

(19) 表面波を考慮した入力地震動の評価手法について

佐藤工業(株)○中村 晋、末富岩雄

1. はじめに 表面波は実体波に比べて周期が長く、水平方向に伝播するという特徴があり、固有周期が数秒以上の大型構造物や軸方向に長い構造物への入力地震動として重要であると考えられている。工藤¹⁾は、地震動の特性に表面波の影響を考慮した場合、大型構造物への入力地震動に用いられている現在の設計用スペクトルは必ずしも安全側にならないことを指摘している。また、沈埋トンネルの様な軸方向に長い構造物の地震観測に基づき、その軸方向の地震時挙動は地震動に含まれる表面波成分に支配されているとの指摘も行われている²⁾。

表面波を設計に取り入れるためには、その性質を適切に予測することが必要となる。ところが、地中線状構造物に関する現行の耐震設計指針³⁾は、設計を行う際に用いる入力地震動の性質として表面波の様に水平方向に伝播する地震動を考慮しているが、その地盤変位は実体波(鉛直下方より上方に伝播)に対する地盤変位として算出しており、表面波が正しく考慮されているとはいえない。

本報では、軸方向に長い地中構造物を対象とし、表面波を考慮した設計用入力地震動の評価手法を示す。設計に用いる入力地震動の算出手法は断層震源モデルなどを用いた確定論的手法と地震危険度解析手法などを用いた確率論的手法の二つに大別されるが、ここでは設計に用いる最大地震動やスペクトル特性の算出手法として良く用いられている後者の手法を用いる。次に、得られた入力地震動を用いて構造物の断面力を算出し、現行の耐震設計指針により得られる断面力と比較する。

2. 表面波を考慮した設計用入力地震動の評価手法 現行の耐震設計指針で用いられている耐震計算法である応答変位法により、表面波に対する軸方向に長い構造物の応答を評価出来ることが、最近の地震観測に基づいた研究⁴⁾により指摘されている。このことより、表面波に対する設計用入力地震動は、現行の耐震設計指針と同様に求めることが可能であると考えられる。

地中の線状構造物の現行耐震設計指針では、次式に示す様な地盤変位と地震動の水平方向の波長をパラメータとする正弦波を設計用入力地震動として用いている。

$$U(X) = U_0 \sin\left(\frac{2\pi X}{L_s}\right) \quad (1)$$

ここで、 $U(X)$ は構造物軸方向(X 地点)における入力変位、 U_0 は最大地盤変位、 L_s は波長を表す。

表面波に対する設計用入力地震動は、式(1)における最大地盤変位および波長を表面波について求めればよいことが分かる。表面波を考慮した地中の線状構造物の設計用入力地震動の算出手法をフローチャートで図-1に示し、その概要を以下に示す。

まず、検討地点における地盤構造より、地震基盤(せん断波速度3000m/s程度)の設定を行う。

次に、基盤上の堆積層における最小せん断波速度を有する層と基盤層の波動インピーダンス比(α)および検討地点周辺の基盤傾斜角(θ)より、表面波に対する検討が必要か否かの検討を行う。この判定を行う理由は、次の二つである。

①波動インピーダンス比が大きい場合また基盤傾斜角が大きい場合、基盤に入力した地震動に対する基盤上の堆積層の応答は、表面波より全反射波が支配的となる⁵⁾。

②基盤傾斜角が大きくなる場合、基盤上の堆積層の応答は従来の設計で用いられているS波重複反射理論により得られる応答より小さくなる⁵⁾。

表面波の地盤変位は、著者らが提案している表面波スペクトルの地震危険度⁶⁾と表面波に関する速度応答スペクトルの積分値と最大変位の関係を組合わせた地震危険度として算出する。表面波スペクトルの地震危険度は、渡辺⁷⁾が提案している地震活動度の評価手法と著者らが提案している表面波スペクトルの距離減衰

