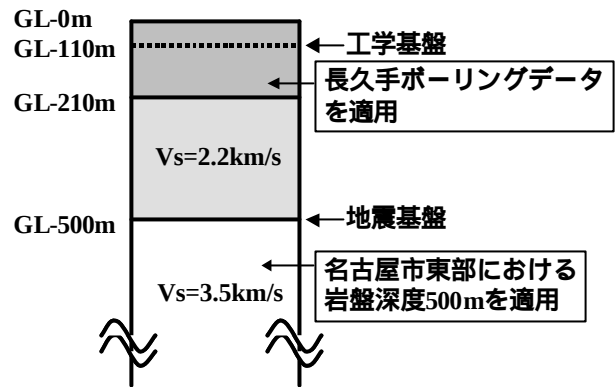


図 -3 地層図

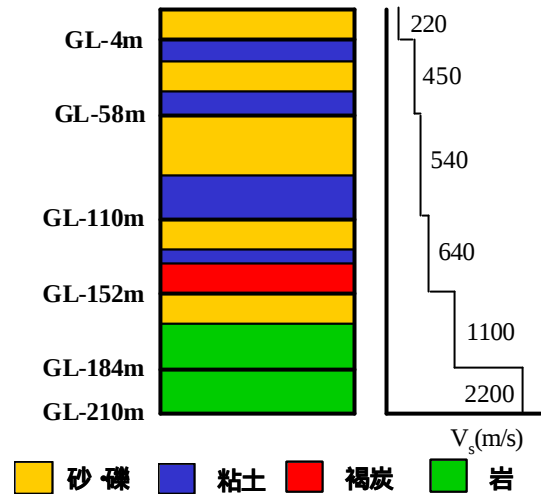


図 -4 長久手のボーリングデータ

表 -3 地盤条件

	砂 礫	岩	基盤
単位体積重量(kN/m ³)	19	23	26
減衰定数	0.005	0.005	0.005

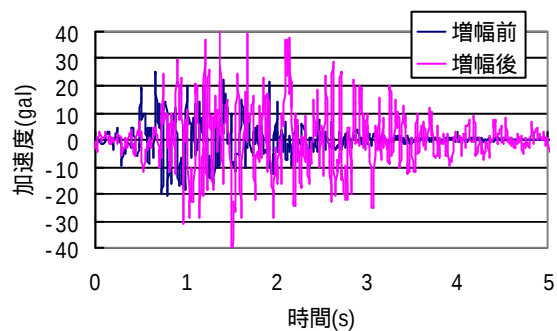


図 -5 要素地震動の増幅結果 (断層 1)

新名古屋地盤図 (1988, (社)土質工学会中部支部) を参考に、重力探査で得られた名古屋市東部における岩盤深度 500m を $V_s=3.5\text{km/s}$ の上面と仮定する。つまり、図-3のように、深度 210m ~ 500m までは $V_s=2.2\text{km/s}$ と仮定し、それ以深は $V_s=3.5\text{km/s}$ とする。また、図-4 に長久手のボーリングデータの概略を示す。表-3 は地盤条件である。

以上の情報より地表から深度 500m までをモデル化し、一次元重複反射理論による振動解析により工学

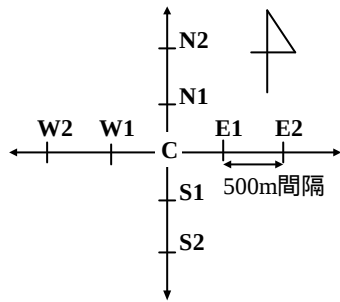


図-6 着目地点の配置(1)

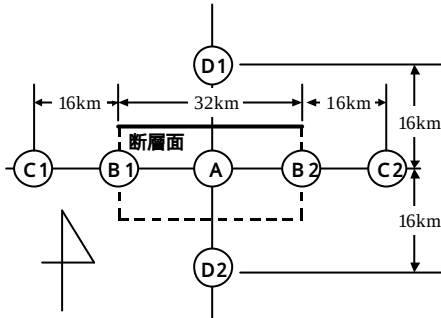


図-7 着目地点の配置(2)

