

第63回(2019年度) 北海道開発技術研究発表会論文

ハンマ打撃によるナット緩み検出手法について —附属物点検への適用可能性の検討—

網走開発建設部 興部道路事務所 計画課 ○中西 慎吾
渡邊 一悟
村上 健志

道路標識や道路照明施設などの道路附属物の点検のうち打音検査は、その判定に一定の技術力を持った熟練技術者が必要であるが、若手技術者の離職問題など担い手不足により、熟練技術者を確保することが容易ではなくなっている。そこで本稿は、打音検査と同程度の手軽さで実施可能なハンマ打撃によって、ベースプレートナットの緩み検出が、簡易かつ定量的に求めることが可能であることを実験的に検証したものである。

キーワード：維持・管理、附属物点検、ハンマ打撃、打音検査

1. はじめに

道路標識や道路照明施設などの道路附属物の点検は、「附属物（標識、照明施設等）点検要領」¹⁾に基づき、管理する附属物の現状を把握し、変状を早期に発見するとともに、対策の要否を判定することにより、安全かつ円滑な道路交通の確保を図ることを目的として実施されている。点検要領によれば、ナットの緩みに関する点検の手法は工具等による締付の確認が基本となっており、実際の現場においては、打音検査が実施される場合が多い。打音検査には、熟練技術者が必要であるが、近年の建設業を取り巻く「担い手不足」の現状から熟練技術者の確保が大きな課題となっている。一方、熟練技術を必要とせず、ナットの緩みなどを定量的に判断する技術として、非破壊検査が存在するが、道路附属物は、膨大な量をストックしており、非破壊検査による全数検査は、点検に要する時間や費用の面からも現実的ではない。道路附属物のうち、多数を占める固定式視線誘導柱では、興部道路事務所管内に限っても約3,200本と非常に膨大な基数である。このため、打音検査と同程度の手軽さで、構造物の状態を定量的に評価が可能な技術の適用が望まれている。

本論は、近年開発されたハンマ打撃によって得られる打撃力波形を分析することによって、あと施工アンカーの固着不足やナットの緩みを検出する測定技術に着目し、固定式視線誘導柱のベースプレートを固定しているナットの緩み検出を対象にして、実用的な範囲で適用可能であるか、緩みの検出能力と作業性の側面から実験的に検討したものである。

2. 実験概要

本論は、写真-1に示すように国道238号に設置されている固定式視線誘導柱のベースを固定しているナットの緩み検出を対象に、当該技術の検出能力確認と作業性に関する検討を実施している。その実験概要を以下に示す。



写真-1 測定対象の固定式視線誘導柱とベース固定ナット

(1) ナットの緩み検出に関する実験概要

実験は、固定式視線誘導柱のベースプレートを固定しているナット4本の内、2本を測定対象とした。ナットの

トルクを規定トルク（320N・m）に対して、10%～100%まで10%間隔に変化させながら打撃力波形を測定し、測定した波形から機械インピーダンスを算出してナットの緩み検出が可能であるか検討した。測定は写真-2に示すように、ナットを横方向に5回打撃して測定を実施した。機械インピーダンスは5回の測定結果の内、最大値と最小値を除いた3点について平均を求め、各トルク比での機械インピーダンス値の決定値を求めた。測定に使用したハンマは、ヘッド重量420gのハンマ（以下、中ハンマと呼称）とヘッド重量195gのハンマ（以下、小ハンマと呼称）の2種類とした。測定波形は、中ハンマと小ハンマ共にサンプリング時間間隔0.5μs、測定時間長2msで測定波形を記録した。



写真-2 ナットの測定状況

(2) 作業性に関する検討

固定式視線誘導柱32基のベースを固定しているナットの緩みを対象に、通常の点検で要する作業時間と機械インピーダンス試験方法を用いて点検する場合に要する作業時間を計測し、その作業性を比較検討した。

3. 機械インピーダンス法について

(1) 機械インピーダンス法の概要

人間の感覚として、ハンマで硬いものを打撃したとき、大きな力が発生し、打撃した瞬間にハンマが反発するように感じ、軟らかいものを打撃したときは、力の発生は小さく、ハンマの反発も硬いものと比較してゆっくりと反発しているように感じる。機械インピーダンス法とは上記の感覚を定量的に評価するため、インピーダンスの概念に当てはめて指標化したものである。本実験では、加速度計が内蔵されたハンマで対象物を打撃し打撃力の時間波形を測定・解析することで、人間の感覚を具体的な数値として指標化を行った。なお、コンクリートの分野においては、日本非破壊検査協会規格NDIS3434-3機械インピーダンス試験方法²⁾として規格が制定され、コンクリートの圧縮強度推定などで活用されている。