式⁵⁾を組合わせた手法⁶⁾を用いて算出する。表面波の最大変位 D_{max} は、小林、翠川が提案している地震動の速度応答スペクトル積分値と最大地震動の関係を求める手法⁸⁾と同様に次式に示す地震観測記録に含まれる表面波成分の速度応答スペクトル $SVs(t, h)$ の積分値と最大変位の関係に、先に得られた表面波スペクトルの地震危険度を代入することにより求める。

$$D_{max} = \delta \int_{t1}^{t2} SVs(t, h) dt \quad (2)$$

ここで、 $t1, t2$ は、観測された地震記録より分離した表面波地震動の速度応答スペクトルの積分区間を現す周期、 δ はその積分値と表面波の最大変位の関係を表す。

最後に、表面波に対する波長は検討位置における地盤構造より基本モードに関する表面波の位相速度を算出し、Airy相を与える周期とその周期における位相速度の積により求める。

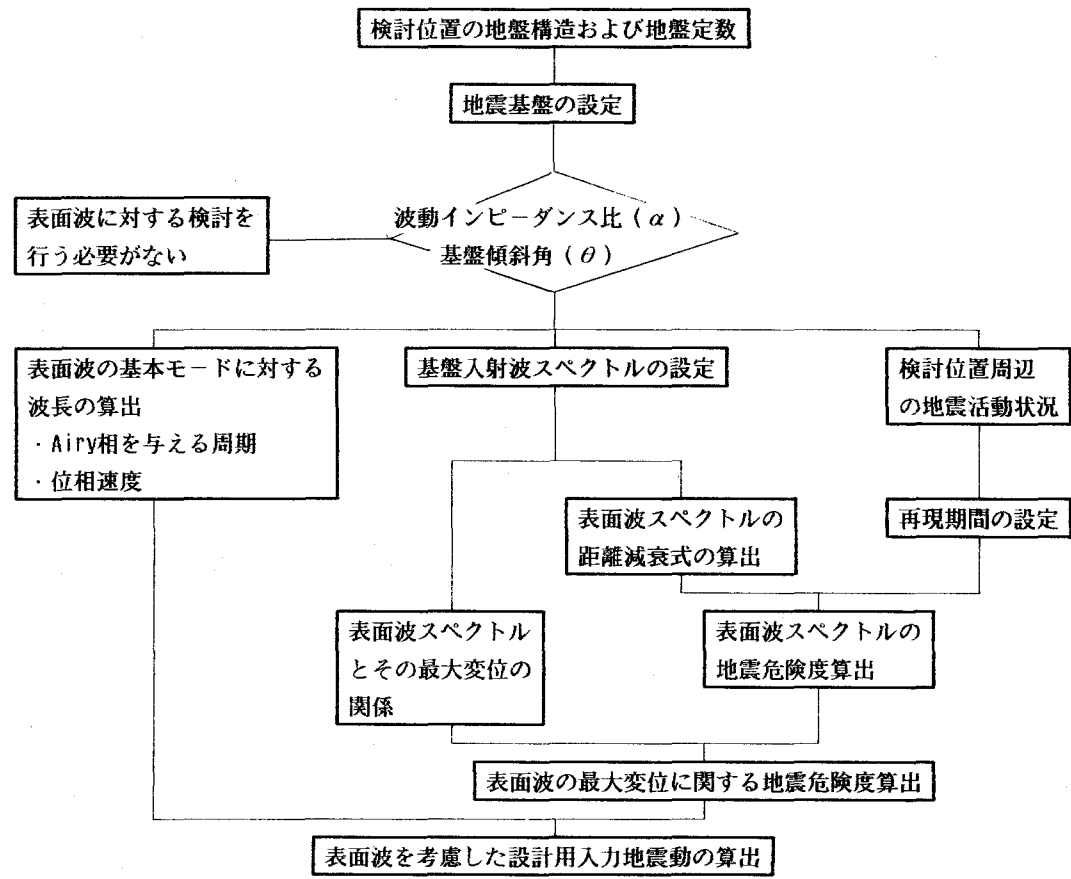
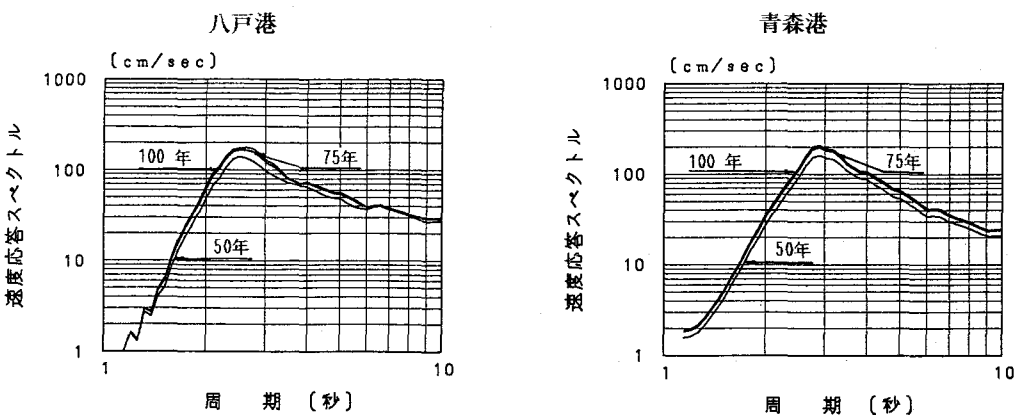


