

ロックボルトおよびグラウンドアンカー長さ計測技術の開発

A NEW SYSTEM FOR INSPECTING THE LENGTH OF GROUND ANCHORS AND ROCK BOLTS

藤原鉄朗*・松山公年*・金本康宏*

Tetsuro FUJIWARA, Kimitoshi MATSUYAMA and Yasuhiro KANEMOTO

For the successful engineering of excavations and other constructions, careful inspection of the length of any ground anchors or rock bolts used is critical. In Japan, these inspections are carried out using reports supplemented by check sheets and photographs made by contractors. This method is unreliable. We developed a new inspection system for quality control of ground anchors and rock bolts. This report explains the development and properties of the system.

Key Words : non destructive testing, inspection, quality control, rock bolt, ground anchor

1. はじめに

現在、アンカー長の出来形管理は、施工時の品質管理表の記入と写真撮影によって実施されている。しかし、度々アンカーやロックボルトが所定の長さに満たずに施工され、後日問題となるケースがある。

施工後および施工中にアンカー長を検査できる技術が開発できれば、品質管理の効率化と信頼性の向上が期待でき、アンカーの維持管理を行ううえでも有効な技術になるものと考えられた。

本論文は、上記のニーズを踏まえ、国土交通省中部地方整備局中部技術事務所の発注で実施した「工事検査に関する技術検討業務委託」のうち、アンカー長さ計測手法の開発について紹介するものである。

2. 開発のフローと初期検討

(1) 開発フロー

工事検査の対象として設定したアンカーのタイプは以下のとおりである。

- ① ロックボルト(切土法面ロックボルト、NATMロックボルト、落石防止網用ワイヤーロープアンカーなど鋼棒およびその加工品)
- ② グラウンドアンカー(地すべり対策などに利用されるアンカーで主にPC鋼より線の加工品)

開発は、図-1に示すとおり、机上検討、室内モデル試験、野外モデル試験、現場検証試験などを経て、計測装置の開発および使用マニュアルの作成を行った。

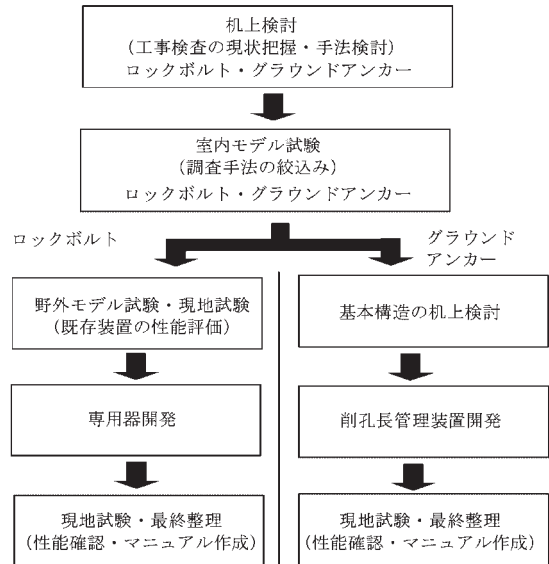


図-1 ロックボルト・アンカー長さ計測技術の開発フロー

* 社会環境エンジニアリング事業部 ライフサイクルマネジメント部

(2) 机上検討による計測技術の抽出

机上検討では表-1に示す手法について比較検討した。このうち、工事検査の現場で使用可能な簡易な調査手法として超音波法・衝撃弾性波法・電気パルス法の3つの手法についてモデル試験を行う提案をした。

表-1 ロックボルト・アンカー長さ計測の候補技術

調査手法		実現性	
アンカー施工後に検査する方法	弾性波を用いた調査法	超音波法	○
		衝撃弾性波法	○
	電気的調査法	電気パルス法	○
		接地抵抗法	×
	力学的的方法	リフトオフ試験	×
アンカー新設時に同時埋設する方法	同軸ケーブル法	×	
	光ファイバー法	×	
アンカーの脇にボーリングを行う方法	電磁波レーダー法	×	
	磁気探査法	×	
	孔内弾性波法	×	

