

新しい空洞調査手法の開発

—既設トンネル覆工背面空洞調査システム (PVM)—

大嶋 健二・伊藤 哲男・西村 晋一

PVM システムは、覆工コンクリートの削孔から空洞の有無の判定、さらには空洞量の測定までをすべて機械化して行い、今までの「人による作業のため危険度が高い」「工期が長い」「コストが高い」などの課題を解決できるものである。削孔は回転打撃式を採用し、基礎実験により機械データの傾向と特性、および調査時間と精度を検証した。また、削孔装置、油圧ユニット、エアコンプレッサ、発電機、集塵器など一式を車輛に搭載した自走式調査機を製作し、2本のトンネルにおける調査工事に適用してその精度と実用性を確認した。

キーワード：覆工コンクリート、維持管理、空洞調査、回転打撃式削孔

1. はじめに

矢板工法により建設されたトンネルでは、鋼製支保工や矢板が支障になり覆工と背面地山との間に空洞が残ることが多く、特にアーチ部では多くの空洞が生じる場合がある。トンネル覆工の耐荷力を高め、変状に対する覆工コンクリートの耐久性の向上を図るには、覆工背面に空洞のあるトンネルを対象に空洞を注入材等で充填することが最善であり、そのためには背面の空洞量と空洞分布を効率的に把握する必要がある。

また、アセットマネジメントの観点からも、重要な社会資本であるトンネルの補修優先度を覆工背面の空洞の状態から判定することが必要となってくる。

一般に、既設トンネルの覆工背面空洞調査には電磁波などの物理探査手法が用いられることがあるが、覆工コンクリートが厚い場合や背面に崩落土砂が堆積している場合などでは、調査精度の低下が危惧されている。また、空洞注入を前提に空洞量の把握を目的とした調査は、覆工コンクリートをコアドリルで削孔し、計測棒を挿入して計測する方法としている¹⁾。しかし、1箇所あたりの削孔に時間を要し、規制日数が多くなることから工期や費用面で課題を残している。

このような背景から、覆工コンクリートを高速削孔しながら、覆工厚や覆工背面の状況を高速かつ高精度で調査できる「既設トンネル覆工背面空洞調査システム (PVM)」の開発を行った。PVMとは Percussive-drilled Void Measuring の略で、打撃と回転の併用による削孔と機械データから空洞を計測する方式を意