図-1 表面波を考慮した設計用入力地震動の算出フロー

3. 適用事例 この手法を著者らが提案している表面波スペクトルの距離減衰特性について検討を行った八戸港と青森港の2地点に適用した。その際、基盤入射波スペクトルは神山が提案している距離減衰式、Love波の周波数応答関数は表面波スペクトルの適用性について検討を行う際に算出した値を用いた。また、地震活動度の算出に用いた歴史地震データは宇佐美のデータ⁹⁾のうち、1885年以降のデータを用い、地震危険度は50年、75年、100年の再現期間について算出した。

まず、表面波スペクトル地震危険度の期待値を図-2に示す。ピークを与える周期は、両地点における

Airy相を与える周期（八戸港；2.5 秒、青森港；2.8 秒）と一致し、スペクトルの最大値は100 ～200cm/s となっている。ここで、再現期間にかかわらずスペクトル値が同程度の値となっているのは、地震活動度の評価手法を行う際、再現期間にかかわらず1968年十勝沖地震のような大規模地震の発生を考慮していること、歴史地震データとしての用いた期間が短いことなどに起因している。

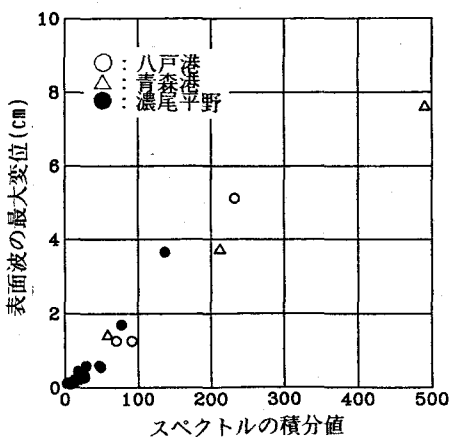


図－2 表面波スペクトルの期待値

表面波の最大変位の地震危険度を求めるために必要な式(3) 中の各パラメーターのうち、 t_1 は1秒、 t_2 は9秒、 δ は0.02とした。これは、図－3に示す様に土山らが濃尾平野で観測された地震記録より求めた表面波の最大変位と表面波スペクトルの積分値の関係¹⁰⁾ と八戸港と青森港で観測された地震記録より分離した表面波に関する両者の関係より求めた。

これらより算出した両地点における入力地震動として表面波の最大変位の地震危険度および波長を表－1に示す。表には、現行の軸方向に長い構造物の設計指針³⁾により算出した設計用地盤変位および波長、さらに地震記録より分離した表面波の最大変位も合わせて示す。表面波の最大変位は再現期間にかかわらず設計値の1.7～2.6倍程度大きな値となっているが、同程度のオーダーとなっている。さらに、地震記録より分離した表面波の最大値も、震央距離が長い(200km 以遠)宮城県沖地震、日本海中部地震(八戸港)を除き、本手法により得られる表面波の最大変位と同程度のオーダーとなっている。しかし、本手法により得られる波長は、設計値の1.6倍とかなり大きな値となっている。これは、両手法で地盤の固有周期を算出する際の地震基盤のせん断波速度つまり深度が異なっていることに起因している。