基盤面の地震動を新たな要素地震動として抽出した。増幅の結果の1例を図-5に示す。工学基盤面は、せん断波速度 $V_s=640\text{m/s}$ の地層上面(深度110m)とした。

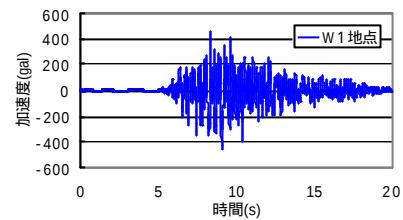
(4) 着目地点の設定

どの地点の地震動を作成するか、着目地点の設定を行う。図-6に示すように、センターC地点を中心とし、500m 間隔で9点を配置する。このまとまりを1地域として、全部で7地域を図-7のように16km 間隔で配置した。

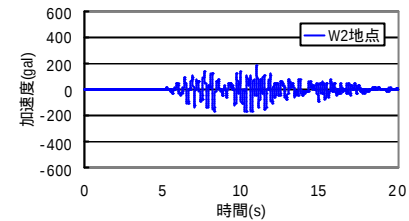
(5) 各地点の地震動の作成

(3)で作成した新たな要素地震動を破壊開始点から順に各小断層で発生させ、当該地点の地震基盤での地震動を発生させた。小断層から地震基盤面までの岩盤は後述のごとく $V_s=3.5\text{km/s}$ の一樣岩盤とした。

このようにして作成した各着目地点における地震動の一部を図-8～図-10に示す。傾向として、断層直上の各地点では地震波形自体が大きく異なっているのに対し、断層の縁や断層から離れた地点では波形は比較的似通っている。これは、断層直上の地点は破壊開始点に近く、また破壊開始点が断層の中心近くに位置するため、断層破壊の進展に伴い小断層から放出される各々の要素地震動の到来方向が複雑であるのに対し、断層の縁や断層から離れた地点では、到来方向がおおむね同方向であることによると考えられる。

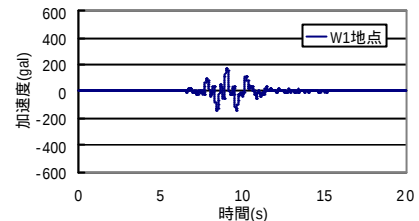


(a) W1 地点

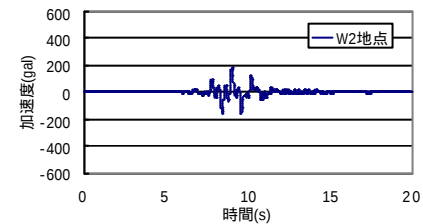


(b) W2 地点

図-8 断層直上地域(A)の波形(破壊開始点)

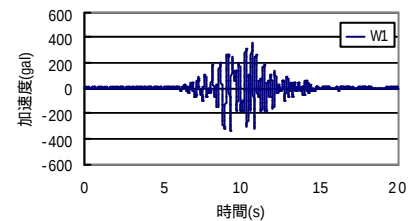


(a) W1 地点

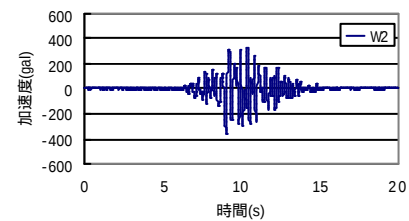


(b) W2 地点

図-9 断層から離れた地域(C2)の波形(破壊開始点)



(a) W1 地点



(b) W2 地点

図-10 断層縁地域(B2)の波形(破壊開始点)

3. 位相ずれの算定

(1) 算定方法

2地点における地震波形の位相ずれを算定する方法として、相互相関関数を用いた。2地点における地震波形のうち、1つの時刻歴をずらして相互相関係数を求めると、ずらした時間（位相ずれ）に対して図-11のようなグラフを得ることができる。これを用いて、相互相関関数がピークとなる時間ずれを位相差と考え、グラフから読みとった。

