

線状地中構造物の周辺地盤の地震応答における 入力地震動の位相差の影響に関する研究

渡辺 和明¹・志波 由紀夫²・坂下 克之³

¹大成建設(株)原子力本部 (〒163-0606 東京都新宿区西新宿1-25-1)

E-mail: kwatanab@ce. taisei. co. jp

²大成建設(株)技術センター (〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町344-1)

E-mail: shiba@ce. taisei. co. jp

³大成建設(株)技術センター (〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町344-1)

E-mail: katsuyuki. sakashi@sakura. taisei. co. jp

線状地中構造物の縦断方向の耐震設計では、入力地震動の位相差を考慮した解析が実施される場合がある。本研究では、入力地震動の位相差が線状地中構造物の周辺地盤の地震応答に与える影響を把握することを目的とし、均質整形地盤および不整形地盤を対象に、位相差入力の方法、位相伝播速度およびその方向をパラメータとした比較解析を実施し、以下の知見を得た。1) 位相差入力による均質地盤の地震応答は、1次元土柱の地震応答から概ね評価できる。2) 不整形地盤の基盤傾斜部の地震応答は、入力地震動の位相差によりさらに複雑となり、1次元土柱の地震応答では十分に説明できない。

Key Words : *Underground pipe-like structure, Seismic response analysis, Input earthquake motion, Phase difference, Wave propagation*

1. はじめに

沈埋トンネルのような線状地中構造物の縦断方向の耐震設計においては、入力地震動がトンネル軸方向の工学的基盤上の場所毎で変化する影響を、入力地震動の位相差によって模擬的に考慮している¹⁾。しかし、入力地震動の位相差を考慮した耐震計算法については、明確な評価手法が設計指針等でも規定されておらず、また、位相差の伝播速度についても、その合理的な設定方法が確立していないのが実状である。そのため、実構造物の耐震設計では、地盤の地震応答解析において、斜め入射波解析を代用する方法や入力地震動を剛基盤面上に時間差をもって入力(E+F入射)する方法等が適用されている。

入力地震動の位相差については、地盤剛性急変部を対象としたFEM解析による地盤ひずみに関する検討事例²⁾があるものの、その評価手法を含め、線状地中構造物の地震時挙動に与える影響については、これまで詳細に分析されていない。そこで本研究では、線状地中構造物の周辺地盤として均質整形地盤と不整形地盤モデルを設定し、位相差入力の解析手法として、従来の剛基盤を仮定した手法(E+F入射)に加えて、基盤層の剛性に応じて

波動の地下逸散を考慮する手法(2E入射)による地震応答解析を実施した。それらの解析結果に基づいて、位相差入力による均質整形地盤の基本的な応答特性、不整形地盤の地震応答に与える入力地震動の位相差の影響について考察した。

2. 解析手法および解析条件

図-1に入力地震動の位相差を考慮した解析手法の概念図を示す。2E入射による位相差入力では、解析モデル下端の各節点にダンパーを取り付け、ダンパーの下端を上昇波の2倍の振幅をもつ地震動で、伝播方向に時間ずれを生じさせて入力する。これに対してE+F入射の場合は、解析モデル下端の各節点を直接強制的に加振する。

図-2に各地盤モデルの地盤条件を示す。いずれの地盤モデルにおいても、端部境界がモデル中央部の地震応答に影響を及ぼさないように、十分に広い解析領域を設け、なおかつ水平ローラーの境界条件を設定した。