(3) 室内モデル試験による計測技術の絞り込み

室内モデル試験は、超音波法、衝撃弾性波法、電気パルス法の3手法について、タイプの異なる30mのグラウンドアンカーを含む実物供試体を用いて実施した。上記3つの手法の概要を表-2に示す。これらの手法はいずれも信号をアンカー材に入射し、反射してくるまでの時間に伝搬速度を乗じることにより長さを計測する手法である。

表-2 ロックボルト・アンカー長さ計測手法の概要¹⁾

計測法	①波動の種類 ②波動の入射法 ③センサの種類	計測の原理および得られるデータ
超音波法	①超音波 ②圧電振動 ③超音波探触子	<p>試験例： アンカーNo. 11 ロックボルト 3.0m</p>
衝撃弾性波法	①低ひずみ ②ハンマー打撃 ③加速度計	<p>試験例： アンカーNo. 12 ロックボルト 5.0m</p>
電気パルス法	①電気パルス ②パルス発生器 ③パルス検出器	<p>試験例： アンカーNo. 36 グラウンドアンカー10.0m</p>

モデル試験を実施した結果、ロックボルトについては超音波法および衝撃弾性波法による施工後の長さ計測の可能性を確認した。

しかしながら、グラウンドアンカーについては、形状が複雑・多様であり、最低でも長さが7mあることから、超音波法や衝撃弾性波法ではエネルギーが減衰して反射信号を計測できないことが明らかになった。一方、電気パルス法は、反射信号の確認はできるものの、伝搬速度が埋設環境に大きく依存し、精度の高い計測ができないことが判明した。

このため、グラウンドアンカーについては施工後の計測を断念し、後述する「削孔長管理装置」により工事検査を合理化する方法に検討方向を転換した。

3. ロックボルト長さ計測専用器の開発

(1) ロックボルト長さ計測技術の概要

超音波法は、本来鋼材の厚みや傷の点検に使用される手法であり、衝撃弾性波法は、コンクリートの厚みや基礎の根入れ深さの調査に用いられる手法である。

両手法の装置とも、現場で計測可能なように小型化されており、予測される長さの範囲を入力すると、自動的に長さを表示する機能を有している。

しかし、双方の装置ともに本来別の用途に開発された装置であり、ロックボルト長さ計測への適用性は不明である。そこで、両手法の適用性の把握をするために野外モデル試験および現地試験を実施した。野外モデル試験では、径、長さ、先端形状の異なるロックボルト(異形棒鋼)に対して周辺グラウト・地中埋設を行い、図-2に示すタイミングで長さ計測を実施した。野外モデル試験におけるロックボルトの埋

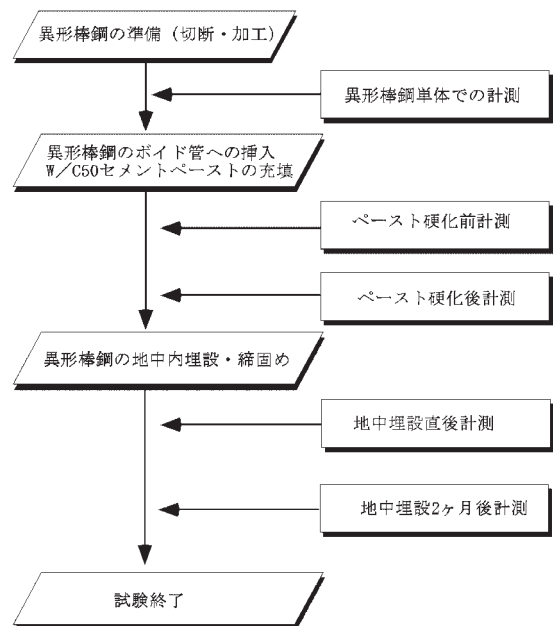


図-2 ロックボルト野外モデル試験実施フロー

設状況および使用した装置の仕様を図-3、表-3に示す。

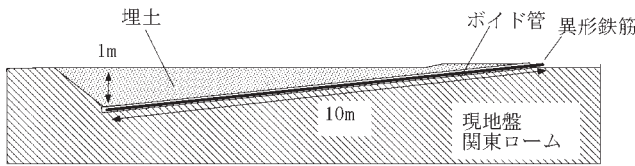


図-3 ロックボルトモデル試験概況(埋設断面)

