

栈橋の固有周期を活用した健全度評価と 打撃振動試験（非破壊検査）による栈橋の 使用性判断の一事例

山本 隆信¹

¹みらい建設工業株式会社 技術本部 技術部.

本資料は、栈橋の固有周期（固有振動数）を活用し、部材毎ではなく栈橋構造全体での健全度評価を評価する打撃振動試験（非破壊試験）について紹介する。また、台風により被災した直杭式栈橋について、打撃振動試験により早期に栈橋の使用性を判断し、栈橋の利用を可能とした一つの事例を報告する。

キーワード：栈橋の固有周期、非破壊試験、利用可否判断の迅速化、維持管理

1. はじめに

我が国は、高度経済成長期に整備した港湾施設の老朽化が今後急速に進行する中で、激甚化する気象災害、切迫する巨大地震への対応が求められている。このような背景において、港湾は物流等の経済活動の拠点であり、また、災害時には緊急物資の輸送拠点であり、災害時や施設の変状時に、港湾施設の利用を継続できるかが重要である。

本報告は、被災状況の把握・利用可否判断の迅速化についての一つの手法として、鉄道で多くの実績を持ち、地震直後の新幹線等の運行判断に利用されている技術を港湾構造物に適用した打撃振動試験について、その概要と台風により被災した栈橋での使用性判断の一事例について紹介する。

2. 打撃振動試験の概要

一般的には、栈橋の被災時の利用可否判断は、被災後の緊急点検として水中部の杭および杭頭部等の目視点検を行い、変状があれば必要に応じて詳細調査を実施し、部材毎で判断を行う。この場合、例えば被災直後における潜土の安全性の確保や、一部の杭に損傷が確認された場合の使用性の判断が必要であり、状況によっては施設の使用までの判断が遅れ、緊急物資の輸送や施設利用者の経済活動の継続に支障がでる可能性がある。

打撃振動試験は、時間や安全性の観点から栈橋下部の健全性が確認できない状況でも、栈橋上部から栈橋の固

有周期を調査する事で、栈橋構造全体としての耐荷性能を定量的に確認できる試験である。

以降に、打撃振動試験の概要を示す。

(1) 打撃振動試験での耐荷性能の評価方法

図-1に、打撃振動試験の判定原理イメージを示す。

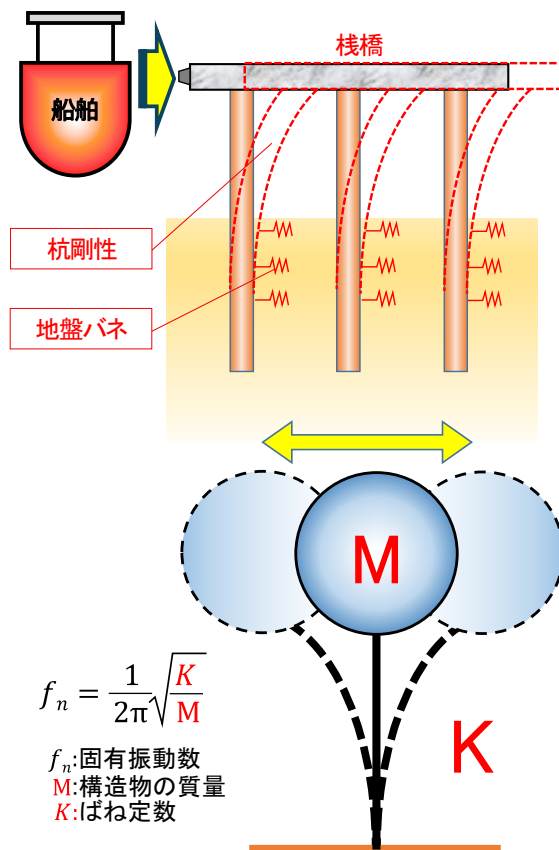


図-1 打撃振動試験の判定原理イメージ

船舶の接岸・牽引や地震等の水平荷重により、栈橋は水平変形する。この時、栈橋全体としての剛性は地盤と構造物による全体のばね定数として表せる。構造物の固有振動数は、構造物の質量 M と栈橋全体のばね定数 K で決定される物理量であり、構造物の質量は被災前後で大きく変化しないため、固有振動数の低下は構造物全体の剛性の低下（ばね定数の低下）となる。