味する。

本報文では、本システムの概要、空洞検知の原理、基礎実験及び2件の調査工事の実績についてその結果を報告するとともに、今後のシステム運用について述べるものである。

2. システムの概要

今回開発したシステムでは、岩盤削孔に用いる掘削

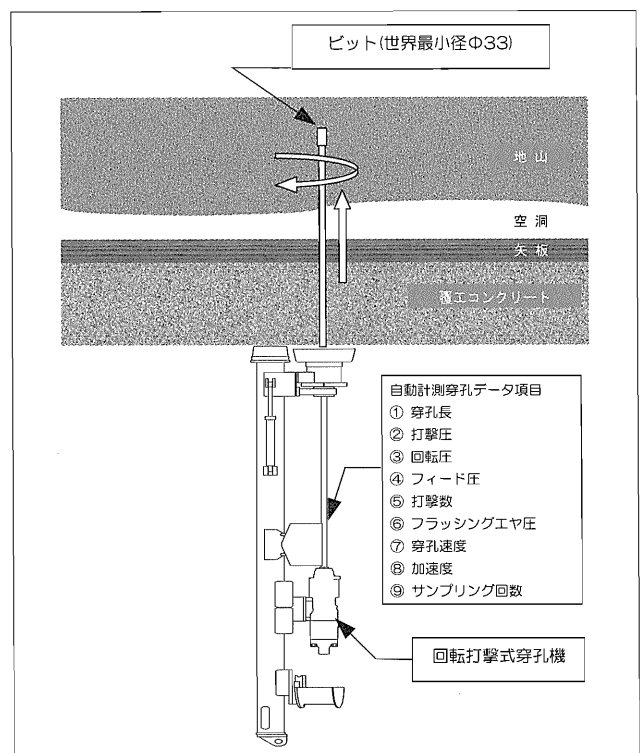


図-1 調査削孔手法

技術に着目し、先端に径 33 mm のビットを設けた「のみ」を回転と打撃を同時に加えて削孔するロータリーパーカッションドリルの技術を採用した(図-1)。

これにより、孔を高速で削孔する事ができる。しかし、打撃方式による削孔で覆工への影響も懸念されるため、本調査手法は可能な限り打撃圧を抑えること(2 MPa)と削孔径は極力小さく(φ33 mm)することで、覆工に与える影響を最小限としている。写真-1に削孔用の直径 33 mm のボタンビットを示す。

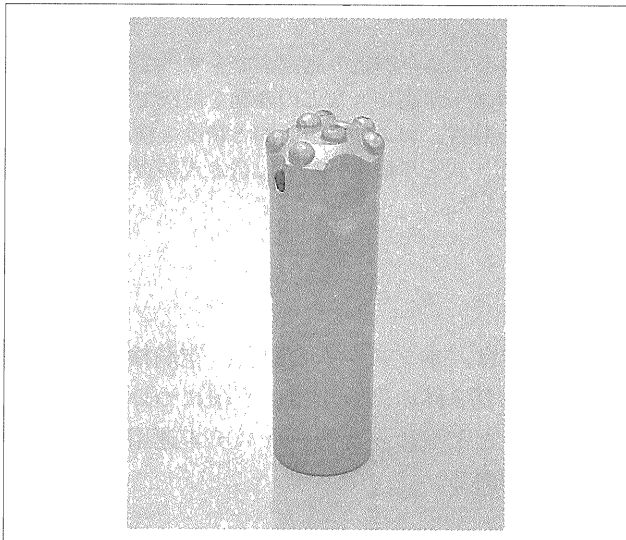


写真-1 直径 33 mm ボタンビット

本システムの調査手法は、削孔時の各種機械データを一定のルールに従って判読することで、覆工厚や覆工背面の空洞を精度よく判定するものである。システムの概要を図-2に示す。

本システムは、8トントラックに削孔装置、発電機、コンプレッサ、ダストコレクタ等を搭載したものであ

る。覆工コンクリートの削孔は、搭載した削孔装置(ブーム)により行うため、従来の高所での人による作業がないことから安全性が向上できる。

機械データは削孔速度、打撃圧、回転圧、フィード圧、打撃数、エアフラッシング圧等で、削孔中に 0.2 秒間隔で計測する。リアルタイムに計測された機械データは制御装置へ自動的に送信・図化され、覆工厚さや空洞厚さの判定を行うものである。