表-3 ロックボルトモデル試験に用いた既往の装置

手法	装置名	仕様	
超音波法	EPOCH2300 (日本パナソニック)	超音波探傷器	測定範囲: 0.5~10m 受信周波数レンジ: 0.5~10MHz 仕様: フルデジタル仕様
		超音波探触子	形式: 垂直探触子 公称周波数: 5MHz 振動子径: 10mm
衝撃 弾性波法	装置名 Sonic Integrity Test (TNO)	衝撃反射法 計測装置	A/D変換: 12bit以上 サンプリング速度: 30kHz以上 1波形データ長: 1024以上
		加速度センサ	校正値: 100mV/g 最大計測加速度: 80g以上 応答周波数: 1kHz以上
		ハットハンマー	材質: スチール 重量: 30g

モデル試験では、超音波法における伝搬速度を5900m/sec、衝撃弾性波法における伝搬速度を5200m/secと仮定して実際長ささと計測長さの比較を行った。

それぞれの比較結果を図-4、5に示す。図-4に示すとおり、超音波法においては、いずれのタイミングで計測した場合においても、実際長ささと計測長さの関係は同一であり、伝搬速度は5900m/secと一定で埋設状況に依存せずにロックボルトの長さ計測ができた。

しかしながら、図-5に示す衝撃弾性波法については、埋設状態によってロックボルトの実際長ささと計測長さの関係が異なる結果を示した。これは、衝撃弾性波法においては、埋設状態によって弾性波の伝搬形態が異なることによるためであり、実際の長さを用いて弾性波伝搬速度を逆算する

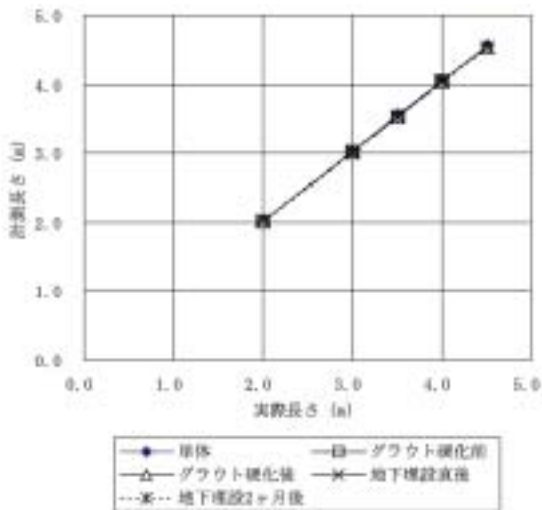


図-4 超音波法による野外モデル試験計測結果

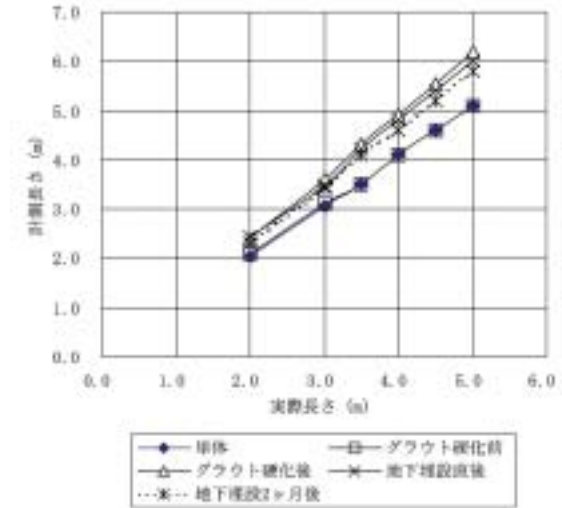


図-5 衝撃弾性波法による野外モデル試験計測結果

と、埋設状態によって伝搬速度は4200~5200m/secの間で変化していることが明らかになった。

超音波法は、垂直に切断されたD25のロックボルトに対して、長さ3.0mまでは高精度(誤差2%以下)で計測可能であり(図-6)、径がD29まで太くなると4.5mまで計測が可能になった。しかしながら、地山側先端を斜切あるいは山切(円錐状)に処理した場合、径D25・長さ3.0mでも計測ができないことが明らかになった(図-7)。