均質整形地盤では、位相差入力による基本的な応答特性を把握することを目的とし、2E入射およびE+F入射に

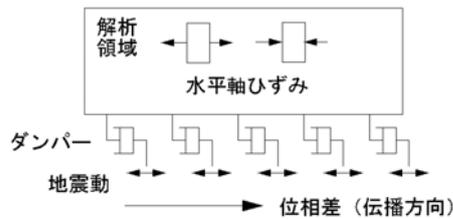


図-1 2E入射による解析手法の概念図

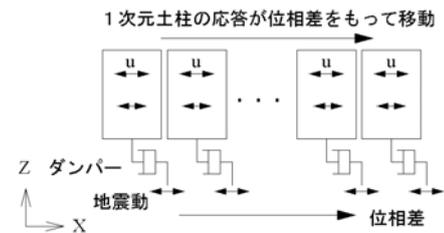


図-3 土柱列による地盤応答評価の概念図

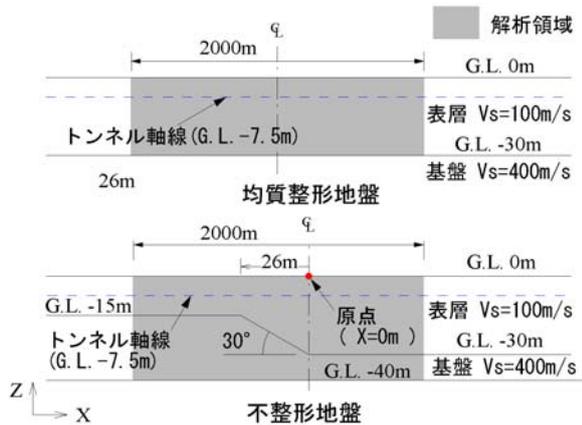


図-2 検討に用いた地盤モデルと地盤条件

において、それぞれ位相伝播速度として500m/sと1000m/sの検討ケースを設定した。不整形地盤では、位相差入力に傾斜した基盤付近の地震応答に与える影響を把握することを目的とし、均質整形地盤と同様の入射方法および伝播速度を設定した。なお、不整形地盤では、位相差の伝播方向に関しても、解析モデルの左側から右側に伝播する場合とその逆方向に伝播する場合の2種類とした。

検討に用いる入力地震動は、均質整形地盤の表層地盤、不整形地盤の表層厚さの厚い方の地盤の1次固有振動数(0.83Hz)を中心振動数としてもつRicker波(最大加速度100Gal, 最大変位7.3cm)を用いた。なお、今回の検討では、入力地震動の位相差による基本的な応答特性を把握することが目的であるため、均質整形地盤および不整形地盤とも弾性線形解析とした。また加振方法は、トンネル軸方向である面内加振とした。

各検討ケースにおいては、位相差入力による2次元地盤の地震応答への影響を把握するために、まず、2次元地盤が単純な1次元土柱の連りからの仮定から推定できるかどうかについて分析する。ここで、図-3に示すように地盤が各々独立な1次元土柱の連り=「土柱列」とであると仮定してみる。この場合、1次元土柱の解析結果より、水平応答変位を $u(z, t)$ (z :深さ, t :時間)とすると、変位の2次元的な分布は $u(z, t - x/c)$ (c :位相伝播速度)と表され、特定時刻、特定深さにおける地盤変位の水平方向の分布は、1次元土柱のその深さにおける変位時刻歴波形の時間軸をずらした波形となる。ま

た、地中構造物の縦断方向の耐震検討で重要となる地盤の軸ひずみは、 $-v(z, t)/c$ (v :応答速度)となる。

3. 解析結果

(1) 均質整形地盤

各検討ケースにおいて、解析領域の中央部(中心線から±60m範囲)の地表面における水平および鉛直方向の加速度応答波形を図-4、図-5に示す。また、それぞれの入射方法による1次元土柱モデルの地表面での加速度応答波形を図-6に示す。