図-3にデータ計測のシステム図を示す。また、調査の結果、空洞が判明した場合、削孔した孔を注入用に拡張(直径 65 mm)する機能も兼ね備えている。

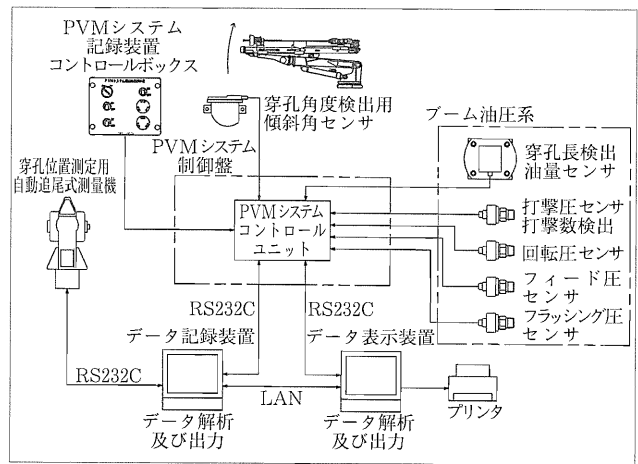


図-3 計測システム図

3. 基礎実験

(1) 供試体による実験

覆工コンクリートの背面空洞や矢板等を検知し、判別できるか否かを確認するために、基礎実験としてコ

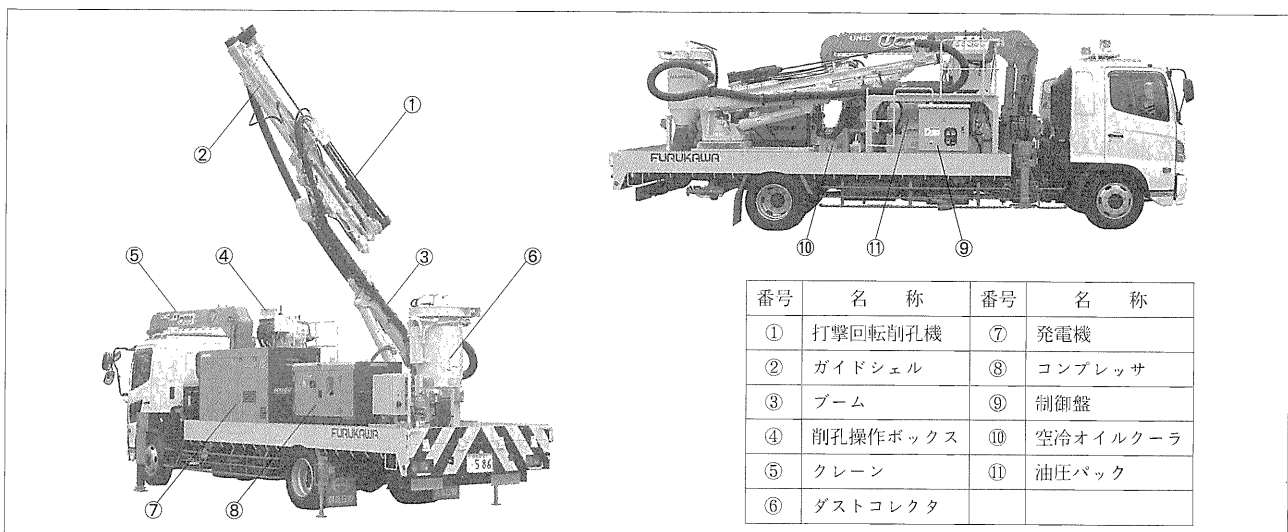


図-2 システムの概要

ンクリート、矢板、花崗岩の各材料と隙間を組合わせた供試体を作成し削孔実験を行った²⁾。各材料を削孔するときの削孔速度、回転圧などの機械データを記録・分析し、材料の違いによる削孔特性の変化および空洞通過時の特性の把握を試みた。

図-4は削孔速度に着目した計測データの一例である。削孔速度はコンクリート、矢板、岩の削孔時は値が小さく、空洞部では明確に大きい値を示している。また、削孔速度が急激に増加を始め、同時に回転圧が急減するポイントを空洞の始点、その逆(削孔速度が急減、回転圧が急増)のポイントを空洞の終点と判断する。

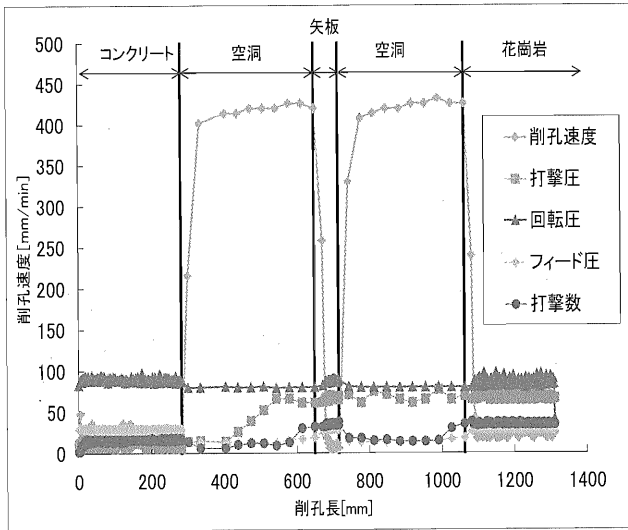


図-4 計測データの例(供試体)

