

常時微動による地盤・構造物の評価法

上半 文昭(鉄道力学研究部 構造力学 主任研究員)

常時微動とは

高感度の地震計を用いて観測すると、地震時でなくても地面は常に小さく揺れていることがわかります(図1)。この揺れは「常時微動」と呼ばれ、工場や交通機関などの人間活動および波浪や風などの自然現象によって引き起こされています(図2)。常時微動は、その存在が知られるようになった19世紀末頃には地震観測時のノイズに過ぎませんでした。後の研究で、その特徴を知ってうまく活用すれば地盤や構造物の振動特性を知るための有効なサインとして利用できることがわかりました。常時微動は微動計を設置するだけでいつでも手軽に測定できるので、地盤や構造物の検査の省力化に貢献するものと期待されています。

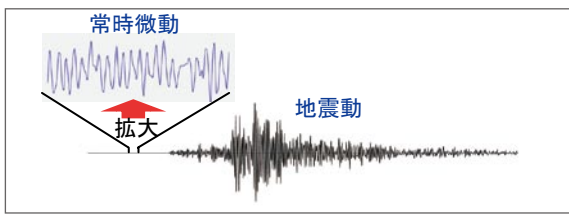


図1 地震動と常時微動

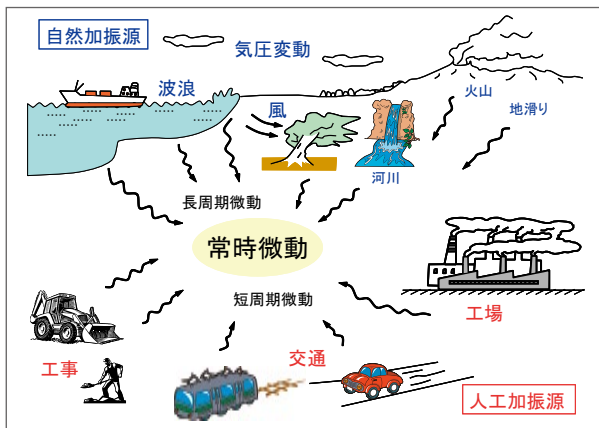


図2 常時微動の発生源

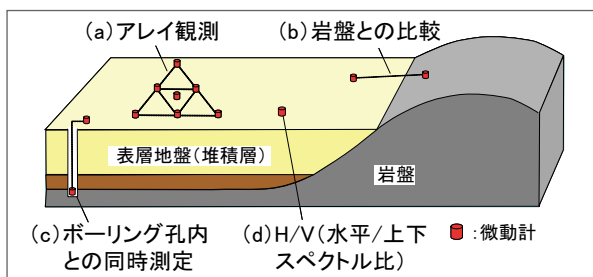


図3 観測手法と微動計の設置方法

常時微動による地盤の評価

常時微動の揺れの様子は場所によって異なります。簡単に説明すると、硬く締まった地盤では振幅が小さく周期が短く、柔らかい軟弱地盤では振幅が大きく周期が長くなります。この場所毎の常時微動の揺れの違いは地盤の地震時応答と密接な関係があります。20世紀前半には国内の研究者によって、常時微動の卓越周期から観測地点直下の地盤の固有振動周期を推定でき、地震時に特にその周期の地震波が卓越することなどが明らかにされました。

20世紀半ばから、常時微動による地盤調査手法は二つの流れで発展しました。一つは、微動計をアレイ状(図3(a))に配置して多点における観測記録の時間差から地表面を様々な方向に伝播する常時微動の周期毎の伝播速度を求め、その結果を逆解析することによって地盤の層構造を求める手法です。この手法は1950年代の「微動の時間的・空間的特性の研究」に端を発し、現在では地盤構造の概略推定手法として物理探査分野で実用段階にあります。

もう一つの手法は、1~2点での測定結果により観測地点直下の表層地盤の固有周期や地震動の増幅特性などの代表的特性を簡易に求める手法です。固い基盤層から入力された地震動は柔らかい表層地盤によって増幅されます。そのため地震時に揺れが大きく危険な場所を把握するためには表層地盤の調査が不可欠です。常時微動は地盤に孔をあけて実施するボーリング調査に代わる簡便な地盤特性の調査手段として期待されるようになり、1960年代に建築基準法に関わる地盤種別の分類にも活用されました。

2地点の観測記録の比較による評価

常時微動は不特定多数の発生源の影響を受けるため、観測した時間や季節によってその振幅などが変動します。例えば、人間活動を主な発生源とする周期の短い微動の振幅は日中に大きく夜間に小さくなる傾向があります。したがって1地点1回だけの常時微動の測定結果から地盤の揺れやすさを評価するのは危険です。