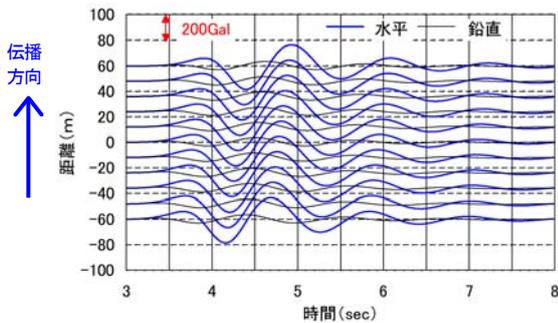
2E入射の場合、両ケースとも地表面の各節点での応答波形は、1次元土柱モデルの応答波形を基本とし、位相伝播速度と節点間距離で決まる位相遅れ($\Delta x/c$)によって、伝播方向にずれるような分布となっている。E+F入射の場合、解析領域の下端から波動が逸散しないため、2E入射に比べて振幅が大きく、後半まで自由振動の挙動が残る応答波形となっている。2E入射の場合と同様で、地表面の各節点による応答振幅の変化はなく、1次元土柱モデルの応答波形が伝播方向にずれるような分布傾向となっている。なお、いずれの入射方法においても、特に位相伝播速度500m/sのケースで、鉛直方向の応答加速度が大きくなる傾向が見られた。これは位相伝播速度が小さくなることで波長が短くなり、水平方向の地盤同士の間隔による2次元的な地震時挙動の影響が発生したためと考えられる。

次に、トンネル軸線の想定深さにおいて、位相差入力によって発生するトンネル軸方向の最大軸ひずみと「土柱列」による推定値との比較結果を図-7に示す。位相差入力の解析結果は、E+F入射の位相伝播速度500m/sの場合で、推定値に比べて若干小さな値となっているものの、いずれの検討ケースとも概ね推定値と一致している。

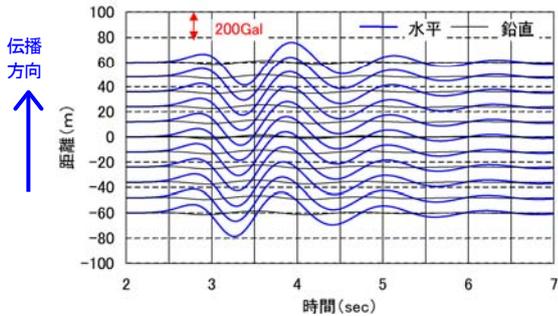
これらの検討結果より、位相差入力による均質整形地盤の地震応答は、1次元土柱の地震応答を用いて、その応答特性を概ね説明できることが明らかになった。

(2) 不整形地盤

今回のような傾斜した基盤を有する不整形地盤では、

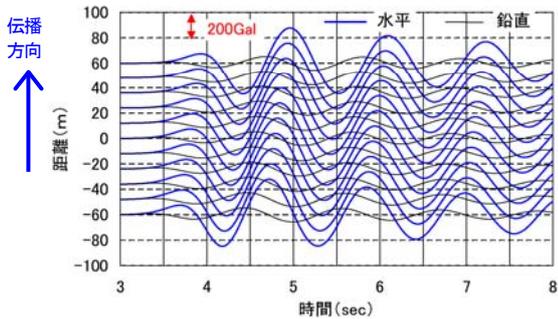


(a) 位相伝播速度 500m/s

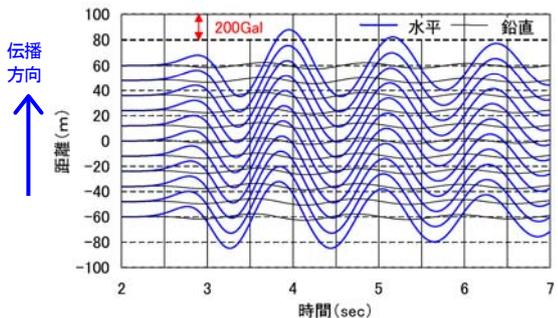


(b) 位相伝播速度 1000m/s

図-4 地表面の加速度応答波形 (2E入射)



(a) 位相伝播速度 500m/s



(b) 位相伝播速度 1000m/s

図-5 地表面の加速度応答波形 (E+F入射)

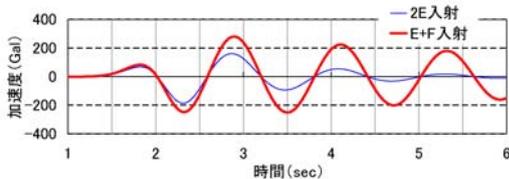


図-6 地表面の加速度応答波形 (1次元土柱)