打撃振動試験では、栈橋の固有振動数を計測し、栈橋のばね定数（剛性）を確認する事で、定量的に耐荷性能を評価する。

(2) 使用機材と試験方法

表-1に主な使用機材を示す。また、写真-1にサーボ式加速度計、写真-2に打撃振動試験測定装置、写真-3に強制振動に利用する重錘を示す。

表-1 主な使用機材

機 器 道 具	型 式	数 量	製 作 者	概 略 仕 様
サーボ式加速度計	LS-10C	5個	リオン	—
打撃振動試験測定装置	NSIRB	1台	JRSE	—
重錘		1個	JRSE	30kg程度



写真-1 サervo式加速度計



写真-2 打撃振動試験測定装置



写真-3 重錘

打撃振動試験は、写真-4に示すように対象構造物に重錘（構造物を傷めないようにゴムで保護）で衝撃を与えることによって自由振動を発生させ、サーボ式加速度計にて応答加速度の波形データを収録し、振動数解析を行い、固有振動数と振動モードから構造物を評価する。



写真-4 打撃振動試験状況

本報告では、重錘の架台を単管パイプで組んだ事例を紹介しているが、現在は約5分程度で組み立てができる専用の架台を製作している。

(3) データ処理・解析のフロー

図-2に、データ処理と解析のフローを示す。栈橋の各スパン毎で応答波形を5～10波重ね合わせ、この重ね合わせ波形のフーリエ解析を行い、振幅スペクトルと位相差スペクトルを算定する。複数の応答波形を重ね合わせることで、波浪等のノイズを除去する。

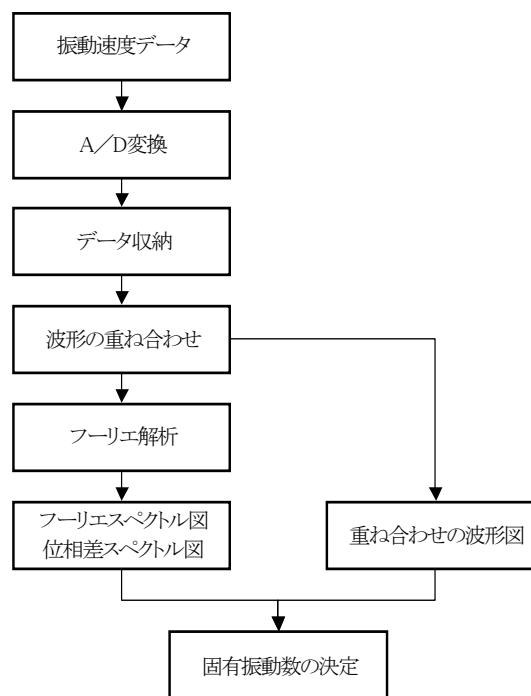


図-2 データ処理と解析のフロー

固有振動数は、振幅スペクトルおよび位相差スペクトルを用いて総合的に判断し決定する。打撃振動試験では、位相スペクトルが確認でき、より正確な固有振動数の評価が可能である。例えば、外力と変形の関係では、位相差が 90° や位相差 180° （逆位相）で、外力の大きさと変形量が逆になる。また、各加速度計位置における位相差が同じならば、同じ方向に変形が生じていて、 180° 異なれば、逆方向に変形が生じている事になる。

3. 打撃振動試験による耐荷性能評価の一事例

(1) 経緯

写真-5に栈橋の被災状況を示す。被災後の各種データから、台風時に設計波を超えた状況にて直杭式栈橋が被災したと考えられる。



写真-5 栈橋の被災状況

栈橋所有者の経済活動を早期に再開するため、早急な判断が求められたが、栈橋が被災している状況であり、潜土の安全性確保や部材毎の性能確認には時間を要する状況であった。また、すでに部分的な不具合が確認されている中でも、構造全体で耐荷性能を確保できれば運用は可能である。これらの点から、耐久性の低下については運用しながら補修する前提で、耐荷性能試験として打撃振動試験を実施する事とした。なお、打撃振動試験では杭および杭頭結合について評価し、栈橋上部工については、高性能カメラによるたわみ試験で評価した。