(2) 機械インピーダンス法の基本原理

被打撃体を完全弾性体として仮定し、図-1に示すように、質量 M のハンマが任意の速度 V_0 でバネ係数 K の被打撃体に衝突する現象を考える。ハンマの衝突による被打撃体に生じる最大変位を D_{max} とすると、エネルギー保存の法則から、ハンマの持つ運動エネルギー E_H と被打撃体のひずみエネルギー E_C は等しく、式(1)が成立する。

$$E_H = E_C \Rightarrow \frac{1}{2} M V_0^2 = \frac{1}{2} K D_{max}^2 \quad (1)$$

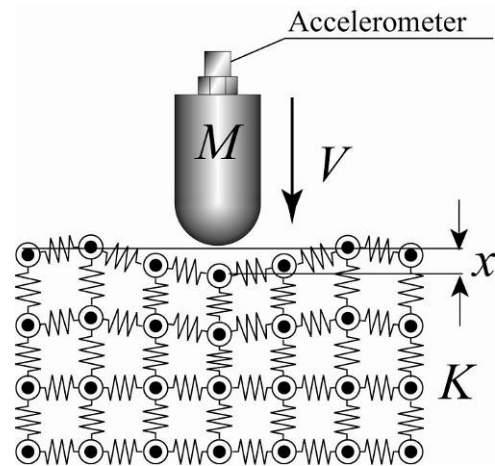


図-1 ハンマの衝突モデル

最大打撃力 F_{max} は、フックの法則より、

$$F_{max} = K D_{max} \quad (2)$$

であり、式(2)を D_{max} について解き、式(1)に代入して整理すると、

$$\frac{F_{max}}{V} = \sqrt{MK} \quad (3)$$

が得られる。式(3)に示す \sqrt{MK} は、ばね質量系の機械インピーダンス Z であり、機械インピーダンスは被打撃体のバネ係数 K に由来する指標となり、材料の弾性係数に相当する指標であると考えられる。測定対象がコンクリートの場合、圧縮強度の大小によって弾性係数が異なるため、これを利用して圧縮強度の推定を試みている。ナットを測定対象とした場合、ナットの材質は鋼であり材料そのものの弾性係数に相違はないものの、トルクの大小によって部材全体としての剛性に変化が生じるもの

と考えられる。この剛性の変動を機械インピーダンスとして捉えようとするものである。

(3) 測定波形からの算出

図-2は、コンクリートを打撃対象として測定した打撃力波形の例である。波形は、上に凸の一つ山の波形となっている。被打撃体を完全弾性体とした場合、打撃力波形は作用と反作用から構成される。図-2の打撃力波形では、波形のピークより前半が、ハンマがコンクリートを押し続けている作用域。ピークより後半が、コンクリートがハンマ押し戻す反作用域となり、NDIS3434-3では、作用域を貫入過程、反作用域を反発過程と呼称している。NDIS3434-3では、コンクリートの圧縮強度を評価する場合、打撃力波形を貫入過程と反発過程に分離し、反発過程から機械インピーダンスを算出することを推奨している。これは、健全なコンクリートであっても完全弾性体ではなくある程度の軟らかさ（塑性）を持っており、作用域においてハンマがコンクリートに貫入する過程が含まれてしまうためである。一方、本論での測定対象はボルト・ナットであり、その材質は鋼材である。鋼材は、コンクリートと比較して十分に硬い材料であり、完全弾性体とみなすことができる。このため本論においては、打撃力波形は分離せず、式(4)に示す通り、波形全体から機械インピーダンスを算出し、ナットの緩みが検出可能であるか検討した。

$$Z = \frac{F_{\max}}{V_R^{1.2}} \approx \frac{MA_{\max}}{\left(\int_{T_1}^{T_3} A(t)dt\right)^{1.2}} \quad (4)$$

ここに、 Z ：波形全体から算出した機械インピーダンス
 F_{\max} ：最大打撃力、 V ：打撃体の衝突速度 V_A と反発速度 V_R の和、 M ：打撃体の質量、 A_{\max} ：最大加速度、 $A(t)$ ：加速度の時間波形、 T_1 ：打撃開始時刻、 T_3 ：打撃終了時刻である。

