

第7回 衝撃振動試験による構造物の健全度評価

講師：西村 昭彦*1, 木村 礼夫*2

1. はじめに

わが国においては20世紀後半の高度成長期に膨大な数の社会基盤が整備されました。それらが21世紀に引き継がれ、安定成長期となった現在、それらの構造物の維持管理・延命技術が重要となってきています。適切な維持管理を実施するためには、構造物の健全度を把握することが必要不可欠です。

構造物の健全度を検査する方法は数多く提案され実施されてきました。しかし、構造物の健全度を容易に、精度良く測定する技術は少なく、とくに土中または河川中に設置されている基礎に対する非破壊検査については有効な方法がありませんでした。

ここでは洗掘等の変状や、地震後の安全性の確認などの実績を有する、固有振動数を指標とした非破壊検査である衝撃振動試験について、その原理や適用事例などについて紹介します。

2. 試験の特徴とその手法

2.1 衝撃振動試験とは

衝撃振動試験とは、構造物に対して人為的な打撃を加え、強制振動を起こし、得られた固有振動数を指標にその健全度を判定する検査方法です。したがって判断基準となる指

標は固有振動数 (Hz) という定量的な値になります。

固有振動数は構造物自体および構造物を支持する基礎の剛性と質量 (重量) により決定される値です。構造物に強制振動を加えると、構造物は固有振動数と同じ振動数で揺れる性質があります。また、固有振動数は構造物の剛性が高いと早く揺れ、逆に剛性が低いとゆっくり揺れます。図-1に衝撃振動試験の概念図を示します。

橋梁下部工のような構造物は、地震や洪水などの災害により躯体にクラック等の変状が発生したり、地盤が洗掘されたりすることにより剛性の低下を生じます。すなわち固有振動数の低下が生じることになります。したがってこの衝撃振動試験で得られた固有振動数と、既存のデータや標準値との比較、さらには測定結果をもとに行う固有値解析結果より構造物の健全度が判定できるわけです。

またこの検査方法は、構造物の剛性や重量の変化を捉える試験方法なので、RC構造はもとよりPC、鋼、SRC構造にも対応可能です。

2.2 固有振動数の測定方法

衝撃振動試験による測定方法は、基礎の健全度を判断する場合と、柱・梁など部材の健全度を判断する場合でその測定方法がやや異なります。ここでは基礎の健全度を調査する場合と、部材の健全度を調査する場合とに分けて説明します。

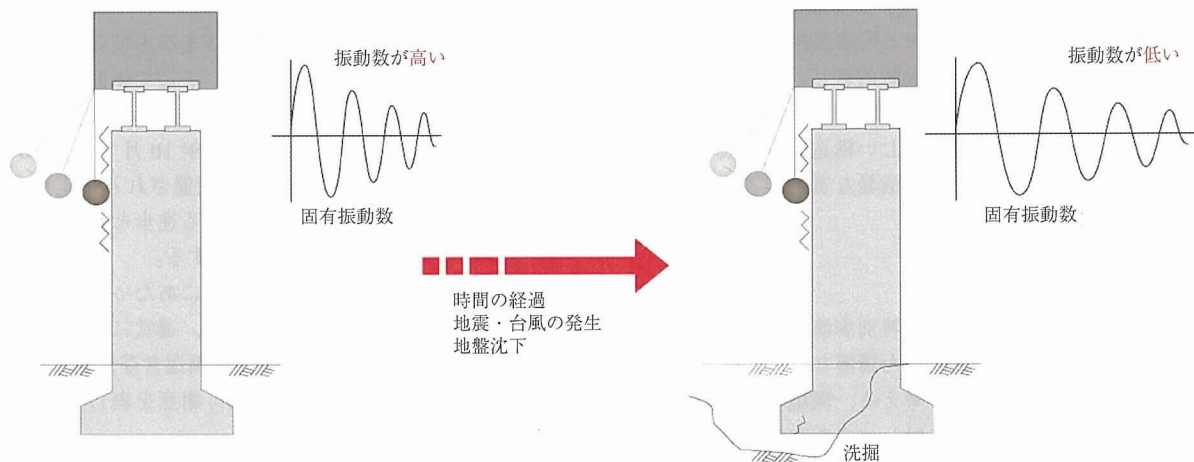


図-1 衝撃振動試験の概念図

*1 Akihiko NISHIMURA : (株) ジェイアール総研エンジニアリング

*2 Ayao KIMURA : (株) ジェイアール総研エンジニアリング

(1) 基礎の健全度を調査する場合

基礎の健全度を調査するためには、構造物全体を揺らして固有振動数を測定する必要があります。そのために任意の振動数で加振可能な起振機を橋脚天端に設置して強制振動試験を行うことも行われていましたが、時間と費用がかかり対象構造物の数を考えると実用的な方法とはいえません。そこで簡易な方法として衝撃振動試験を考案しました。基礎の健全度を調査する場合の構造物への打撃は、対象構造物の大きさにもよりますが、一般的に 30 ~ 50 kg 程度の重錘を用いています。一回の打撃では応答値が小さいので、打撃を複数回にわたって行い、波形を重ね合わせることでノイズを除去し、応答波形を明確にしています。一般には、同一試験で 5 回程度の打撃を行っています。