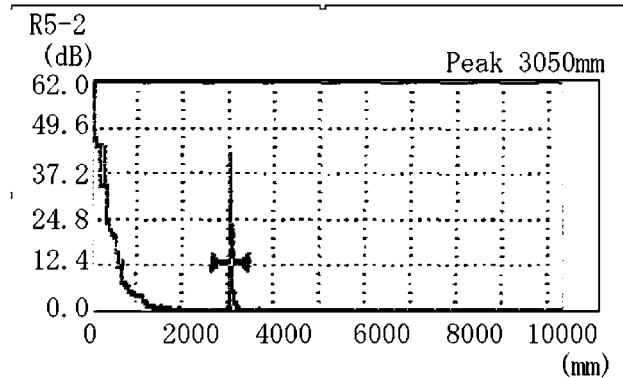


図-6 超音波法によるロックボルト長さ計測例(径D25/長さ3.0m/先端垂直)

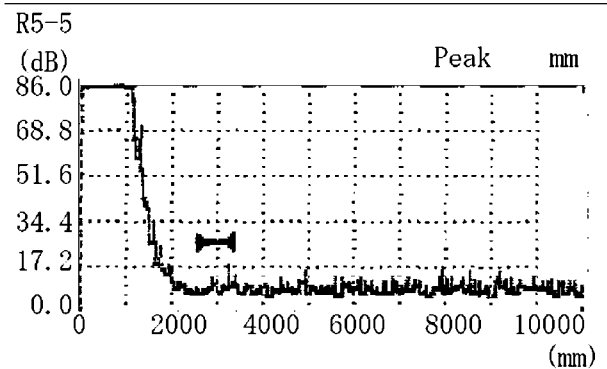


図-7 超音波法によるロックボルト長さ計測例(径D25/長さ3.0m/先端斜切)

次に、既往装置の現場での適用性を確認する目的で、表一4に示す現場においてロックボルトの長さ計測を実施した。

表一4 現地試験地およびロックボルトの形状

調査対象	施工場所	長さ (m)	径	末端
ワイヤーロープ アンカー 長さ1.0~1.5m	岐阜県 加古郡 御嵩町	1.0	D22	斜切
		1.5	D22	斜切
トンネル ロックボルト 長さ3.0m	三重県度会郡 南島町~紀勢町	3.0	D25	山切
切土法面 ロックボルト 長さ5.0~5.5m	三重県 北牟婁郡 海山町相賀	5.3	D29	垂直
		5.3	D22	垂直
		5.8	D22	垂直
切土法面 ロックボルト 長さ3.0m	静岡県 裾野市桃園	3.2	D29	垂直

各現地試験の結果、超音波法については、野外モデル試験結果を裏付ける結果が得られた。

一方、衝撃弾性波法については、野外モデル試験と現地試験とで異なる結果を得た。図一8は野外モデル試験において埋設された状態のロックボルト、図一9は実際のトンネルで施工された後のロックボルトの計測結果である。

図一8では、実際の長さよりも長く計測結果が表示されているものの、地山側先端からの反射が明瞭に確認できる。しかしながら、図一9に示す施工後のNATMロックボルトでは、波形が一定せず、地山側先端からの反射は確認できない。これは、現場ではロックボルトの周辺が固い岩盤で拘束されているため、弾性波が地山全体に拡散するためと考えられた。