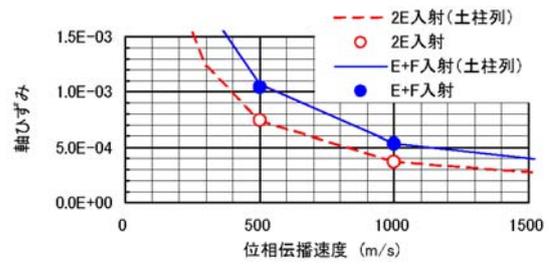


図-7 最大軸ひずみの比較結果 (均質成形地盤)

面内波動の一樣入力に対して、基盤傾斜部の近傍地盤において鉛直方向加速度やトンネル軸方向の軸ひずみが励起されることが明らかになっている³⁾。

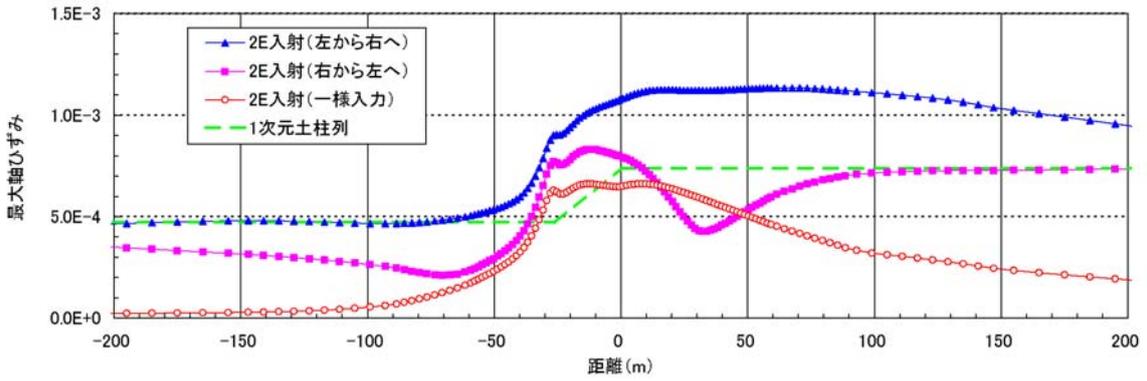
まず、各検討ケースにおいて、トンネル軸線の想定深さに発生する軸ひずみに着目する。解析モデルの中央領域での最大軸ひずみの水平方向分布を図-8に示す。ここで横軸は、解析モデル中央からの水平方向距離である。これらの解析結果より、以下のことが明らかになった。