この試験は鉄道橋¹⁾²⁾を対象として開発されたもので、鉄道橋では列車が通過せずに静止する時間があるのに対して、交通量の多い道路橋では静止する時間がほとんどなく、しかも大型自動車による振動が打撃による振動を上回ってしまい、振動波形が精度よく計測できないという問題がありました。しかしながら波形の取り込み方法を改良した結果、数波の振動波形を重ね合わせることで交通振動等のノイズを除去できることが判明しました。これにより交通規制を行わずに橋梁下部工の固有振動数の測定を行うことが可能になりました。

波形を測定するセンサーは振動モードを求めるために、一般的には高さ方向で 3 点を設けています。振動モードとは打撃に対して、構造物各部位がどのような振幅で揺れているかということです。橋脚を例に説明すると、橋脚の下端を地盤ばねで拘束した片持ち梁にモデル化し、その上端に打撃を加えると、上端では大きく揺れて下端に向かい揺れの程度は小さくなります。この様子が振動モードになります。

図 - 2 に衝撃振動試験の概略図を、図 - 3, 4 に道路橋、ラーメン高架橋での試験状況を示します。

現地での作業は準備からあと片付けまで含めて、橋脚 1 基当たり約 2 時間程度の時間を必要としますが、10 回の打

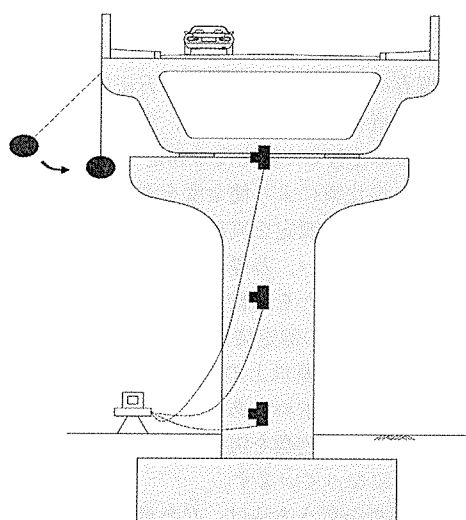


図 - 2 衝撃振動試験の概略図



図 - 3 試験状況 (道路橋)



図 - 4 試験状況 (ラーメン高架橋)

撃で計測時間は約 10 分程度です。

(2) 部材 (柱や桁等) の健全度を検査する場合

部材の健全度は主に柱部材、梁部材を対象としています。基本的な原理は基礎の健全度を調査する場合と同じですが、調査対象となる構造物が小さいため、打撃にはカケヤを使用します。図 - 5 にラーメン高架橋の柱部材の試験状況を示します。

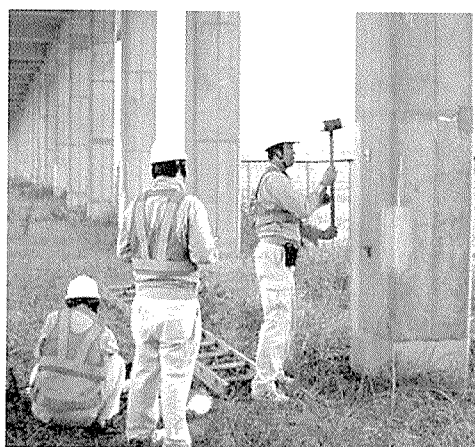


図 - 5 ラーメン高架橋の柱に対する試験状況



図 - 6 柱の交番載荷実験

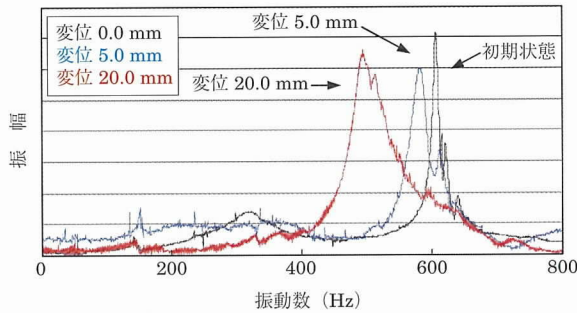


図 - 7 柱の損傷と固有振動数の低下

ラーメン高架橋のような構造物が地震により被害を受けた場合、損傷は基礎よりも柱部材に多く現れることに着目して考案された試験方法です。この判定基準は柱に水平載荷試験で損傷を与え、そのときの固有振動数の低下率から作成しました。図 - 6 に柱の水平交番載荷実験の様子を、図 - 7 にそれぞれの固有振動数の変化を示します。