表-1に実測値と判読値を示す。判読値は供試体の実寸法とよく一致していることから、空洞部は削孔速度を把握することで精度よく判読できることがわかった。

表-1 実測値と判読値の比較

材 料	材料の厚さ (mm)			コンクリート上面から各材料までの深さ (mm)		
	実測値	判読値	差	実測値	判読値	差
コンクリート	300	283	-17	—	—	—
空 洞	350	357	7	300	283	-17
矢 板	50	66	16	650	640	-10
空 洞	350	347	-3	700	706	6
花 崗 岩	—	—	—	1,050	1,053	3

(2) トンネルでの検証

供試体による基礎実験の結果を踏まえて、トンネル覆工を使い確認実験を実施した。計23箇所を調査削孔し、本システムによる覆工および背面の調査結果と孔内を検尺した実測値とを比較して調査精度の検証を行った。図-5はトンネルにおける調査削孔データの一例である。この例では背面に空洞はなく、覆工に地山が接している。削孔時の機械データのうち、削孔速度と回転圧の2項目が背面の物性の変化に敏感に反応していることがわかる。

このデータでは、覆工表面から800mmまでがコンクリート、以降1,600mmまでの削孔速度の増加と回転圧の急激な低下が発生する時の削孔長が地山と判読できる。この判読は孔内の検尺およびボアホールカメラによる目視確認の結果とよく一致していた。

これより、空洞部に限らず、背面の状況は削孔速度および回転圧の変化を把握することで精度よく判読できることが判明した。

(3) 機械データの傾向と特性

PVMシステムの目的は空洞の存在を正確に把握することが主たる目的である。しかし、覆工の背面には地山の他に、空洞や崩落して緩く堆積した土砂、木製

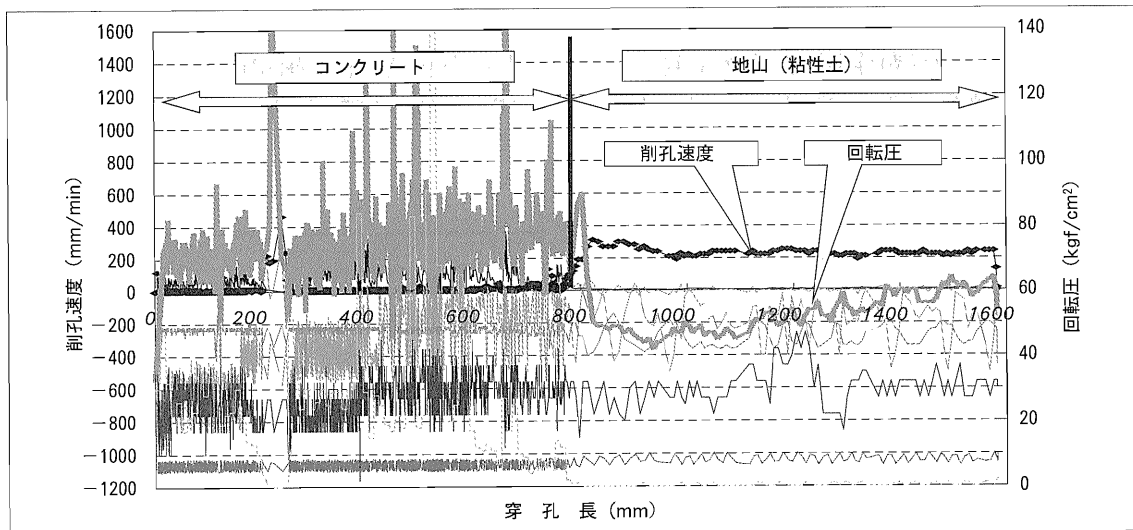


図-5 計測データの例(トンネル)