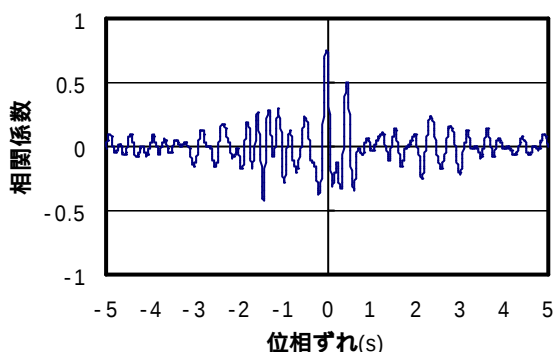


図-11 相互相関関数

(2) 位相ずれの算定結果

断層モデルより作成した地震動にどの程度の位相のずれが生じているかを示すため、表-4に結果の一部を示す。区間E1-Cは、C地点に対するE1地点の地震波の位相ずれを示し、位相ずれが負の時は、起点Cに比べて終点E1の位相が進んでいることを示す。また伝播速度は、2地点間の距離を位相ずれの値で割った値である。

傾向として、断層から離れた地点では位相のずれがほとんどないのに対し、断層の縁では位相のずれがみられる。これは、断層面から離れるほど、相隣り合う2地点（500m間隔）への地震動の到達時間差が小さくなるためである。なお断層直上では前述のように地震波形そのものが異なっているため、それが位相ずれとして評価されているが、相関係数自体はそれほど高くない。

また、図-1に示した破壊開始点の2通りの場合について、地震動の伝播を矢印で表現したものを図-12に示す。破壊開始点とともに、断層上の地点では、破壊開始点から同心円上に広がる断層破壊の進展方向と同方向に地震波が到達していく傾向にあるが、断層面から離れるとその傾向は明確でない。

本算定の結果から、実際に地震波に生じると思われる位相ずれは、断層との位置関係によって大きくその傾向が異なることがわかった。前述のように、断層のごく近傍では地震動波形自体が大きく異なっており、断層から離れると地震動波形自体は似通って、位

表-4 位相ずれの算定結果(破壊開始点)

(a) 断層直上(A地域)

区間	位相ずれ(s)	伝播速度(km/s)
E1-C	-0.06	-8.33
E2-E1	0.72	0.69
N1-C	0.03	16.67
N2-N1	0.02	25.00
S1-C	-0.03	-16.67
S2-S1	-0.04	-12.50
W1-C	0.05	10.00
W2-W1	-0.81	-0.62

(b) 断層から離れた地域(C2地域)

区間	位相ずれ(s)	伝播速度(km/s)
E1-C	0	∞
E2-E1	0	∞
N1-C	0	∞
N2-N1	0	∞
S1-C	0	∞
S2-S1	0	∞
W1-C	0.01	50.00
W2-W1	0	∞

(a) 断層縁地域(B2地域)

区間	位相ずれ(s)	伝播速度(km/s)
E1-C	-0.11	-4.55
E2-E1	-0.12	-4.17
N1-C	-0.04	-12.50
N2-N1	-0.02	-25.00
S1-C	0.07	7.14
S2-S1	0.07	7.14
W1-C	0.12	4.17
W2-W1	0.13	3.85

相ずれはほとんど無い。よって、兵庫県南部地震以降、直下に震源断層がある場合に関しても、震源が遠方にある場合と同様に入力位相差を考慮した耐震設計が行われるケースがあるが、今回検討した範囲からは箇所別の地震動の違いを位相ずれとして考慮するのは必ずしも妥当でないと考えられる。

4. 不整形地盤の応答解析

(1) 地盤モデル

本研究では、図-13に示す2つの不整形地盤に対して、FEMモデルによる地盤の応答解析を行った。

地盤の応答に対する位相ずれの影響を明確にするため、モデル全長は1kmとした。なお、側方の境界条件は、使用ソフトの制約から多点入力を行う場合

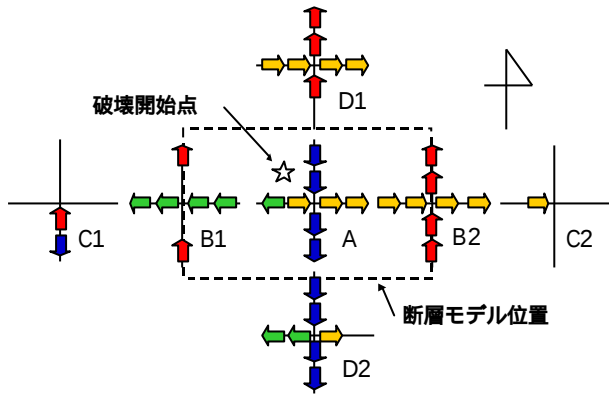


図-12.1 地震動の伝播の様子(破壊開始点 の場合)

