

鉄道における木杭基礎橋脚の健全度診断法概要

稲葉智明¹・羽矢洋²

¹財団法人鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 基礎・土構造 研究員
(〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

E-mail: inaba@rtri.or.jp

²財団法人鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 基礎・土構造 主任研究員
(〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

E-mail: haya@rtri.or.jp

鉄道分野では、衝撃振動試験より得られる実測固有振動数と標準値算定式より得られる標準値を比較することで基礎および橋脚躯体の健全度を定量的に評価している。しかし、標準値算定式は統計式であるため、式自体に物理的な意味はなく、また、具体的にどのような作用荷重に対して安定なのかといった評価指標になり得ていない。さらに、木杭基礎橋脚については健全度判定基準を安全側に設定していたため、健全な橋脚であっても不健全として評価されることがあった。そこで、筆者らは木杭基礎橋脚を対象に「必要固有振動数に基づく健全度診断法」を新たに作成した。この結果、具体的な荷重条件を想定した評価基準値となり、0.2G相当の地震時作用力、L1地震動を想定した評価も可能となった。

Key Words : Soundness, Non-Destructive Inspection, Impact Vibration Test, Natural Frequency, Timber Pile Foundations

1. はじめに

構造物の基礎は、通常、地中に構築されているのが一般的である。また、流水部に位置する橋脚の場合、橋脚躯体の下端部は水中に没している等、基礎および橋脚躯体下部の状態を直接目で確かめることが困難な場合が一般的といえる。

鉄道総研では、このような橋梁下部工の健全度を定量的に判定する手法として「衝撃振動試験法¹⁾」を開発した。

本手法では、橋脚の天端を重錘で人為的に打撃し、それにより得られる振動応答波形のフーリエスペクトルの卓越により固有振動数を決定し、次に、この実測された固有振動数と「固有振動数の標準値」を比較することで基礎および橋脚躯体の健全度を定量的に評価している。この診断法は、直接基礎、杭基礎、ケーソン基礎を基礎とする橋脚の他に、現在でも多く残存し供用されている木杭基礎橋脚にも適用している。

ところで、この「固有振動数の標準値」を算定するための数式は、橋脚重量、橋脚の高さ、橋脚の幅や地盤強度等、固有振動数と高い相関性を示す幾つかのパラメータを変数とする統計式として各々の基礎形式別に用意しているが、この数式が多変量解析により作られているという性格上、数式そのものに

基礎の安定計算と結びつく物理的な意味合いはない。そのため、具体的にどのような荷重条件に対し安定なのか、といった評価指標とはなり得ていないのが実状である。

筆者等は、これまで直接基礎、ケーソン基礎、杭基礎を基礎とする橋脚について、従来の「固有振動数の標準値」によらない新しい評価基準値について報告してきたが²⁾、本論文では、木杭基礎橋脚を対象に新たに作成した「必要固有振動数に基づく健全度診断法」について紹介する。

2. 従来の木杭基礎橋脚の健全度診断法

理想的には、建設当初に橋脚の固有振動数が把握されており、この値と現状で得られる固有振動数を比較することで基礎の支持条件あるいは躯体の劣化の有無に関する定量評価が正確に行えることになるが、一般的には初期値は得られていないのが実状である。そこで、鉄道総研では、詳細な目視調査、列車通過時の動的変位量測定等の結果から、明らかに健全と判断できる橋脚を対象に衝撃振動試験を数多く実施し、蓄積されたデータに基づき統計的な処理を行うことで「健全であればこれくらいの固有振動数を有しているべきである」という値を算定するた

めの数式「標準値算定式」を作成した。式(1)は木杭基礎橋脚用の標準値算定式で、これを式(2)に当てはめ、得られる健全度指標「 κ 」の値を表-1に適用することで健全度を評価している。

$$F = -9.9 \log H_d + 0.005 W_h + 14.9 \quad (1)$$

F : 固有振動数の標準値(Hz)