矢板、裏込め材などの存在が考えられる。

表-2に、供試体による基礎実験やトンネルでの検証結果から得られた調査対象物と機械データの傾向及び特性を示す。表-2に示すとおり、覆工コンクリート、空洞、緩い地山等の調査対象物は、機械データのうち削孔速度、回転圧およびエアフラッシング圧の3項目を分析することにより可能となった。

表-2 機械データの傾向と特性

調査対象	削孔速度	回転圧	エアフラッシング圧
覆工コンクリート	非常に小さい値で安定	一定幅で安定	一定値で安定
空洞	急激に上昇	急激に低下し、安定	変化なし
緩い地山	緩やかに上昇	緩やかに低下	変化なし
木製支保工	非常に小さい。覆工と同等	覆工より小さい値で安定	上昇
裏込め	覆工に比べやや増加し安定	木製支保工より小さい値で安定	上昇
地山(岩)	覆工と同傾向の計測データが得られるが、岩石強度により程度は異なる。		

4. 調査工事の実績

(1) 調査工事の概要

PVMシステムは、札幌自動車道の若竹トンネル(上下線:851m)と朝里トンネル(上下線1,535m)における調査工事(平成15年9月)、ならびに常磐自動車道の助川トンネル(上り1,811m)における調査工事(平成15年12月)の2件で採用した。

各トンネルにおいては、覆工背面への注入工事の基礎データの収集を目的として、全線にわたり10m間隔で天端と両肩部の空洞調査を実施した。空洞が認められた場合、将来的にこの空洞に対して充填注入が必要となり、直径65mmの注入孔を通常5m間隔で新たに設けている。そこで、本調査工事で空洞が認められた場合には、10m間隔で調査した直径33mmの孔を有効利用して、65mmにその場で直ちに拡張したのち注入管の取付けを行った。

(2) 調査専用機

調査専用機による調査状況を写真-2に示す。調査専用機は、削孔機本体、エアコンプレッサ、集塵機、発電機、運転操作盤等の機器をコンパクトに搭載して機動性、実用性を高めた。削孔機の先端には削孔中に発生するクリコや塵埃の拡散防止としてキャップを設け、集塵機で処理している。また、データ集積用と空洞分析用のパソコンを搭載し、1箇所の削孔ごとに空洞を精度良く判定できる。写真-3はパソコン画面の



写真-2 調査専用機による調査状況

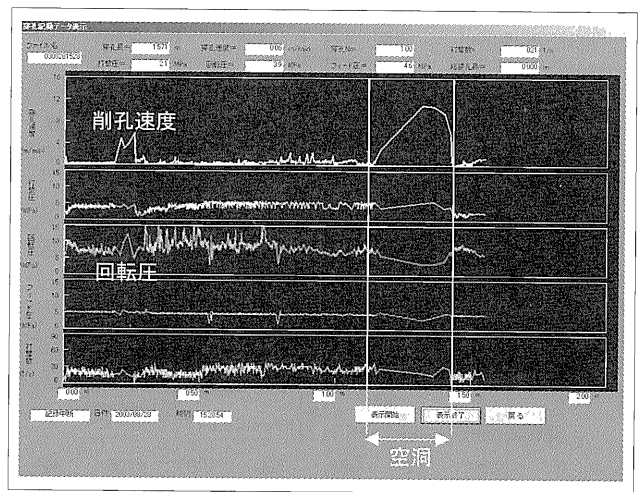


写真-3 パソコン画面の削孔データ表示例

表示例である。

(3) PVMの能力

1箇所当りの調査時間は、直径33mmによる調査削孔(空洞が無かった場合)が移動時間を合わせても平均で15分、空洞が有り削孔した孔を注入用に拡張(直径65mm)した場合が平均で23分であった。調査能力の比較を表-3に示す。調査能力は、コアドリルに対してPVMのほうが高い結果となった。