4. 結果および考察

(1) ナットの緩み検出測定結果（中ハンマ）

図-3に中ハンマで測定した各トルク比の波形の一例を示す。打撃対象物が弾性体として作用する場合、図-2に示すように一つ山の波形が採取される。これに対し、図-3のトルク比10%~50%では、0.5~0.8ミリ秒付近に小さな山が発生しており双山の波形となっている。トルク比60%以上では、波形そのものに変化は確認できない。既往の研究³⁾では、打撃に対して被打撃体が弾性体として挙動（線形挙動）する場合には、入力に対して反力が時間遅れ無く発生するため、入力の波形と反力の波形が合

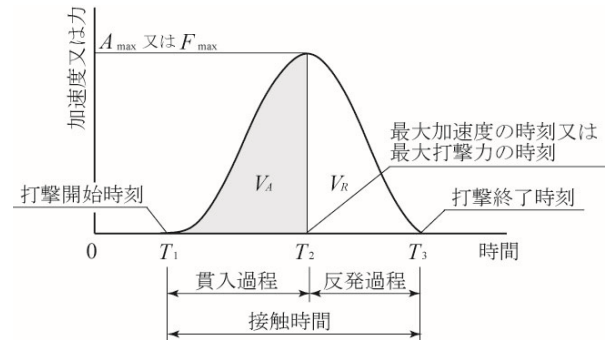
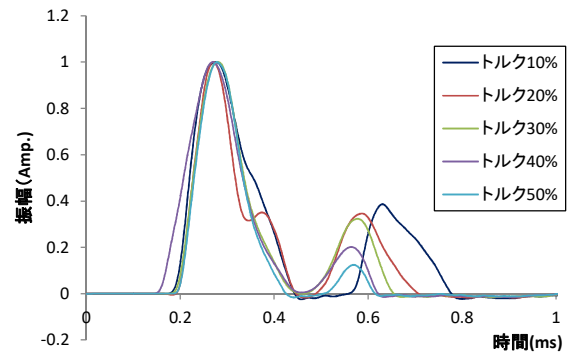
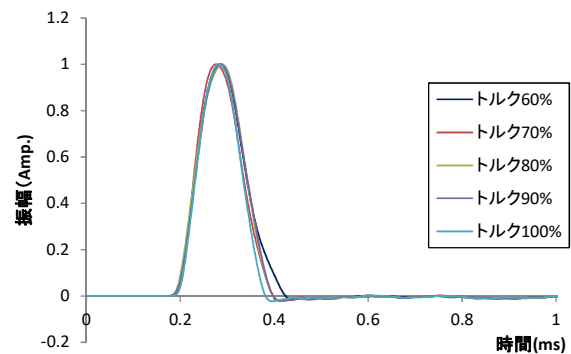


図-2 測定した打撃力波形と各時刻の定義



a) トルク比 10%~50%の波形



b) トルク比 60%~100%の波形

図-3 各トルク比における測定波形の例（中ハンマ）

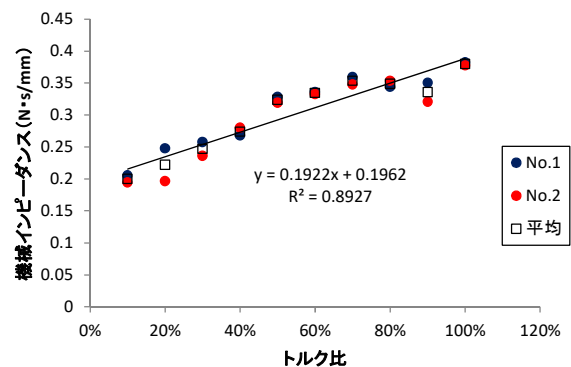


図-4 機械インピーダンスとトルク比の関係（中ハンマ）

成され一つ山の波形となるのに対し、双山となる場合には、被打撃体が塑性挙動（非線形挙動）を示し、入力に対して反力が生成されるまで時間遅れが生じるため双山

になると考えられている。本実験においては、トルク比10%~50%において、ハンマ打撃に対してナットが動いた（非線形挙動）ために双山になったものと考えられ、波形形状から即座にナットが緩んでいることが確認できる。一方、トルク比60%~100%では、波形形状に大きな変化はなく、波形形状のみでナットの緩みを判別することは困難である。トルク比が60%以上となると、ナットが打撃に対して弾性体として挙動するため波形形状に大きな変化が見られなかったものと考えられる。トルク比60%以上のものについては、式(4)から算出した機械インピーダンスで判別が可能であるか検討を行った。機械インピーダンスは、ボルト・ナットの構造体としての剛性を反映すると考えられ、トルクの大小によってボルト・ナットの構造体としての剛性が変化すると考えられるためである。