H_d : 橋脚高さ(m)

W_h : 桁重量(tf)

$$\kappa = \frac{\text{実測固有振動数}}{\text{固有振動数の標準値}} \quad (2)$$

表-1 構造物の健全度判定基準

健全度指標	判定ランク	
$\kappa \leq 0.70$	A	A1 異常時外力に対して危険な変状がある。他の調査結果を参照し、必要に応じて補修・補強を考慮する。
$0.70 < \kappa \leq 0.85$		A2 固有振動数の低下など、進行性を把握する。
$0.85 < \kappa \leq 1.00$	B 現状では、問題は少ない。	
$1.00 < \kappa$	S 現状では、問題はない。	

3. 新しい木杭基礎橋脚の健全度診断法

(1) 考慮する限界状態および考慮する荷重条件

鉄道橋梁下部工の設計基準（建造物設計標準・同解説（基礎構造物編）³⁾：以下、基礎標準）では、作用する荷重の組合せを考え、この組合せ荷重を安全に支えられる基礎の諸元を決定するルールを定めている。今回、新しい健全度評価の基準値を定めるにあたり、基礎標準に準じ表-2のように作用荷重の組合せを考慮し、各々の荷重条件に対し安定性を担保可能な基礎の限界状態を最初に算定し、次に、この安定計算結果に基づき各々の限界状態に応じた「必要固有振動数」を解析的に求めることとした。

(2) 安定計算および必要固有振動数の算定の基本

設計標準のいずれにも木杭基礎橋脚等の旧式構造物の設計法を規定するものはない。そこで、本検討を進めるにあたって木杭基礎橋脚を次のように解釈することとした。つまり、木杭基礎橋脚を木杭により地盤改良が施された支持地盤上の直接基礎橋脚と考え、安定計算を設計標準に準じ行い、フーチング底面位置における合力の作用位置の偏心率（ $e_x = M/V$ 、 e_x ：合力の作用位置の偏心率， M ：フーチング底面位置における回転モーメント， V ：フーチング底面位置における鉛直荷重）を規定し、この値を安定計算上の照査指標として安定計算を行うこととした。さらにその結果を用いて固有値解析モデルの構築と固有値解析を実施するものである。

また、木杭基礎橋脚の安全性の照査法を定めるにあたって、安全率は次のように定めることとした。

検討対象が新設構造物ではなく経年の長い既設構造物であること。

軟弱地盤上に構築されている木杭基礎橋脚であり、一般的な直接基礎以上に支持性状の不確定要因が多いこと。

一時的または偶発的な荷重に対しても列車の走行安全性を担保する評価基準値を目指していること。を総合的に考慮し、表-2に示す想定荷重の組合せのいずれに対しても同レベルの安全性を担保することとし、さらに、設計標準で定める最も安全側となる安全率（安全率=3.0=フーチング底面位置における合力の偏心率の許容値 $e_x = B/6$ ， B ：フーチング幅）を適用することで、安全側に評価することとした。