柱の損傷が進むにつれ、柱の固有振動数も低下することがわかりいただけると思います（初期状態が黒、5.0 mm 変位時が青、20.0 mm 変位時が赤）。

各種の柱の試験を行うことにより、土木構造物のみならず、マンション等の建築構造物の柱に対しても、この検査方法を適用可能となりました。

また、この試験は桁にも適用しています。図 - 8 に桁の試験状況を示します。桁の測定は橋軸方向に3点程度の測点を設けて、カケヤを用いて打撃を加えます。

このように桁や柱のような部材単位の固有振動数を求める場合は、1次のみならず高次の複数のモードを測定の対象としています。これは固有振動数が、低次では境界条件



図 - 8 桁の試験状況

の影響を受けやすく、高次に行くにつれ部材そのものの変状に影響されるためです。

また、PC 桁のプレストレス力の低下についても、桁自体の固有振動数の変化として表されることが、載荷実験等で確認されています。

この試験は 10 m 程度の PC 模型桁を作成し、健全な時（作成時）とその PC ケーブルを切断した時の固有振動数の変化を確認したもので、高次の固有振動数を測定することによってその影響を把握できました。

(3) 固有振動数の決定

この試験で重要な過程は固有振動数を決定することです。それは次のように行います。

現地にて採集した応答波形をパソコンに取り込みます。そしてそのデータ処理および解析はパソコンを用いて行います。まず応答波形を読み取り、得られた応答波形をフーリエ解析によりフーリエスペクトルに変換します。フーリエスペクトルには振幅スペクトルと位相差スペクトルがありますが、前者の卓越振動数と後者の位相差から構造物の固有振動数を決定し、健全度の判定を行います。位相差スペクトルとは強制振動の時、起振力に対する構造物の応答の遅れを示したもので、速度波形を計測した場合、卓越振動数が固有振動数の場合この値が0度ないしは180度となります。図 - 9 に固有振動数の決定方法の一例を示します。

3. 健全度評価

健全度判定の方法としては①既存の測定結果と比較する、②標準値との比較を行う、③固有値解析を行うの三つが考えられます。

まず①の既存の測定結果と比較する方法は、あらかじめ測定してあった既存の固有振動数と、再度測定して得られた固有振動数とを比較して健全度を判定する方法です。

②の標準値との比較により健全度を評価する方法は、一定数の構造物に対して測定を実施した後に、その測定結果を用いて統計処理を行い、基礎形式、構造形式等ごとに得られた標準値と測定値とを比較する方法です。これを作成するには多くの構造物の測定結果が必要となります。

鉄道橋梁では1000基以上の橋梁の振動試験を実施し、固有振動数の標準値が求めてあります。³⁾したがって、構造物の健全度は固有振動数を実測すれば、簡単に健全度が判定できるようになっています。