a) 2E入射の場合

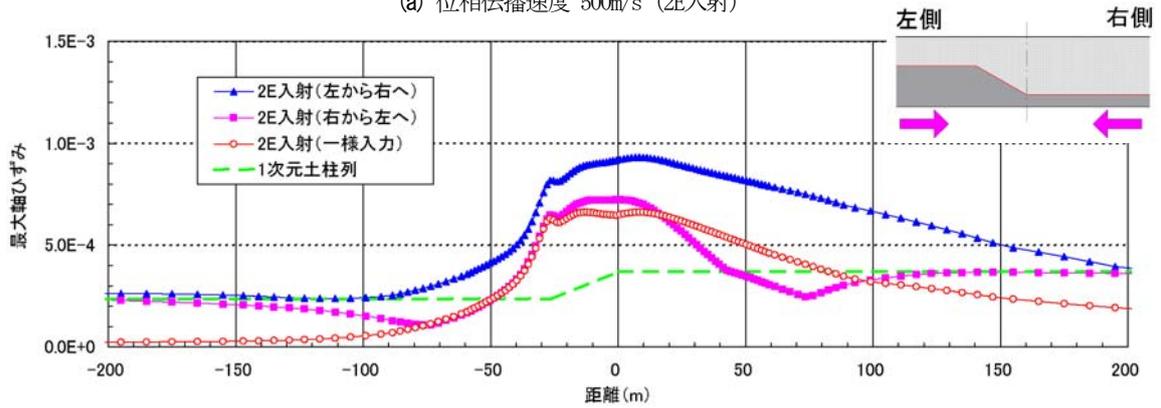
- ・位相差の無い一樣入力においても、基盤傾斜部 (-26m ~ 0m) で大きな軸ひずみが発生し、その値がモデル両側の均質整形部にかけて徐々に減少する分布形状となっている。
- ・伝播速度500m/sで解析モデルの左から右 (表層厚が増加する方向) に入力のケースでは、モデル左側の均質整形部において、土柱列から推定される軸ひずみと一致している。この軸ひずみは、基盤傾斜部に近付くにつれて増加し、基盤傾斜部付近で最大値となり、基盤傾斜部から離れるにつれて、徐々に右側の均質整形部の推定値に漸近するような分布形状となっている。
- ・伝播速度500m/sで右から左 (表層厚が減少する方向) に入力のケースでは、左から右に入力した場合と同様で、解析モデル右側の均質整形部では、均質地盤の土柱列から推定される軸ひずみと一致している。この軸ひずみは、基盤傾斜部に近付くにつれて傾斜部の影響により、局所的に値が減少する地点もあるが、傾斜部付近で値が急増している。また、傾斜部から離れるにつれて、徐々に左側の均質地盤部の土柱列の推定値に漸近する分布となっている。
- ・伝播速度1000m/sの場合は、伝播速度500m/sの場合とほぼ同じ傾向となっているが、基盤傾斜部の軸ひずみの増加量が小さく、基盤傾斜部の影響範囲も狭くなっている。

b) E+F入射の場合

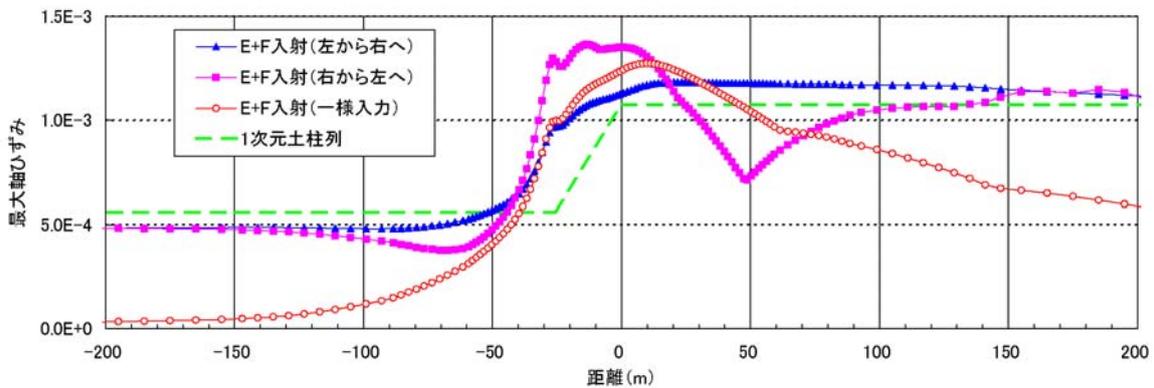
- ・位相差の無い一樣入力の場合、基盤傾斜部で生じる軸ひずみは、2E入射の約2倍程度となっており、基盤傾斜部から200m離れた均質整形部まで、その影響が広範囲に及んでいる。