(2) 栈橋構造および打撃位置・加速度計設置位置

図-3に栈橋の断面図を示す。計画水深は-10mであり、上部工1スパンの大きさは25m×15m、径1100mmの杭が9本（3本×3列）ある直杭式栈橋である。

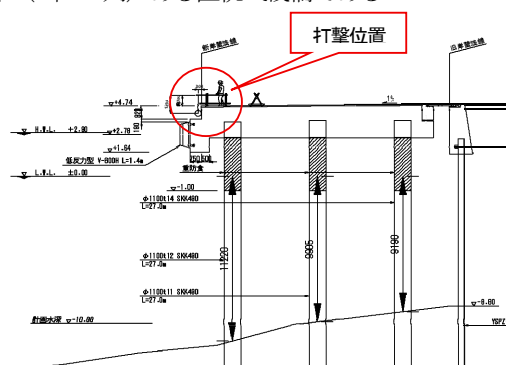


図-3 栈橋断面図

図-4に打撃位置および加速度計設置位置を示す。上部工はPCホロー桁構造であり、1スパンにおいて片側の杭1列が可動支承（以降、ムーブ側と記す）となっている。その他の杭頭部は固定である（以降、中央部およびフィックス側と記す）。

打撃位置は、栈橋の中央部とした。加速度計は、栈橋の水平移動、水平回転、鉛直移動が確認できるように設置した。

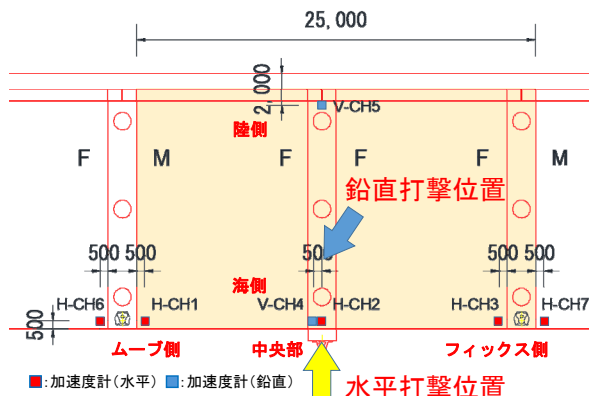


図-4 打撃位置・加速度計設置位置

(3) 水平振動計測結果

a) 振幅スペクトルと位相スペクトル

図-5に水平振動の計測結果を示す。

振幅スペクトルは、各スパンによる違いが多少あるが、1 (Hz) 周辺、10 (Hz) 周辺、40 (Hz) 周辺の3つのピークが確認された。

位相スペクトルは、加速度の計測位置（ムーブ側、中央部、フィックス側）による違いが確認された。スパンによる大きな違いは無く、概ね同じ傾向であった。なお、振動数が低い範囲では、計測ピッチの影響により、位相スペクトルの計測値が飛び、バラつきがみられた。

以降に、振幅スペクトル、1 (Hz) 周辺、10 (Hz) 周辺、40 (Hz) 周辺の3つのピークと位相スペクトルの状況について記載する。

① 1 (Hz) 周辺

振動数としては、他の振動数より小さいため、比較的揺れやすい振動モードである。

振幅スペクトルは、ムーブ側、中央部、フィックス側ともに、比較的明確に表れている。

位相スペクトルは、振動数が低いいため、バラつきが大きい。

② 10 (Hz) 周辺

振動数としては、1 (Hz) より揺れにくく、40 (Hz) より揺れやすい振動モードである。

振幅スペクトルは、中央部のみが明確に表れている。

位相スペクトルは、中央部<ムーブ側<フィックス側の準で小さい結果であった。

③ 40 (Hz) 周辺

振動数としては、他の振動数より大きいいため、比較的揺れにくい振動モードである。

振幅スペクトルは、ムーブ側、中央部、フィックス側ともに、比較的明確に表れている。

位相スペクトルは、中央部に対して端部（ムーブ側とフィックス側）が約180° の差であった。

b) 各固有振動数に対する振動モード

図-6に固有振動数に対する、水平振動の振動モードを示す。

前節の結果から、1 (Hz) 周辺が、地盤から基礎杭全体で揺れ、最も揺れやすい水平振動モードと判断した。40 (Hz) 周辺は、最も揺れにくく（つまり最も剛性が高い）中央部と端部で逆方向に変形する、スラブの曲げ振動モードと判断した。10 (Hz) 周辺は、中央部のみ振幅スペクトルが明確に表れているため、偏心した回転振動と考えられる。