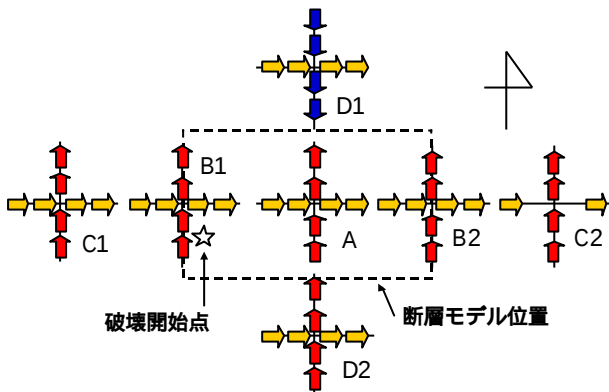


図-12.2 地震動の伝播の様子(破壊開始点 の場合)

は粘性境界を用いることができないため、自由境界としている。このため、応答値の評価はモデルの中央部付近に対してのみ行った。地盤要素のメッシュサイズは、対象波動を捉えるだけ十分な細かいサイズとして、横5m縦1mとした。地盤物性値を表-5に示す。

(2) 地震波の入力方法

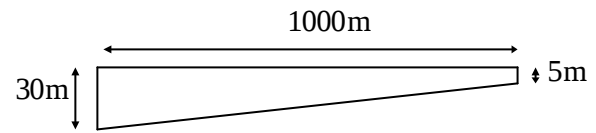
箇所別の地震動を考慮した応答解析を行うために、モデルの節点毎に異なる地震波を入力することのできる多点入力の方法を用いた。具体的には、図-14に示すとおり、基盤面上節点に剛ばね(ばね定数 $1.0 \times 10^5 \text{ kN/m}$)を取り付け、その剛ばねを介して変位波形を入力する。剛ばねを介することで、基盤面より上部の節点にも慣性力として、地震波が伝達される。

(3) 解析手法

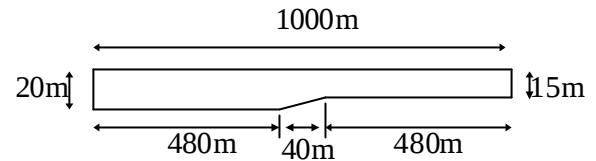
本研究では、耐震設計上用いられている、箇所別の地震動の違いを位相のずれによるものとした解析手法の妥当性の検討を行うことが目的である。そのため以下に示す3つの入力手法について、結果の比較・検討を行った。

考慮なし

箇所別の地震動の違いを考慮しない場合で、各節点には全て同じ地震波を入力する。



(a) 工学的基盤面傾斜モデル



(b) 工学的基盤段差モデル

図-13 解析モデル

表-5 地盤物性値

ポアソン比 ν	せん断波速度 $V_s(\text{m/sec})$	単位体積重量 $\gamma (\text{kN/m}^3)$	減衰定数 h
0.45	100	17.6	0.15

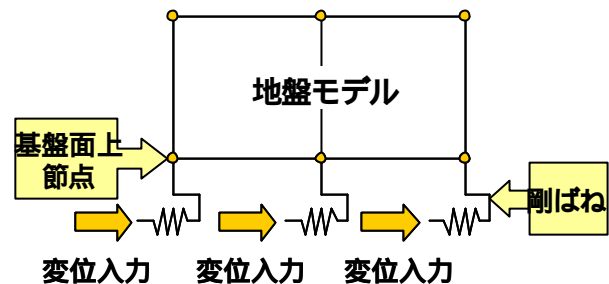


図-14 地震波の入力

考慮あり

箇所別の地震動の違いを考慮する場合で、断層モデルより箇所毎の地震動を作成していき、各節点には、それぞれで作成した地震波を入力する。

位相ずれ入力

箇所別の地震動の違いを考慮する場合で、1つの地震波を用いて、各節点には、位相をずらしてその地震波を入力する。箇所別の地震動の違いを、位相のずれによるものとして考慮したケースである。