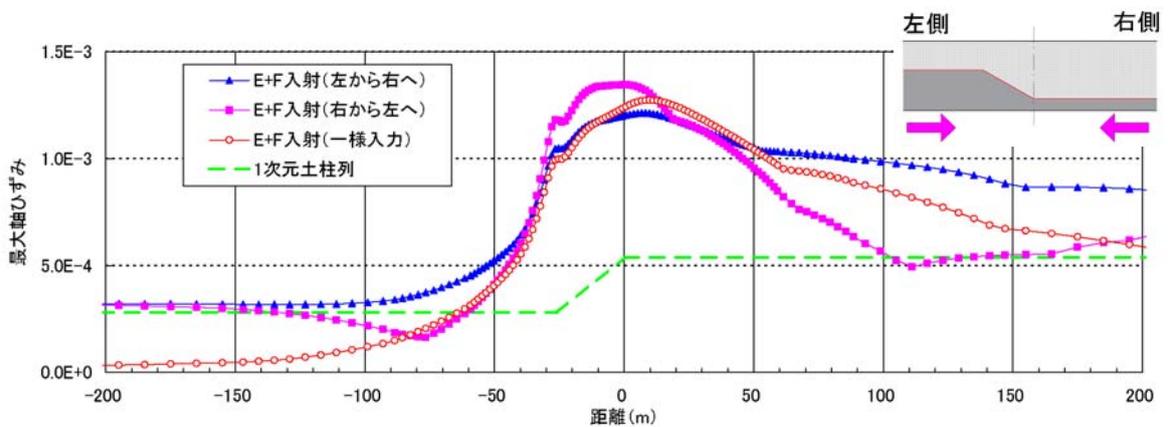
(a) 位相伝播速度 500m/s (2E入射)



(b) 位相伝播速度 1000m/s (2E入射)

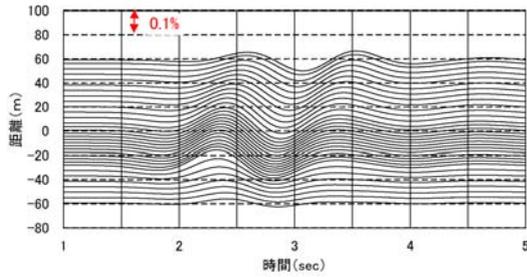


(c) 位相伝播速度 500m/s (E+F入射)

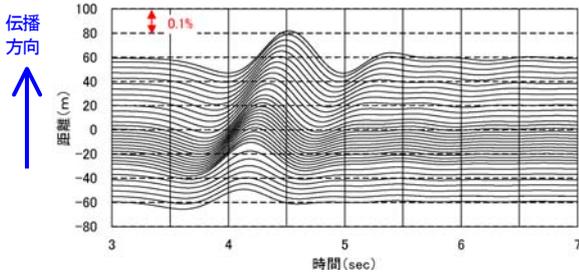


(d) 位相伝播速度 1000m/s (E+F入射)

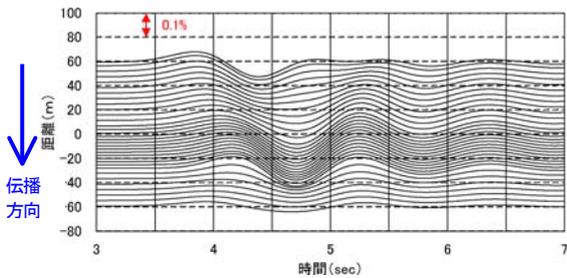
図-8 最大軸ひずみの水平方向分布 (不整形地盤)



(a) 一様入力 (位相差なし)

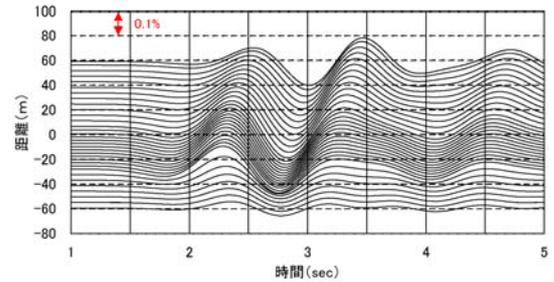


(b) 位相伝播速度500m/s (領域の左から右に伝播)