船舶の接岸・牽引に対しては、地盤から基礎杭全体での耐荷性能が重要であるため、水平振動モードである1 (Hz) 周辺の固有振動数について、以降で評価を行った。

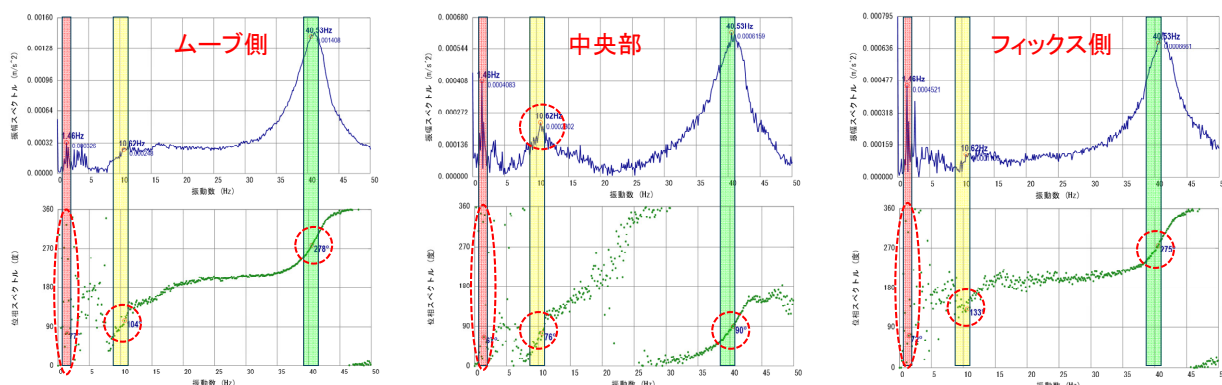


図-5 水平振動計測結果

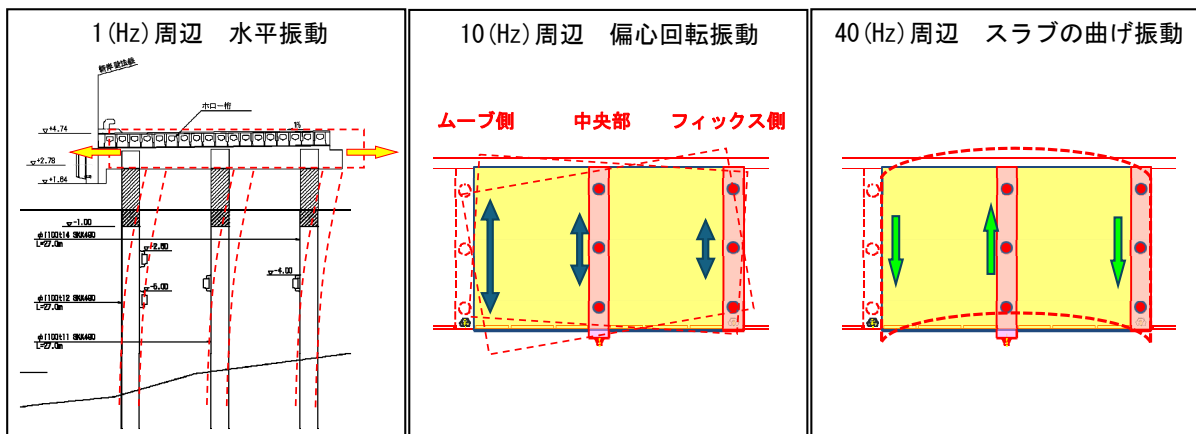


図-6 固有振動数に対する水平振動の振動モード

c) 水平振動モードによる耐荷性能の評価

本栈橋は、被災前に実際の固有振動数を計測していなかった。このため、設計計算書を基にして、健全状態での固有振動数を算定し比較する事で、耐荷性能を評価した。

設計時における照査用震度を設定する際の構造全体のばね値を基に、被災後の実際の状況に合わせて落下した渡版および渡版受桁の重量を低減し、固有振動数を算定した。設計では、地盤条件の違いから、Ⅰ区およびⅡ区に区画分けして設計されていたため、2つの区画で分けて比較を行った。また、参考までに、国総研資料¹⁾による実際の栈橋で計測された固有周期から固有振動数を算定し比較した。