(4) 入力地震波の作成

各ケースの検討に用いる入力地震動は破壊開始点によるものを基本とし、以下のように作成した。

考慮なしに用いる地震波

この解析に用いる入力地震波は、地盤モデル中央地点の地震波を断層モデルより作成した。

考慮ありに用いる地震波

地盤モデルの端から20m間隔で点を取り、1kmの直線上に並ぶ51地点の地震動を断層モデルより作成した。地盤中央点は上記と同じである。より正確な応答を見たい中央部200m区間については、有限要素節

点ごとに線形補間した時刻歴波形を各節点多点入力し、そのほかの区間では、3～4節点ずつ同じ地震波を入力していく。図-15に結果の一部を示す。作成した地震波の変位時刻歴波形を比較すると、位相のずれはほとんどなく、各箇所地震波の違いは、位相のずれによるものと言うよりは、波形の違いによると言える。

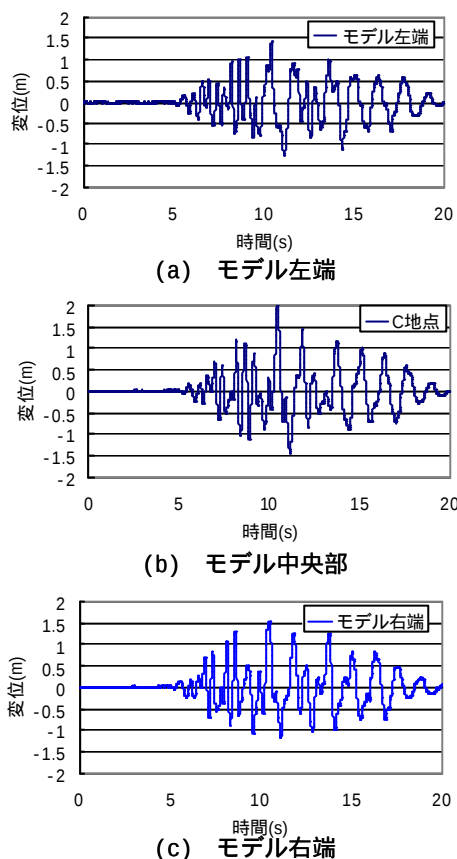


図-15 考慮ありの入力地震動

位相ずれ入力に用いる地震波

地盤モデルの中央位置における地震波を用い、その位相をずらすことによって各箇所の地震波を作成する。この際、耐震設計では一般的に見かけの伝播速度を1～2km/sとしているため、本研究では、このみかけの伝播速度を1 km/s, 2km/s, 5km/sとし、モデルの左端から到達するものとして、地震波の作成および地盤の応答解析を行った。図-16に示すように、伝播速度が速いほど生じる位相のずれは小さくなる。

(5) 応答結果の比較

これらの地震波を用いて、3つの入力方法により2つの不整形地盤モデルの応答値を算定した。図-17, 18に深度5mにおける水平方向の軸ひずみの最大値、および水平変位の最大値を示す。