最後に、本手法で得られる入力地震動(表－1)より求めた構造物の断面力と現行の設計指針により得られる断面力を比較する。断面力は軸力を対象とし、現行の設計指針で示された手法により算出した。両手法により得られる軸力の比較を式(3)で得られる軸力比にて行い、表－2に示す。



図－3 表面波の最大変位とスペクトルの積分値
(文献10の図－9に加筆)

表-1 本手法と設計値の比較

	本手法				設計値		分離した表面波の最大変位(cm)		
	最大変位の地震危険度(cm)			波長 (m)	地盤変位 (cm)	波長 (m)	十勝沖 地震	宮城県沖 地震	日本海中部 地震
	50年	75年	100年						
八戸港	7.9	9.0	9.4	3075	3.7	190	5.1	1.3	1.3
青森港	8.2	9.7	10.2	3900	4.4	250	7.6	1.4	3.8

$$\text{軸力比} = \frac{L_s U_s \text{ (本手法)}}{L_s U_D \text{ (設計値)}} \quad (3) \quad \begin{array}{l} \text{ここで、} L_s、L_D \text{ は本手法による波長と設計指針による} \\ \text{波長、} U_s、U_D \text{ は本手法により表面波の最大変位と設計} \\ \text{値を表す。} \end{array}$$

本手法により得られる軸力は、再現期間、対象位置にかかわらず現行の設計指針により得られる値より小さい。つまり、現行の設計指針では、表面波の様に水平方向に伝播する地震動を入力地震動としているにもかかわらず、表面波を考慮した場合に比べて、かなり大きな断面力を与えることが分かる。両者の差異は、主として波長の差異に起因している。

表-2 設計値との断面力の比較

	再現期間に応じた軸力比		
	50年	75年	100年
八戸港	0.13	0.15	0.16
青森港	0.12	0.14	0.15

4. あとがき 本報では、軸方向に長い地中構造物を対象とし、表面波を考慮した設計用入力地震動の評価手法を示した。さらに、その手法により得られた入力地震動を用いて構造物の断面力を算出し、現行の耐震設計指針により得られる断面力との比較を行った。その結果、本手法により得られる表面波の最大変位に関する地震危険度は現行の設計指針により得られる入力変位や強震記録より分離した表面波の最大変位の数倍程度の値となるが、同程度のオーダーとなっていることが分った。さらに、本手法により得られる波長が設計指針より得られる波長の差異十倍以上となることに起因し、現行の設計指針は再現期間や対象位置にかかわらず表面波を考慮した本手法に比べて、かなりおおきな断面力を与えることが分った。しかし、強震時における構造物の挙動が表面波の基本モードに支配されるか否かなどの幾つかの問題点は、今後の検討課題とした。

参考文献 1)工藤一嘉、長周期構造物への地震入力に関連した表面波の評価、第5回日本地震工学シンポジウム、pp.273~279、2)例えば石田修 et al、表面波による沈埋トンネルの挙動、第18回地震工学研究発表会梗概集、pp.205~208、1985、3)例えば日本道路協会；共同溝設計指針、1986、4)Ieda R., et al、Effect of Earthquake Motion on the Dynamic Behavior of Underground Transmission Line, Proc. of 3rd International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineerings, pp.295~309、1987、5)中村晋、末富岩雄、吉田望、傾斜基盤の存在により生じるLove波スペクトル特性の予測に関する考察、土木学会論文集、No.404、I-11、pp.415~424、1989、6)中村晋、末富岩雄、吉田望、表面波スペクトルの地震危険度算出手法について、土木学会第44回年次学術講演会講演概要集、1989、10(投稿中)、7)渡辺啓行、塩見哲、沢田義博、川田治央、変電設備対策の研究ー変電設備耐震設計用地震動ー、電力中央研究所・技術研究所報告、No.380060、1981、8)小林啓美、翠川三郎、震源域周辺での地震基盤からの入射波の強さについて、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.553~554、1978、9)宇佐美龍夫、資料日本地震被害総覧、東京大学出版会、1981、10)土山茂希、早川誠、中村晋、末富岩雄、濃尾平野で観測された表面波地震動の特性およびその予測に関する検討、第24回土質工学研究発表会、pp.873~876、1989、6