そこで、発生源の変動の影響を排除するために、2地点で測定した常時微動を比較して相対的な揺れやすさを評価する手法が検討されました。表層地盤による増幅の影響を受けない岩盤山地上の観測点と比較する手法(図3(b))、ボーリング孔を掘って地中の観測点と比較する手法

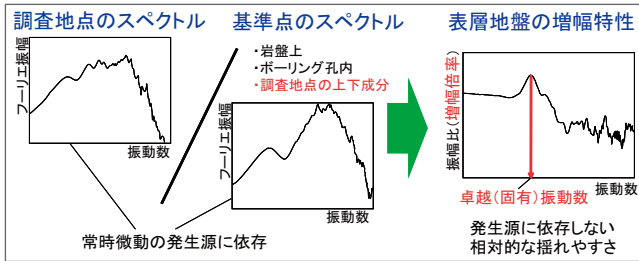


図4 スペクトル比による地盤増幅特性の推定

(図3(c))などが実用化され、調査地点とこれらの基準点で観測された常時微動のスペクトル(振動数毎の波の強さ)の比(図4)から発生源に依存することなく表層地盤の増幅特性を推定できるようになりました。

水平／上下スペクトル比の提案

1980年代に鉄道総研で常時微動を用いた表層地盤の評価に関わる画期的な手法が提案され、それ以降、鉄道分野における常時微動研究が盛んになりました。

その手法は「1地点で観測した常時微動の水平動のスペクトルを上下動のスペクトルで除したスペクトル比で、発生源の影響を受けない安定した地盤増幅特性を得ることができる。」というものです(図3(d))。たった1点の測定で地盤の増幅特性を推定可能であるとしたこの手法は、その手軽さから多くの研究者が測定・検証を実施し、次第にその有効性が経験的に裏付けられ、後に理論背景も整理されました。H/V、HVS、Nakamura's methodなどの呼び名で国内外に広まり、物理探査や防災の分野で常時微動が盛んに利用されるきっかけとなりました。

鉄道総研は同手法を活用して表層地盤の卓越振動数、地震動増幅倍率、層厚、S波速度の推定法、および地震時に変状しやすい地盤や盛土の判定法などを提案しました。

構造物の健全度評価への適用

鉄道では、構造物を重錘で打撃して得られた固有振動数などを用いて構造物の健全度を評価する「衝撃振動試験」が普及しています。構造物の固有振動数などを常時微動で推定することができれば、重錘打撃などの人為的な加振作業の手間を省くことができ検査作業を省力化できるものと期待できます。

様々な構造物の常時微動測定を実施したところ、ラーメン高架橋、橋桁、架線柱などの細身で揺れ方が明確な構造物では常時微動のスペクトルの卓越ピークから1次固有振動数を推定できること、基準点として周辺地盤上の常時微動を同時測定してスペクトル比を求めれば卓越ピークがよ



図5 鉄道総研が開発した測定システム例

り明瞭になり固有振動数の推定精度が向上することなどが確かめられました。これらの構造物については、固有振動数などの振動特性と健全性の関係を整理することによって常時微動による評価が可能になると考えます。

橋脚では衝撃振動試験と常時微動測定とで固有振動数の推定結果が一致しない場合があります。橋脚の固有振動の成分が橋桁や隣接橋脚の固有振動、表層地盤の常時微動の振動成分などに埋もれてしまうのです。このような場合には、複雑な観測記録から有効な振動成分を抽出する手法の検討が必要です。また、初期のデータを取得する際に衝撃振動試験と常時微動測定を同時に行って常時微動による検査が可能かどうかを判別するとともに、その判別データを蓄積して適用条件を明確にする努力が必要です。一方、最近の研究で、水位が高いときには橋脚の常時微動から固有振動数を特定しやすくなることが確認されており、河川増水時の運転規制の判断資料として期待されています。

測定システムの開発・普及

鉄道総研は測定装置の開発および現場への普及にも取り組んできました(図5)。1990年前後に開発した「PIC」は当時的な携帯型の常時微動計測システムでした。2004年に開発した衝撃振動試験装置「IMPACT III」も常時微動を測定可能で、センサの無線化によりケーブルの取り回しが不要になりました。2007年に開発した「Uドップラー」はレーザを照射することによって1~100m程度離れた構造物の常時微動を非接触で測定することができ、センサ設置のための高所等危険箇所での作業を軽減できます。

おわりに

常時微動は、地盤探査の分野では実用レベルで用いられるようになりましたが、構造物検査の分野ではまだ解決すべき課題が残されています。常時微動による検査技術の実用化と普及に向けて今後も検査・診断手法や測定システムの研究開発に取り組みます。