③の固有値解析を行う方法は、対象構造物のしゅん工図面や設計計算書、付近の地盤柱状図などに基づき設計当初

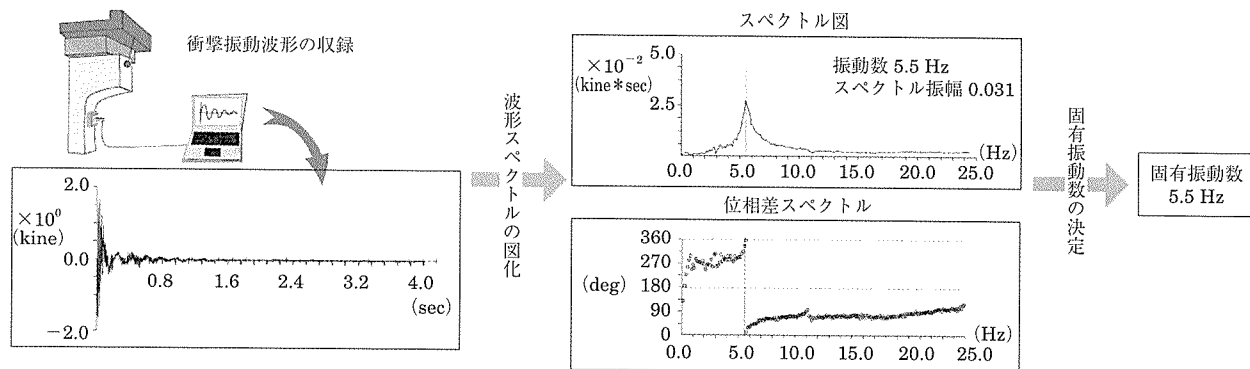


図 - 9 固有振動数の決定

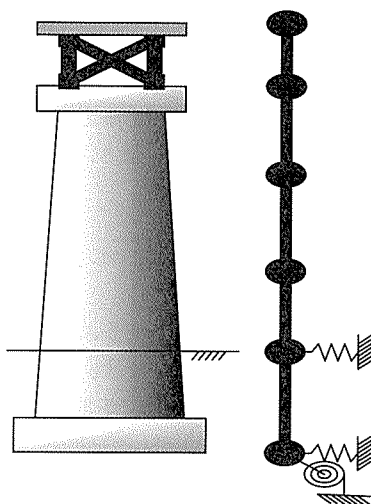


図 - 10 解析モデル

の諸元を反映した多自由度系振動モデルを作成します。

モデルの一例を図 - 10 に示します。このモデルの部材剛性と地盤ばね定数が健全度評価における初期値とします。次に、測定により求めた構造物の固有振動数と振動モードをこの振動モデルを使ってシミュレートすることにより現状の部材剛性と地盤ばね定数を逆解析します。この作業を固有振動数と振動モードの両方が同時に一致するまで繰り返し、これらが一致したときの倍率より健全度を判定する方法です。図 - 11 に固有値解析のフローを示します。

固有値解析を実施することで、躯体の剛性と地盤の剛性(ばね定数)のそれぞれの値が求められます。これを設計基準の値と比較することにより健全度を求めることができます。また、これにより構造物の剛性低下の原因が躯体に起因するか、基礎に起因するかを算定することが可能となり、適切な補強・補修の策定が行えます。

4. まとめ

非破壊検査の一つとして衝撃振動試験について説明しました。この試験は精度および再現性が高く、測定結果が測定者の主観に影響されない利点があります。本号では橋梁の下部工や高架橋の柱および橋桁を事例にあげて紹介しましたが、まだまだ多くの分野にも応用が可能と思われます。構造物の変状は洪水や地震、台風などの自然災害に起因するものだけでなく、経年劣化や近接施工による影響なども考えられます。いずれにせよ機能を損なうような変状は早期に発見し、適切に対処することは構造物の維持管理のうえで大変重要なことです。

この検査方法が構造物の維持管理をはじめ、災害時の応急危険度判定などの分野でより活用されることを期待して、まとめとします。

参考文献

- 1) 西村昭彦：衝撃振動試験による基礎構造物の健全度診断，第8回日本地震工学シンポジウム，pp.2163～2168，1990
- 2) 西村昭彦：ラーメン高架橋の健全度評価法の研究，鉄道総研報告，Vol.4，No.9，1990.9
- 3) 西村昭彦：既設橋梁橋脚の健全度判定法に関する研究，鉄道総研報告，Vol.3，No.8，1989.8

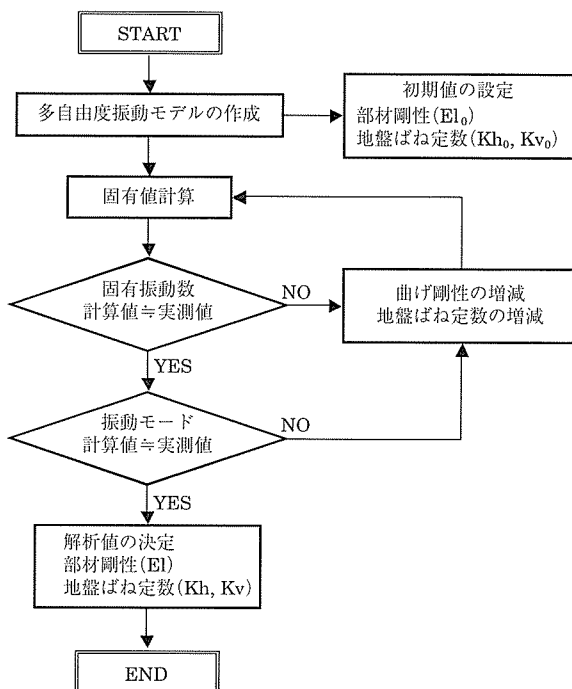


図 - 11 固有値解析のフロー

【2005年11月30日受付】