応答結果の比較においては、箇所毎の地震動を作成して入力する方法を正解と考え、これを基準とし

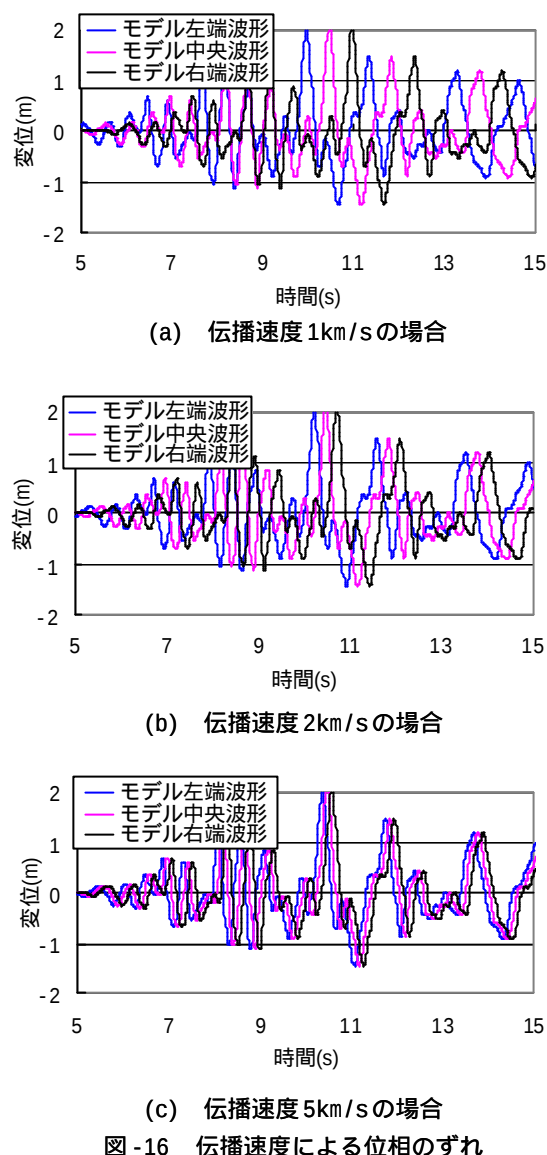
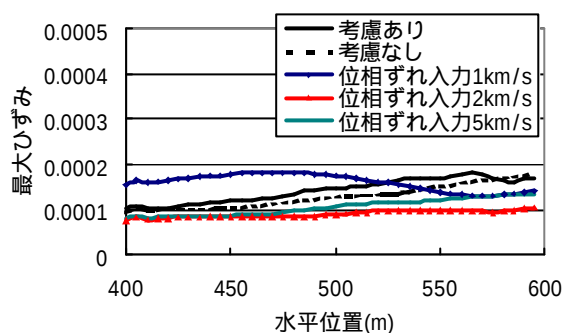


図-16 伝播速度による位相のずれ

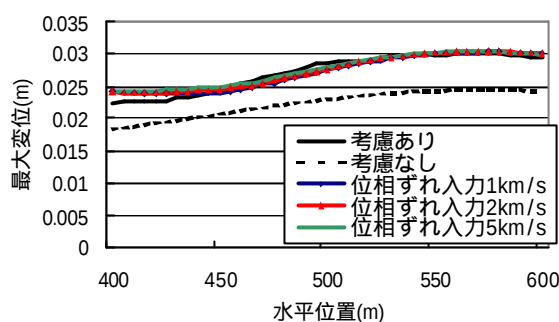
て他を比較した。

不整形の程度が小さい基盤傾斜モデルでは、箇所別の地震動の違いを考慮しないと、ひずみ、変位とも小さく評価される。また、地震動の違いを位相差で考慮した場合、みかけの伝播速度をいくつにするかで、評価されるひずみの値が異なっており、箇所別の地震動を入力した場合との大小関係も一定の傾向はない。

一方、不整形の程度が大きい基盤段差モデルでは、変位分布の評価結果は大差ないが、ひずみの評価は大きく異なる。箇所別の地震動の違いを考慮した場合としない場合では、地盤変化部でひずみが大きくなるのに対し、位相差を考慮すると、地盤変化部でのひずみが小さくなる傾向にあり、みかけの伝播速度が小さいほど変化部のひずみが小さくなる。今回の研究では位相差を考慮する場合の伝播方向をモデル左から右の一方からのみ検討しているため、ひずみの大小関係については明言できないものの、前述し