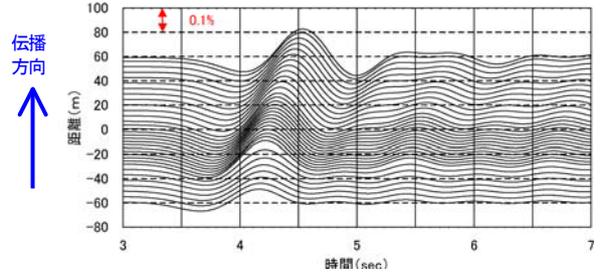


(c) 位相伝播速度500m/s (領域の右から左に伝播)

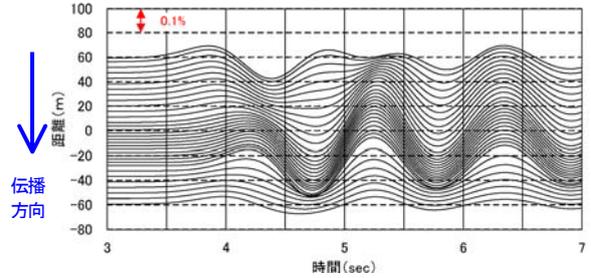
図-9 トンネル軸線での軸ひずみ応答波形 (2E入射)



(a) 一様入力 (位相差なし)



(b) 位相伝播速度500m/s (領域の左から右に伝播)



(c) 位相伝播速度500m/s (領域の右から左に伝播)

図-10 トンネル軸線での軸ひずみ応答波形 (E+F入射)

- ・伝播速度500m/sで左から右に入力のケースでは、2E入射の場合と同様で、解析モデル右側の均質整形部の軸ひずみは、土柱列から推定される軸ひずみとほぼ一致している。基盤傾斜部では、軸ひずみが増加する傾向となっているが、2E入射の場合とは異なり、一様入力の最大値を上回ることなく、除々に右側の均質整形部の土柱列による推定値に漸近する分布となっている。
- ・伝播速度500m/sで右から左に入力のケースでは、2E入射の場合と同様で、解析モデル右側の均質整形部では、土柱列から推定される均質整形部の軸ひずみと一致している。基盤傾斜部付近の分布は、2E入射の場合と同様で、基盤傾斜部で急増し、傾斜部から離れるにつれて、除々に左側の均質整形部の土柱列の推定値に漸近する傾向となっている。なお、軸ひずみの最大値は、表層厚が薄くなる傾斜部端部 (X=-26m付近) で、一様入力の最大値よりも若干大きくなっている。
- ・伝播速度1000m/sの場合は、伝播速度500m/sの場合に比べて、位相差に伴う基盤傾斜部での軸ひずみの変化が小さく、ほぼ一様入力の結果と同じ応答結果となっている。

ここで、位相差入力による基盤傾斜部付近の地震応答をさらに詳細に分析するために、位相伝播速度500m/sを代表ケースとして、基盤傾斜部を含む中心から±60mの範囲で、トンネル軸線の軸ひずみの時刻歴応答波形を図-9、図-10に示す。

a) 2E入射の場合の応答波形

- ・位相差の無い一様入力の場合でも、基盤傾斜部の影響により傾斜部付近で発生した軸ひずみは、両側の均質整形部に向けて、除々に振幅を減少させ、なおかつ位相の時間遅れを伴いながら伝播するような傾向となっている。
- ・左から右に位相差入力した場合、左側の均質整形部において位相差入力によって生じる軸ひずみに、基盤傾斜の影響で生じる軸ひずみが加わり、基盤傾斜部から右側の均質整形部に伝播するような傾向となっている。このような応答特性により、傾斜部より少し離れた右側の均質整形部で最大軸ひずみが発生している。
- ・右から左に位相差入力した場合、応答波形の前半 (約3.5秒～約4.5秒) では、右側の均質整形部において位相差入力によって生じる軸ひずみに、傾斜基盤の影響