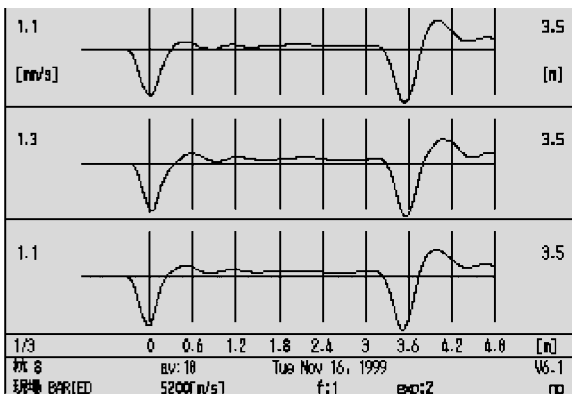
野外モデル試験および現地試験の結果、明らかになった事項を以下に整理する。

- ① 超音波法は、垂直に切断された切土法面ロックボルトに対して長さ3.0mまでは高精度(誤差2%程度)で長さ計測が可能である。
- ② 超音波法は、地山側先端形状によって計測できない場合がある。とくに斜めに切断されている場合は、長さ3.0mでも計測ができない。
- ③ 衝撃弾性波法は、埋設状態によって計測結果が変化するほか、地山が岩盤の場合はロックボルト長さを計測できない。

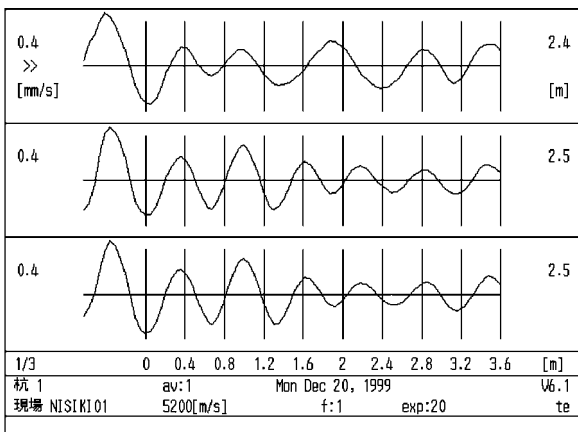
(2) ロックボルト長さ計測専用器の開発

上記の検討の結果、衝撃弾性波法の現場適用は困難であり、超音波法は計測精度が高いものの、既往の超音波装置によるロックボルト計測限界長さは3.0m程度であることが確認された。

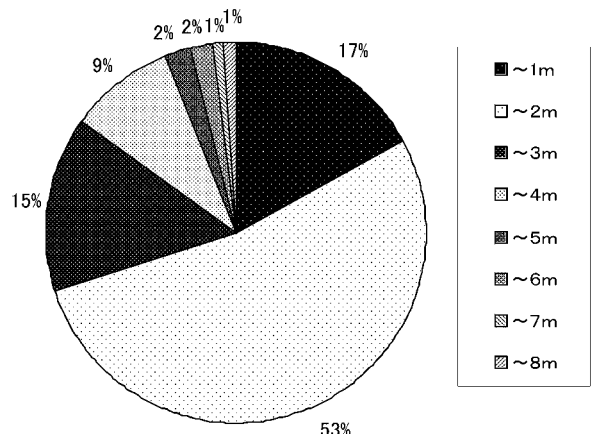
しかしながら、切土法面などで用いられるロックボルトにはさらに長いものがあり(図一10)、既往の装置では十分でない。



図一8 衝撃弾性波法のロックボルト波形例 (野外モデル試験・地中埋設後・長さ3.0m)



図一9 衝撃弾性法によるロックボルト波形例 (現地試験・NATMロックボルト・長さ3.0m)



図一10 切土のり面のロックボルト長さ²⁾

超音波装置は、鋼材の厚さや傷をmm単位の精度で計測する目的で開発されている。しかしながら、ロックボルトの長さ計測ではmm単位の精度は要求されない。

そこで、多少精度を犠牲にし、長距離計測を可能にするロックボルト計測専用器の開発に取り組んだ。専用器は既往の超音波装置に対して以下の改良を行うことにより製作した。

- ① スタッキングによる波形の平均化
 - ② プリアンプの付加
 - ③ 受信器の狭帯域化、および探触子直径の拡大
- 開発した装置の仕様および外観を表-5、写真-1に示す。