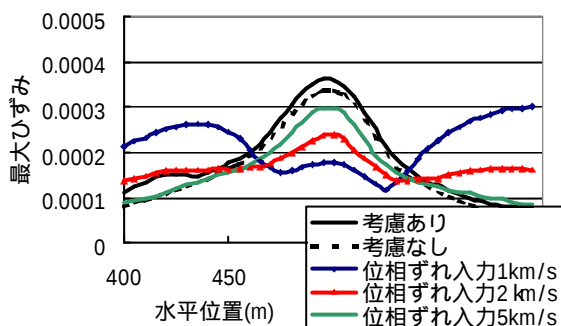


(a) 最大ひずみ分布

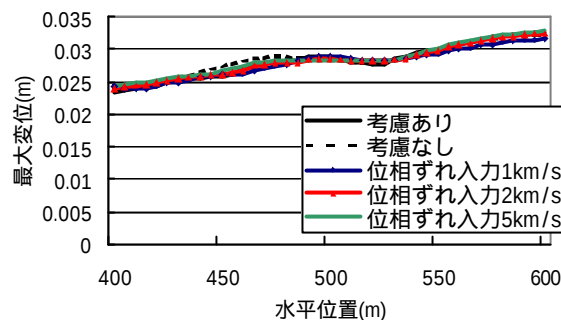


(b) 最大変位分布

図 -17 基盤面傾斜モデル



(a) 最大ひずみ分布



(b) 最大変位分布

図 -18 基盤段差モデル

た位相ずれの評価結果とあわせて考えると、箇所別の地震動を便宜的に位相ずれとして考慮することに関しては十分な注意が必要と考えられる。

5. 結論

本研究で得られた結論を要約すると以下のようである。

- (1) 断層モデルを用いて線状地中構造物縦断方向の耐震設計に用いる地震動の評価を500m間隔で試みた。その結果、断層直上の地点では、500m間隔で評価した地震動波形は大きく異なるが、断層から遠くなるにつれ波形は似通ったものとなった。また、相互相関関数を用いて隣り合う地点の地震動の位相ずれを求めた結果、断層から遠い地点では位相ずれはほとんどなかった。
- (2) 合成した地震動を用いて地盤の地震応答解析を行った結果、従来から行われている見かけの位相差を考慮した解析結果は、箇所別に異なる地震動を考慮した解析結果とは大きく異なる場合があることがわかった。
- (3) 以上より、直下に震源断層がある場合に関しても、震源が遠方にある場合と同様に、箇所別の地震動

の相違を便宜的に位相ずれとして考慮することがあるが、これに関しては十分な注意が必要と考えられる。

- (4) 今回の研究では隣り合う小断層の要素地震動は断層1, 2, 3毎に同一にしており、合成した波形の違いは断層の破壊開始点と地震動の合成地点の位置関係で決まる。要素地震自体が異なる場合、箇所別の地震動の違いを位相差で表現することはより困難になると考えられる。

参考文献

- 1) 日本道路協会：共同溝設計指針，1986.
- 2) 活断層研究会編：[新編]日本の活断層，東京大学出版
- 3) Somerville P. G.，入倉孝次郎，澤田純男，岩崎好規，田居優，伏見実：地震断層のすべり変位量の空間分布の検討，第22回地震工学研究発表会，pp.291-294，1993.
- 4) Irikura K. and Kamae K.：Simulation of strong ground motion based on fractal composite faulting model and empirical Green's function，第9回日本地震工学シンポジウム，pp.E-019～E-024，1994
- 5) Boore D.M.：Stochastic simulation of high frequency ground motions based on seismological models of the

(2005. 3. 15 受付)

A STUDY ON RESPONSE ANALYSIS OF IRREGULAR GROUND CONSIDERING THE DIFFERENCE OF INPUT GROUND MOTION AT EACH LOCATION

Yoshinori TACHIBANA, Hisanori OTSUKA, Aiko FURUKAWA, Emiko YANO,
Hirofumi TANAKA

It is necessary to consider the wave propagating effect in the seismic design of long underground structures. In most cases, this effect is modeled as the phase delay of input ground motions. In this study, the input ground motions at many points were generated directly from the fault model, and the mechanism of phase difference occurrence was investigated. Furthermore, response soil strains of the irregular soil layer models subjected to different types of waves were calculated by use of FEM. These were (1) waves without phase difference, (2) waves considering phase difference and (3) waves generated from fault model. It was found that the results obtained from waves with phase difference have a problem in accuracy of the maximum strain compared to the waves directly generated from fault model.