図-1に安定計算モデルおよび固有値解析モデルの概念を、図-2に安定計算から必要固有振動数算定までのフローチャートを示す。

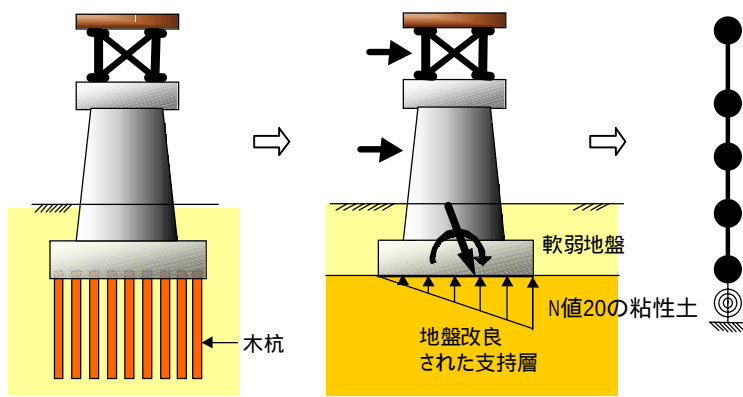
表-2 健全度を評価する上で考慮する限界状態および荷重条件

限界状態	健全度を評価する上で考慮する荷重条件
徐行限界	極端に洗掘等を受けた場合、あるいは他の原因により支持力の低下が生じることで、死荷重だけではなんとか支え得るが、列車の進入は許容されない状況にある基礎の状態である。考慮する荷重の組合せとしては、基礎標準で定める長期使用限界状態での荷重で、具体的には上・下部工重量および列車荷重である。なお、水位は平水位としている。
通常走行安全限界	通常の営業速度で列車を運行可能な安全性を確保し得るだけの安定性を有している基礎の限界状態で、永久荷重＋主たる変動荷重＋従たる変動荷重を考慮するが、具体的には上・下部工重量、列車荷重、衝撃荷重、風荷重（風速20m/s）、車両横荷重、制動荷重とした。
地震時走行安全限界（0.2G地震）	基礎標準で基準震度として設定された設計震度0.2G相当の地震時作用力に対し、安全性を確保し得るだけの安定性を有している基礎の限界状態である。
地震時走行安全限界（L1レベル地震）	鉄道構造物等設計標準・同解説（耐震設計編） ⁴⁾ で定めるL1地震動に対し、安全性を確保し得るだけの安定性を有している基礎の限界状態である。なお、検討で用いる設計震度は、耐震標準に定める地盤種別G3に応じた区分と構造物の等価固有周期（ T_{eq} ）に応じた補正を行っている。

4. 本検討手法の妥当性の検証

(1) 検証概要

本検討を行うにあたり、木杭基礎橋脚を木杭により地盤改良された支持地盤上の直接基礎橋脚と考え、安定計算およびその結果に基づく固有値解析を実施



(a) 木杭基礎橋脚概要 (b) 直接基礎への置換と安定計算 (c) 固有値解析モデル
(安定計算によりフーチング諸元の決定)

図-1 安定計算モデルおよび固有値解析モデルの概念

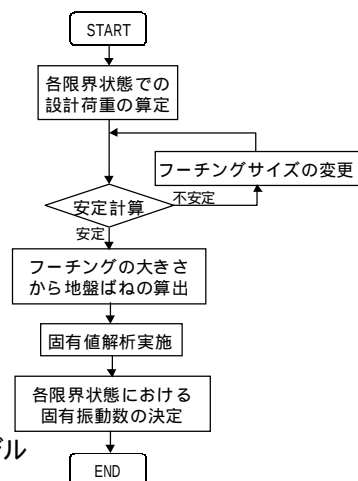


図-2 必要固有振動数の算定フローチャート

し、得られる結果を必要固有振動数と定めるものであることは先に述べた。

この手法の妥当性を検証するため、筆者等は木杭基礎橋脚からなる全17橋梁（47橋脚）について、入念な目視調査と根入れ測定、列車通過時の橋脚天端位置における動的変位量測定および衝撃振動試験を実施し、これより変状、変位量ともに問題がないと判断された40基の木杭基礎橋脚に対し適用を試みた。検証例としてA橋梁の結果を示すこととする。

九州地方にあるこの橋梁は、昭和12年に建設された3連2橋脚、全長約25mの河川橋梁である。当該橋梁は九州地方の特殊土である「有明粘土」地盤上に構築され、橋脚は末口φ180mm、長さ6.0mの松杭によって支持されている。図-3に本橋梁の一般図を示す。