表-5 ロックボルト長さ計測専用器の仕様

探傷器本体	フルデジタル探傷器	
	CPU	Intel MMX Pentium
	ディスプレイ	6.4TFTカラー液晶
	電源	DC12V/ACアダプタ ニッケル水銀電池スロット(4時間対応)・充電器
	外形寸法	175×270×100mm マグネシウム合金
	重量	約2.9kg
	付属機能	平均化処理 (n=2~10,000回) 周波数分析機能・印刷機能・RS232C通信機能
プリアンプ	増幅率	14~20 dB
	形状	100×100×35mm
狭帯域探触子	周波数	5MHz
	振動子材質	ジルコン・チタン酸鉛系セラミックス
探触子ケーブル	直径	14mm
	形式	垂直
	形式	LEMO1-LEMO0025
	ケーブル長	2m



写真-1 ロックボルト長さ計測専用器

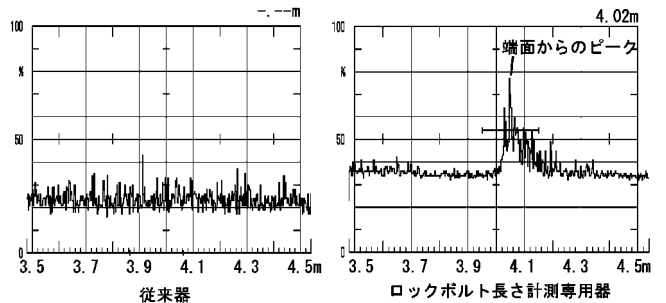
(3) 専用器の性能確認とマニュアル作成

試作した専用器について表-6に示す供試体で性能試験を実施した。モデル試験の結果、専用器は従来器に対して約13dBのSN比向上を実現しており、計測限界が向上されるとともに、操作性および携帯性についても改善されていることを確認した。

表-6 専用器の性能確認に用いた供試体

No.	材料	直径	ロックボルト長さ(m)	地山側端面形状	モルタル充填
1	ネジ節異形棒鋼	D25	6	垂直	無
2	ネジ節異形棒鋼	D25	6	垂直	有
3	ネジ節異形棒鋼	D25	5	円錐	無
4	ネジ節異形棒鋼	D25	5	円錐	有
5	ネジ節異形棒鋼	D25	4	斜め	無
6	ネジ節異形棒鋼	D25	4	斜め	有

例として、地山側先端形状が斜切で長さ4.0mのロックボルト(D25)について、従来器と専用器の計測結果の比較を図-11に示す。図-11に示すとおり、専用器の計測結果では、改良によってノイズが減少し、地山側先端からの反射を識別できるようになっている。また、計測精度についても誤差2%以下を維持している。



(地山側先端斜切 ロックボルト 長さ:4.0m)

図-11 従来器と専用器の計測結果比較

次に、表-7に示すトンネル現場で専用器の性能確認を行った。

表-7 専用器性能確認試験実施現場

計測対象	工事名	施工場所	ロックボルト長	地山側先端
トンネル ロックボルト	東海環状 瀬田トンネル	可児市柿田 ~可児市久々利	3.0m 4.0m	山切 (円錐状)

トンネルロックボルトの調査実施状況を写真-2に示す。超音波法によるロックボルト長さ計測においては、ロックボルト端面をあらかじめヤスリなどで研磨する必要があるが、計測自体は探触子を押し当てるだけで可能であり、1本のロックボルト長さ計測は数分で終了する。現地適用試験の結果、ロックボルト長さ計測専用器は、これまで計測が難しかった長さ4.0mのNATMロックボルトについても高い確率で計測が可能であることを確認した。供試体試験および現地試験により確認した従来器とロックボルト長さ計測専用器の性能の相違を表-8に整理する。