表-3 施工能力比較表

コアドリル(箇所/日(7h))	PVM(箇所/日(7h))
0.77h/m(2セット)	15分/箇所 ↓
9.1m/日(7h)	
16.5本/日(平均覆工厚さ:0.55m)	
17	28

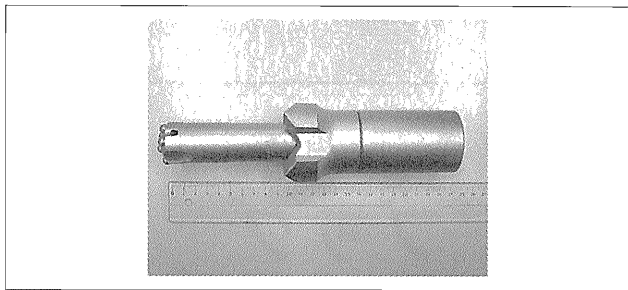
また、今回の2件の実績においては、覆工背面の空洞厚さおよび覆工の厚さの最大誤差が15mmという精度で判定できることを実証した。

5. SOM（自己組織化マップ）による判定法³⁾

PVMシステムでは、これまでに実施した基礎実験及び実工事の多種類の機械データを複合的に判読し、客観的かつ精度よく削孔対象を判定するための手法として人工知能の一種であるSOM（Self-organizing map）による分類・予測手法の適用性も同時に検討しており⁴⁾、今後、更にデータを蓄積することでSOMによる分類・予測手法の有効性が高まると思われる。

6. システムの運用について

PVMシステムでは空洞を調査することを目的とした技術であるが、覆工を削孔する手法であるため、その孔を将来の注入用に利用することも可能である。その場合、調査孔の直径33mmに対し、注入管用の直径65mmに拡張削孔を行うことになる。また、あら



写真一4 親子ビット

かじめ覆工背面の空洞が既知の場合、あるいは天端部の調査の結果、天端部に空洞が判明し、空洞の有無に係らず拡張することが決まっている場合には、写真一4に示す親子ビットを使用して一度に直径65mmを削孔することができる。

PVMシステムは様々な利用法に適応できる機能を有しているため、調査のみを行う場合や調査後直ちに注入用の拡張を行う場合などの運用方法がある（表一4）。

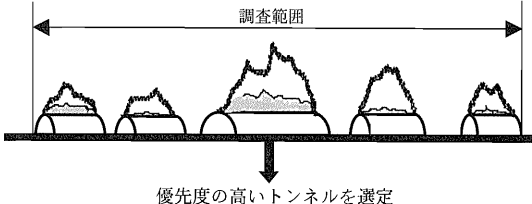
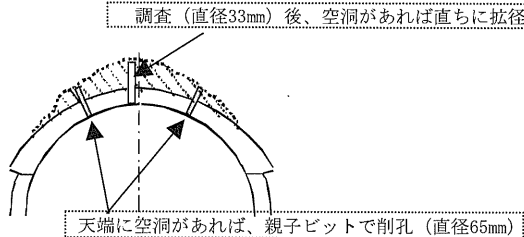
7. おわりに

これまで、コアドリルによる調査が一般的であったトンネル覆工背面の空洞調査に対して、今回開発したPVMシステムは、高速調査を実現するとともに、調査の機械化、省力化を図ることができたと考えられる。

本システムにより、空洞や地山を高精度で判読することがわかった。しかし、判定にはヒューマンエラーの可能性もあることから、今後はコンピュータによる自動判定システムの開発、あるいは5章で述べた人工知能による予測手法の開発に力をいれる所存である。また、本システムでは覆工コンクリートの劣化状況も検知できることから、将来は覆工全体の健全度評価への適用も視野に考えていきたい。