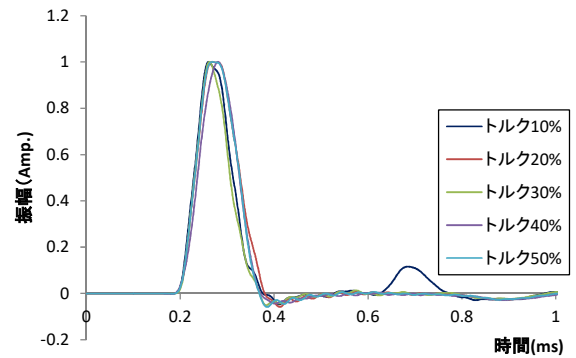
図-4に測定波形から式(4)で算出した機械インピーダンスとトルク比の関係を示す。機械インピーダンスとトルク比には比例関係が認められ、その寄与率も0.89と非常に高い。打撃対象のナットの種類が同じという条件下においては、機械インピーダンスからトルク値が推定できることを示唆している。実際の運用では、図-4に示す機械インピーダンスとトルク比の関係（回帰式）を予め求めておき、現場で測定した機械インピーダンスを予め求めた回帰式に代入することによって、リアルタイムでトルク値を確認することが可能となる。なお、規定トルクに対し、どの程度のトルク値を有していれば健全とするか、その判断基準については十分な検討が必要である。

(2) ナットの緩み検出測定結果（小ハンマ）

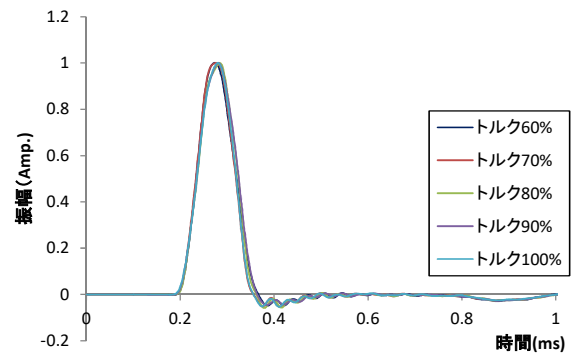
図-5に小ハンマで測定した各トルク比の波形の一例を示す。小ハンマでは、トルク比10%のみ双山となっており、20%以降は、波形形状に大きな変化は確認できない。波形形状のみでは、トルク比10%のみが判別可能な結果であった。中ハンマでは、トルク比が60%以上となった場合、波形形状からではなく、機械インピーダンスを算出することでトルク値の推定がある程度可能であることが示されている。そこで、小ハンマにおいても、同様に、測定波形から式(4)で算出した機械インピーダンスとトルク比の関係を求めた（図-6）。中ハンマと異なり、グラフの勾配がほぼ平行で寄与率も0.29と低い。小ハンマにおいては、波形が双山となったトルク比10%を除いて、機械インピーダンスの指標値からナットの緩み検出が困難であることを示している。これは、ハンマ質量が小さく、ナットに作用させる打撃力が中ハンマに比較して相対的に小さいために、トルク比が小さい状態でも、弾性体として挙動したためと考えられる。