で生じる応答が加わり伝播するような傾向となっている。このような応答特性により基盤傾斜部の端部（ $X=26\text{m}$ 付近）で、最大軸ひずみが発生している。なお、基盤傾斜部から右側の均質整形部（概ね $X=20\text{m}\sim 60\text{m}$ ）では、その地点での入力波による応答と基盤傾斜部からの伝播による応答とが干渉する影響で、応答波形の後半（約4.5秒以降）で応答振幅が小さくなっている。

b) E-F入射の場合の応答波形

- ・ 一様入力の場合、剛基盤の影響で2E入射に比べて全般的に応答振幅が大きくなっているが、基盤傾斜部から両側の均質地盤部に伝播するような軸ひずみ波形の基本的な特徴は、2E入射の場合とほぼ同じである。
- ・ 左から右に位相差入力した場合についても、2E入射の場合とほぼ同じような応答特性となっている。
- ・ 右から左に位相差入力した場合、剛基盤の影響により全体的に応答振幅が大きくなり、自由振動のような応答波形となるが、基本的な応答特性は2E入射の場合と同じである。

以上のように、不整形地盤モデルの位相差入力による地震応答は、基盤傾斜部から離れた両側の均質整形部では土柱列の仮定で評価することができる。しかし、基盤傾斜部の地震応答は、位相差入力に伴って不整形地盤の地震応答がさらに複雑になり、土柱列の仮定では十分に説明できない。

4. まとめ

本研究では、入力地震動の位相差が線状地中構造物の

周辺地盤の地震応答に与える影響の基本特性を把握するためにFEM解析による検討を行った。今回は、地盤条件や入力地震動等、限られた検討ケースであったが、次の項目が明らかになった。

(1)位相差入力による均質地盤の地震応答は、いずれの入射方法および位相伝播速度においても、1次元土柱の地震応答によって概ね評価することができる。

(2)不整形地盤モデルでは、いずれの検討ケースにおいても、解析モデル両側の均質整形地盤の応答は概ね土柱列の仮定で評価できるが、複雑な基盤傾斜部の応答は土柱列の仮定では、十分に説明できない。

不整形地盤の地震応答は、地層構成や入力地震動の特性によって異なる。今後は、種々の検討条件による比較解析を行い、線状地中構造物の周辺地盤の地震応答に与える位相差の影響をより詳細に検討する予定である。

参考文献

- 1) (財)沿岸開発技術研究センター：沈埋トンネル技術マニュアル（改訂版），2002.8.
- 2) 竹内幹雄，高橋 忠，元山 宏，渡辺啓行：地盤剛性急変部の線状地中構造物の地震時応力評価法，土木学会論文集，No.422/I-14，pp.323-332，1990.
- 3) 神山 眞，佐藤 勉，鈴木猛康：不整形地盤の地震応答における短周期表面波の工学的重要性に関する研究，土木学会論文集，No.682/I-56，pp.225-243，2001.7.
- 4) 渡辺和明，志波由紀夫，坂下克之：入力地震動の位相差を考慮した線状地中構造物の縦断方向の耐震計算法に関する研究，第12回日本地震工学シンポジウム，2006.

(2007.06.29 受付)

A STUDY ON INFLUENCES FOR SEISMIC RESPONSE IN SURROUNDING GROUND OF UNDERGROUND PIPE-LIKE STRUCTURE

Kazuaki WATANABE, Yukio SHIBA and Katsuyuki SAKASHITA

The input earthquake motions are different from place to place on the bedrock of long length structures. Seismic responses of underground pipe-like structures are influenced by this kind of spantial variations of the input earthquake motion.

In this paper, authors discussed about influences of the input earthquake motion with phase difference for seismic responses in surrounding ground of underground pipe-like structure. Seismic response analyses were carried out for homogeneous regular ground model and irregular ground model. From these analytical results, it could conclude as follows: 1) In case of homogeneous regular ground model, the seismic responses can be almost estimated by 1-Dimensional seismic response analysis. 2) In case of irregular ground model, seismic responses of inclined bedrock were more complicated by the input earthquake motion with phase difference. These responses were not estimated by 1-Dimensional seismic response analysis.