なお、本技術開発では、上記の現地試験結果を踏まえ、専用器を用いたロックボルト長さ計測マニュアルについても作成を行っている。



写真-2 専用器性能確認試験実施状況



写真-3 グラウンドアンカー施工管理の現状

表-8 従来器と専用器の性能比較

ロックボルト長さ計測への適用性				従来器	専用器
計測 限界	計測条件	端面形状	長さ		
	切土法面 径D25	端面垂直	5m	×	○
	NATMトンネル 径D25 (通常グラウトタイプ)	端面円錐	4m	×	○
	NATMトンネル 径D25 (カプセルグラウトタイプ)	端面斜め	4m	×	○
操作性				△	○
携帯性				△	○

×：計測不能

△：計測可能であるがピーク不明瞭、現場適用性が低い

○：明瞭に計測可能、現場適用性が高い

4. グラウンドアンカー等削孔長管理装置の開発

(1) 開発の背景

グラウンドアンカーの施工では、孔壁が自立しないため削孔後すぐにアンカーを挿入し、孔をグラウトで閉塞せざるえない。このため、削孔深さの多くは請負者が写真を撮影し、これを監督職員に提出する方法で出来形管理が行われている。

この際の典型的な管理写真を写真-3に示す。写真-3に示すように、削孔長は、検尺ロッドで計測しているものの検尺ロッドの計測値(目盛)は、写真では判読できず、実質的な検尺になっていないという問題点がある。

一方、前述の検討結果では、グラウンドアンカーについては、品質管理に求められる精度で、施工後に検査を行う手法がないことが明らかになった。

そこで、管理写真の撮影方法を改良することにより、上記の問題点を解決することを考え、削孔長管理装置の開発を行った。

(2) 削孔長管理装置の原理

開発目標とした削孔長管理装置の基本構造は、写真により視認可能な大きな表示部を有するデジタルメジャーである。ただし、装置はアンカーの施工現場での使用に耐え得る堅牢な構造を有している必要がある。

まず、削孔長管理装置の構造としては、ロータリーエンコーダ方式とトランスポンダ(RF-ID)方式の2つの方式について比較検討を行った。この結果、表-9に示すとおりトランスポンダ(RF-ID)方式の方が適用性に優れているものと判断して、これを採用するものとした。RF-ID技術とは、非接触自動認識技術の1つであり、情報の記録が可能な微小な電子デバイス(トランスポンダ)に対して非接触で個別情報の書き込み・読み込みを行う技術である(図-12)。トランスポンダは針先ほどの大きさで、電源を持たず、堅牢な構造を有している。

表-9 削孔長管理装置案の比較

装置名	トランスポンダ (RF-ID) 挿入ロッド	ロータリー エンコーダ型 メジャー
計測原理	長さを記録したトランスポンダをロッドに装着し、表示器でこれを読み取ることで長さを表示させる	ワイヤーの送り出した長さをロータリーエンコーダで記録する
最小目盛	○	○
計測誤差	○	○
操作性	○	×
設計費	○	△
装置価格	○	△
総合評価	◎	△



図-12 RF-ID 技術の原理

RF-ID技術を用いた削孔長管理装置の原理を図-13に示す。装置はボーリングケーシングに挿入するロッドと本体に分けられる。ロッドには、50cm間隔でトランスポンダを埋めこむ。埋めこんだトランスポンダには、埋めこまれた位置の情報を書きこんでおく。これによりロッドにはデジタルで目盛が刻印されたことになる。本体は、内部にアンテナとリーダーを持っており、大型のLEDを用いた表示部を有している。本体をロッドの特定の位置に近づけることにより、アンテナからの信号でトランスポンダが励起し、ロッドの位置情報を本体に返す。本体は、この情報を読み取り、ロッドの位置をLEDに表示する。グラウンドアンカー施工現場では、ロッドに泥や水が付着するが、RF-IDはこれらの影響を受けずに安定して位置情報を表示することが可能である。