(3) 作業性に関する検討結果

作業性に関する検討は、図-7に示すフローに従って作業を行い検討した。通常点検および機械インピーダンス



a) トルク比 10%~50%の波形



b) トルク比 60%~100%の波形

図-5 各トルク比における測定波形の例（小ハンマ）

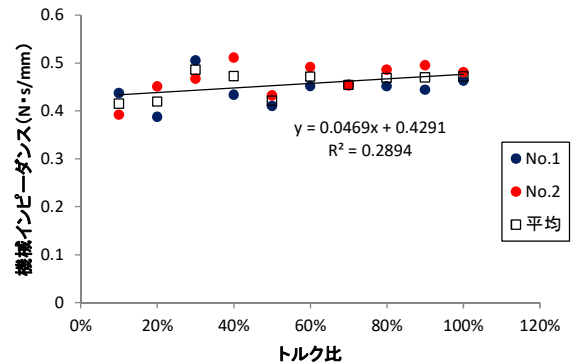


図-6 機械インピーダンスとトルク比の関係（小ハンマ）

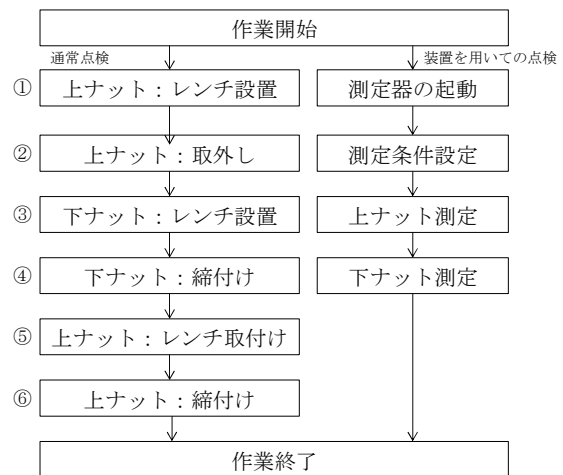


図-7 通常点検と装置による点検の作業フロー

試験方法ともに二人一組とし、純粋な作業時間を把握するため、ベースに溜まっている土砂の撤去や、緩みが発生していた場合の再締付けの時間は考慮していない。なお、通常の点検においては、合いマークが施されておらず、締付の確認が目視以外に必要な状態を想定し、トルクレンチで締め付けの確認を行うことを前提に実施した。表-1に通常点検と装置による点検にかかる時間の計測結果を示す。

表-1 通常点検と装置による点検にかかる時間
(ベースプレートのみ 1基あたり)

	通常点検	装置による点検
点検方法	トルクレンチによる確認	ナット頭部を横方向に5回打撃
測定時間(分)	6	1

通常点検（トルクレンチによる確認）では、1基当たり6分程度の時間を要しているのに対し、装置を用いた点検では1基あたり1分で作業を終えている。図-7に示すように、通常点検では、上側ナットを一旦取外す作業が入るため、手順として6つの手順を必要とするのに対し、測定器を用いた点検では、4つの手順で作業が完了する。さらに、①の測定器の起動については、装置を動かす際に一度だけ実施する手順であり、実質3つの手順で作業が完了する事となり、これが、大幅な時間短縮が可能であった要因と考えられる。実際の点検時では、緩みが確認された時点で増し締めをすることになっている。トルクレンチを使用した通常点検では、増し締め作業の追加はないが、装置を用いた点検で緩みが発見された場合は、増し締め作業が別途必要になる。ただし、緩みの生じているナットは総量として多くないため、増し締め作業分を加味した場合においても、測定時間は短縮されるものと考えられる。なお、この1基当たりの測定時間は打音検査に匹敵する作業性と考えられる。

5. まとめ

機械インピーダンス法が実用的に附属物点検へ適用可能か検討した結果、以下のことがわかった。

- 1) 固定式視線誘導柱のベースを固定しているナットのトルク比を規定トルクに対して10%~100%まで10%刻みで変化させながら測定を実施した。その結果、小ハンマにおいては、トルク比10%で双山となるが、20%以降は波形に変化が見られず、波形形状からも、機械インピーダンスからも緩みの判別は困難であった。一方、中ハンマでは、トルク比10%~50%まで双山の波形が得られ、トルク比50%までであれば、波形形状のみで緩みの判別が可能であることがわかった。トルク比60%以上の判別については、機械インピーダンスを求めることで判別が可能であると考えられる。予め機械インピーダンスとトルクの関係式を設定していれば、現場でリアルタイムにて定量的なトルク値を把握することが可能であることを示している。
- 2) 機械インピーダンス法を用いての点検にかかる時間は、1基当たり1分であり、打音検査に匹敵する作業性を持っていることがわかった。
- 3) 機械インピーダンス法を用いることで、作業性を大きく低下させることなく、かつ定量的に緩みを判別できることから、附属物点検において機械インピーダンス法は有効に活用できると考えられる。

参考文献

- 1) 国土交通省道路局国道・技術課：附属物（標識、照明施設等）点検要領，H31年3月
- 2) 日本非破壊検査協会，NDIS3434-3：コンクリートの非破壊試験-打撃試験方法-第3部：機械インピーダンス試験方法，H29.05.19 制定
- 3) 岡本真，久保元樹，久保元，境友昭，打撃によるケミカルアンカーボルトの非破壊健全性試験方法，日本非破壊検査協会，第5回コンクリート構造物の非破壊検査シンポジウム，pp245-248，2015,08