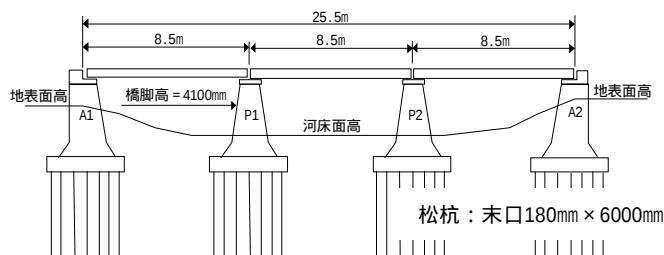


図-3 A橋梁全体概要図

(2) 衝撃振動試験結果と標準値算定結果

当該橋梁において衝撃振動試験を実施し、図-4に示す衝撃振動試験結果（上段：時刻歴速度応答波形、中段：フーリエスペクトル波形、下段：位相差スペクトル波形）が得られた。この結果はP2橋脚に対する試験結果で、これによりP2橋脚の固有振動数は6.1Hzと決定される。

一方、従来の標準値算定式による固有振動数の標

準値は10.2Hzと算定され、その結果、本橋脚の健全度指標は $\kappa=0.60$ となり、A1判定となる。

しかし、先にも述べたとおり、詳細な目視調査や列車振動測定結果および根入れ調査結果からは、この橋脚に変状の発生や支持力的に問題となる兆候は全く見られず、したがって、概ね健全な橋脚であると判断できる。

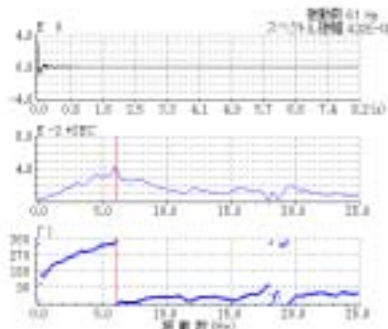


図-4 衝撃振動試験結果の例（P2橋脚天端位置）

(3) 必要固有振動数算定プログラムによる計算結果
表-3にA橋梁に対する評価結果を示す。この結果を見ると、P1橋脚については実測固有振動数が通常走行安全限界の必要固有振動数と地震時走行安全限界の必要固有振動数の間にあることがわかる。これにより、0.2Gレベルの地震力が作用した場合の走行安全性は保障されないが、通常営業速度による列車の走行安全性は担保された状態にあるということがわかる。なお、P2橋脚に関してはP1橋脚より若干安全度は高いもののP1と同様、0.2Gレベルの地震力に対する走行安全性は保障されない結果となっていることがわかる。

ここではA橋梁の例を結果として示したが、他の橋脚も同様に、従来の標準値による評価によればA1

表-3 A橋梁に対する評価結果

橋脚番号	実測固有振動数 (Hz)	標準値算定式		必要固有振動数 (Hz)			
		標準値 (Hz)	判定	徐行	通常走行	地震時走行	地震時走行
P1	5.4	10.2	A1	3.1	5.1	6.4	7.6
P2	6.1	10.2	A1	3.1	5.1	6.4	7.6

判定であったものが、新しい評価手法によることで通常走行に関して安全、あるいは0.2Gレベル相当の地震力に対し安全という結果となった。

詳細な目視調査や列車振動測定結果および根入れ調査結果から、躯体、沓座周辺に変状が見られないこと、目立った洗掘はないこと、動的な変位量も問題となる値ではないこと、さらに安定計算上安定である、といった検討結果を総合的に判断し、従来の標準値算定式が過大に安全側過ぎる評価値となっていたと考えることは妥当と考えられる。

5．B橋梁における適用例

(1) 概要

B橋梁は北陸地方において昭和5年に建設された8連7橋脚、全長約119mの河川橋梁である。当該橋梁の周辺地盤は粘性地盤（N値0～2の軟弱地盤が層厚30mで堆積）であり、末口φ127、長さ4.5～5.5mの松杭15～40本によって支持されている。図-5にこの橋梁の全体概要図を示す。