社会資本ストックを効率的に維持することやライフサイクルコストを延命することが急務である中、今回紹介したトンネル覆工背面空洞調査システムは、アセッ

表一4 PVMシステムの運用方法

<p>1 注入優先度の高いトンネルの選定等 (PVMを「調査専用機」として適用)</p>	<p>複数のトンネルで優先候補トンネルを選定あるいは1本のトンネルで優先箇所を選定 ○複数あるいは1本のトンネルの天端のみ調査 (直径33mm)</p> 
<p>2 特定のトンネル (空洞未知) を調査し注入 (PVMを「調査、削孔兼用機」として適用)</p>	<p>○天端のみ調査 (直径33mm) 後、空洞があれば直ちに拡張 (直径65mm) ○天端に空洞があれば、両肩部は親子ビットで削孔 (直径65mm)</p> 
<p>3 過去の空洞調査から空洞の存在が判明しており、注入を前提とする場合 (PVMを「削孔機」として適用)</p>	<p>○天端と両肩部を親子ビットで調査削孔 (直径65mm) ○天端の調査孔がφ33mmの場合は拡張 (直径65mm)</p>

トマネジメントの見地からも有効な調査技術として、社会的に貢献するところが大きいと考える。 **JICMA**

《参考文献》

- 1) 日本道路公団：矢板工法トンネルの背面空洞注入工：設計・施工指針，2002.10
- 2) 大嶋，西村，河野，阿部：既設トンネルの覆工背面空洞調査法（PVMシステム）の開発（その1），土木学会第58回年次学術講演会，2003.9
- 3) T.コホネン著，徳高・岸田・藤村訳：自己組織化マップ，シュプリンガー・フェアラーク東京，1996.
- 4) 城間，大嶋，本多，若林，安部：既設トンネルの覆工背面空洞調査法（PVMシステム）の開発（その2）—SOMによる判定法—，土木学会第58回年次学術講演会，2003.9



【筆者紹介】

大嶋 健二（おおしま けんじ）
中日本高速道路株式会社
横浜支社
富士工事事務所
富士東工事区



伊藤 哲男（いとう てつお）
西日本高速道路株式会社
中国支社
鳥取工事事務所
鳥取工事長



西村 晋一（にしむら しんいち）
清水建設株式会社
土木技術本部
技術開発部
課長

建設工事に伴う 騒音振動対策ハンドブック

「特定建設作業に伴って発生する騒音の規制に関する基準」（環境庁告示）が平成8年度に改正され，平成11年6月からは環境影響評価法が施工されている。環境騒音については，その評価手法に等価騒音レベルが採用されることになった等，騒音振動に関する法制度・基準が大幅に変更されている。さらに，建設機械の低騒音化・低振動化技術の進展も著しく，建設工事に伴う騒音振動等に関する周辺環境が大きく変わってきている。建設工事における環境の保全と，円滑な工事の施工が図られることを念頭に各界の専門家委員の方々により編纂し出版した。本書は環境問題に携わる建設技術者にとっては必携の書です。

■掲載内容：

- 総論（建設工事と公害，現行法令，調査・予測と対策の基本，現地調査）
- 各論（土木，コンクリート工，シールド・推進工，運搬工，塗装工，地盤処理工，岩石掘削工，鋼構造物工，仮設工，基礎工，構造物とりこわし工，定置機械（空気圧縮機，動発電機），土留工，トンネル工）
- 付録 低騒音型・低振動型建設機械の指定に関する規程，建設機械の騒音及び振動の測定値の測定方法，建設機械の騒音及び振動の測定値の測定方法の解説，環境騒音の表示・測定方法（JIS Z 8731），振動レベル測定方法（JIS Z 8735）

■体 裁：B5判，340頁，表紙上製

■定 価：会 員 5,880円（本体5,600円）送料 600円

非会員 6,300円（本体6,000円）送料 600円

・「会員」本協会の本部，支部全員及び官公庁，学校等公的機関

社団法人 日本建設機械化協会

〒105-0011 東京都港区芝公園 3-5-8（機械振興会館） Tel. 03(3433)1501 Fax. 03(3432)0289