表-2に水平振動モードにおける固有振動数の比較を示す。設計計算書を基にした健全時の固有振動数は、Ⅰ区で0.68(Hz)、Ⅱ区で0.59(Hz)であった。打撃振動試験での計測値は、Ⅰ区で1.34(Hz)、Ⅱ区で1.10~2.93(Hz)であり、設計計算書を基にした固有振動数より高かった。

また、国総研資料を基にした、全国の健全な栈橋での測定結果1~3(Hz)とも同程度であり、既往研究による報告事例に照らしても、対象施設の剛性の著しい低下は確認されなかった。

表-2 水平振動モードにおける固有振動数の比較

	実測 (Hz)	設計 (Hz)	栈橋の計測事例 ¹⁾ (Hz)
Ⅰ区	1.34	0.68	1~3 程度
Ⅱ区	1.10~2.93	0.59	

(4) 鉛直動計測結果

a) 振幅スペクトルと位相スペクトル

図-7に鉛直振動の計測結果を示す。振幅スペクトルは、7(Hz)付近にピークが確認された。海側のピークが大きいのは、海側で鉛直打撃を行ったためである。位相スペクトルは、海側と陸側の設置された加速度計にて、180°程度の大きな位相差は現れなかった。

b) 鉛直振動モードによる耐荷性能の評価

図-8に鉛直振動の振動イメージを示す。杭頭部とPCホロー桁の受梁部が健全(剛結)ならば、鉛直打撃による振動では、床版は全体として上下運動を行う。杭頭に異常があり、受梁と剛結されていない場合は、床版は回転的な運動となる。

前項より、鉛直打撃を栈橋の中心より海側で行ったが、栈橋の海側と陸側の各加速度計位置における位相差が小さく、同じ方向に変形が生じ回転していない結果である。これにより、杭頭部の結合は保たれていると判断した。