なお、本橋梁は鉄道事業者の判断によって長年徐行措置がとられてきている。

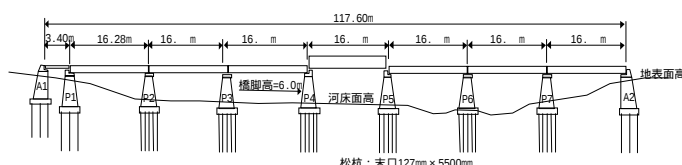


図-5 B橋梁全体概要図

(2) 衝撃振動試験結果と標準値算定式の結果

平成14年12月に当該橋梁において衝撃振動試験を実施した。表-4にすべての橋脚における実測固有振動数と標準値算定式による標準値を示す。

従来の標準値に基づく健全度指標の結果を見ると、地盤面が天端近くまで確保されているP1橋脚だけがB判定となり、残りの橋脚はすべてA1判定となっている。

なお、試験当日、衝撃振動試験に併せて入念な目視調査と根入れ調査を実施したが、沓座周辺および水上部の躯体周りには変状は発見されなかったが、P6に関しては洗掘の進行が確認された。

(3) 必要固有振動数算定プログラムによる計算結果 必要固有振動数算定プログラムによる計算結果を

同じく表-4中に示す。

解析結果から以下のことがわかる。

P1橋脚に関しては、0.2Gレベルの地震に対し列車の走行安全性は担保される判定となった。

P4、P5橋脚に関しては、通常走行に対する安全性は担保されているが、0.2Gレベルの地震に対しては列車の走行安全性は担保されない判定となった。

P2、P3、P6、P7橋脚に関しては、通常走行に対する安全性は担保されず、徐行措置が必要な橋脚と判定された。

P6橋脚は、実測固有振動数と徐行限界の必要固有振動数が接近した状態にあり、今後、洗掘が進行すると停止措置が要するまでに危険な状態となることが予想される。

なお、鉄道事業者が行ったP6橋脚の河床面調査によると、過去に実施した洗掘対策用布団籠が河床面の傾斜に沿って斜めにずれた状態にあることと、周辺地盤の洗掘が進んでいることが確認された。

したがって、このP6橋脚のみ、平成15年度末までにシートパイル締切り工法による補強対策を実施し、安全性の向上を図ることとした。

6．まとめ

衝撃振動試験による木杭基礎形式を有する橋梁下部工の健全度判定の際に、従来の標準値算定式を用いた方法では適切な判定が困難な場合があった。そこで杭基礎橋脚を対象に新たに作成した「必要固有振動数に基づく健全度診断法」を適用したところ、現状において構造物がどの限界状態にあるのかといった具体的な判定、明らかに健全な構造物に対して不健全という判定をしてしまう不具合の解決、が確認された。今後はこの手法に基づく木杭基礎橋脚の診断が道事業者の方々に活用されることを望む次第である。

参考文献

- 例えば、西村昭彦、棚村史郎：既設構造物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
- 羽矢洋，稲葉智明：衝撃振動試験における新しい評価基準値，鉄道総研報告，Vol.16，No.9，2002.9
- 日本国有鉄道：建造物設計標準・同解説（基礎構造物編），昭和61年3月
- （財）鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説（耐震設計編），平成11年10月

(2003. 10. 10 受付)

表-4 B橋梁に対する評価結果

橋脚番号	実測固有振動数 (Hz)	標準値算定式		必要固有振動数 (Hz)			
		標準値 (Hz)	判定	徐行	通常走行	地震時走行	地震時走行
P1	9.0	9.8	B	4.8	7.6	8.9	9.8
P2	4.5	7.8	A1	2.9	5.3	7.2	8.1
P3	4.6	7.8	A1	2.9	5.3	7.2	8.1
P4	4.4	7.8	A1	1.8	3.3	4.8	5.4
P5	4.4	7.8	A1	1.8	3.3	4.8	5.4
P6	3.3	7.8	A1	2.9	5.3	7.2	8.1
P7	4.6	7.8	A1	2.9	5.3	7.2	8.1