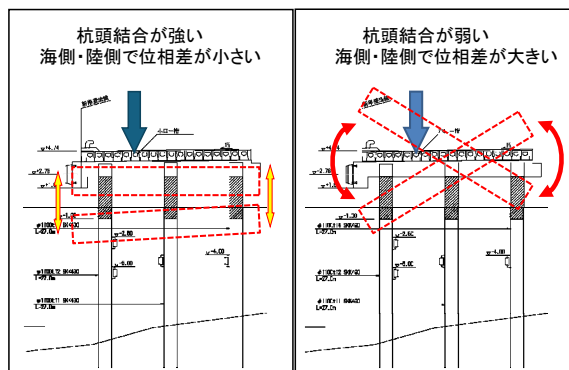


図-8 鉛直振動の振動イメージ

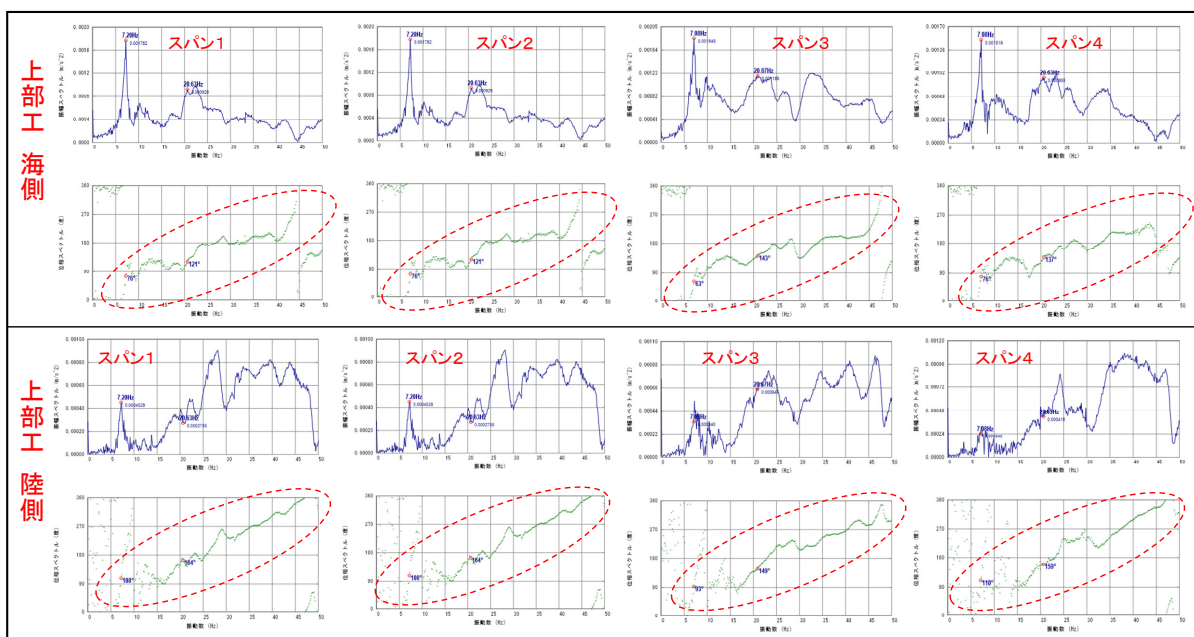


図-7 鉛直振動計測結果

(4) 打撃振動試験による耐荷性能評価のまとめ

打撃振動試験による、耐荷性能評価のまとめを以下に示す。なお、実際の栈橋の使用性の評価は、打撃振動試験の他に床版のたわみ試験も実施し、床版の耐荷性能も確認して評価した。

① 水平振動

固有振動数のピークは1(Hz)周辺、10(Hz)周辺、40(Hz)周辺の3つのピークが確認できたが、振幅スペクトルおよび位相スペクトルを総合的に考慮し、船舶の接岸・牽引に重要な水平振動モードの固有振動数は1(Hz)周辺と判断した。

設計計算書を基にした健全時の固有振動数は、Ⅰ区で0.68(Hz)、Ⅱ区で0.59(Hz)であった。打撃振動試験での計測値は、Ⅰ区で1.34(Hz)、Ⅱ区で1.10～2.93(Hz)であり、設計計算書を基にした固有振動数より高く、また、全国の健全な栈橋での測定結果1～3(Hz)とも同程度であり、既往研究による報告事例に照らしても、対象施設の剛性の著しい低下は確認されなかった。

② 鉛直振動

鉛直振動では、栈橋の海側と陸側の各加速度計位置における位相差が小さく、同じ方向に変形が生じていて、回転ではなく上下に振動している結果であった。これにより、杭頭部の結合は保たれていると判断した。

本報告における、打撃振動試験の事例では、現地での調査時間は1スパンを2時間程度で実施した。また、固有振動数はその場で、パソコン上で確認が可能である。本事例では、事前に固有振動数の確認や設計モデルでの固有振動数など、判定基準が準備できていない状況での判断であり解析や評価に数日の時間を有したが、事前に判定基準を設定しておく事で、早急な使用性の判断が可能となる。

4. おわりに

本事例では栈橋の被災時における使用性の判断について報告したが、栈橋の維持・管理では、初回点検以降、日常点検や定期点検、被災時は緊急点検を実施し、劣化度や被災度に応じて、補修工事や復旧工事を実施している。このような点検・診断を早急に行えるようにするため、栈橋の固有周期を踏まえた維持管理手法は有効であると考ええる。

栈橋の固有周期の把握手法については、本技術の他に、国土技術政策総合研究所において、常時微動観測による栈橋の固有周期の推定に関する研究が進められている。

これまでの研究成果を踏まえて、国土技術政策総合研究所、西村耐震防災研究所、みらい建設工業の3者は「港湾施設における栈橋等の固有周期の推定手法に関する共同研究」という形で、更なる研究を進めている。

謝辞：本技術の研究および本調査にあたり、株式会社西村耐震防災研究所の西村昭彦様（元（公財）鉄道総合技術研究所 耐震・基礎研究室長）に、ご指導・ご尽力をいただきました。心より感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 国総研資料（第 1082 号）：常時微動観測による実栈橋固有周期の推定手法に関する基礎的検討。