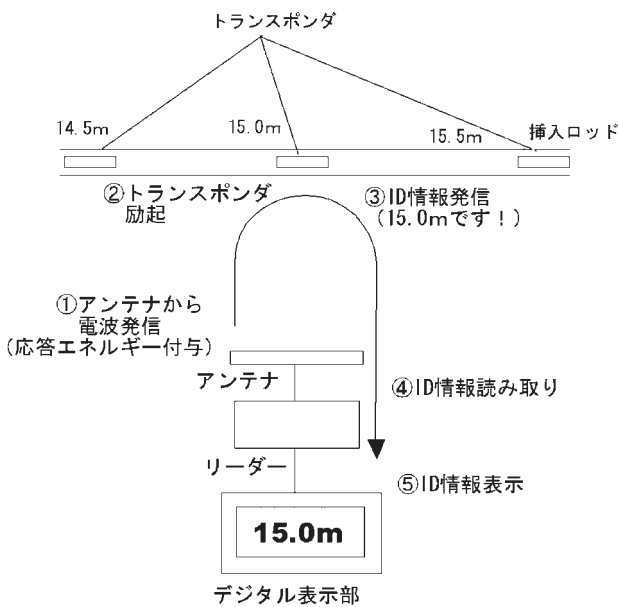


図-13 トランスポンダ方式削孔長管理装置の原理

(3) 削孔長管理装置の製作

削孔長管理装置の製作においては、ボーリングケーシングに挿入するロッドの材質の選定が最も困難であった。ロッドは、ケーシングに挿入しても直線性を確保するために

十分な耐曲性を有した材質である必要がある。しかし、一方で携帯性・収納性も考慮する必要がある。検討の結果、ロッドの材質には外径13mmの硬質テフロンチューブを選定した。

削孔長管理装置は充電式であり、5時間の連続使用に耐える。また、スイッチ類については、メイン電源があるのみであり、現場での煩雑な処理は不要である。また、携帯ボックスに収めれば、1人で現場に携行することが可能である。

削孔長管理装置の仕様および外観を表-10、写真-4に示す。

表-10 削孔長管理装置の仕様

計測器部品	項目	仕様	
削孔長管理装置本体(2号器)	リーダー表示器寸法	300×230×86mm(取手付き),1.8kg	
	リーダー表示器筐体	防水仕様 ABS(スチレン系樹脂)製	
	基盤型リーダー	形式	RI-STU-MRD1
		動作温度	-25~70°C
		周波数	134.2kHz
標準読取時間	100ms,120ms		
LED表示	4セグメント(30×52mm)XXmXXcm表示		
外付けバッテリー	外形	80×160×56mm,1.1kg	
	性能	DC6V 計測可能時間5時間充電時間20時間	
トランスポンダIDタグ	型名	RI-TRP-WRHP	
	形式	23mmガラス封入型	
	機能	リード/ライト	
	寸法	長さ23.1±0.5×直径3.85±0.05mm	
	重量	0.6g	
	動作温度	-25~70°C	
	最大読取距離	60cm	
	標準読込時間	309ms	
	メモリ容量	CRC付き64ビット	
	周波数	134.2kHz	
透過性	非金属以外透過		
挿入ロッド	概要	長さ30.0m 重量5.0kg	
	ケーシングチューブ	材質	テフロン
		長さ	30m(10m×3)
	IDタグ2次ホルダ	径	外径13mm 内径10mm
		長さ	30mm
	調整棒	径	外径9mm 内径5mm
		長さ	470mm
	径	外径9mm	



写真-4 削孔長管理装置の外観

(4) 削孔長管理装置の現場適用試験

開発した削孔長管理装置について、砂防関連のグラウンドアンカー施工現場において現場検証試験を実施した。削孔長管理装置の現場検証試験状況を写真-5に示す。



写真-5 削孔長管理装置の使用状況

開発した削孔長管理装置により、これまで現場写真では確認できていなかった削孔長さと現場状況が同時に撮影できることを確認した。しかしながら、削孔長さ20mまでであれば本装置で削孔長の計測が可能であるが、さらに深度が深い場合、ロッドがケーシング内で直線を確認できない(ケーシング内で螺旋状に変形する)ことも明らかになった。このことから、本装置のロッドの耐曲性については改良の余地があると考えられる。なお、開発した削孔長管理装置については、現場適用試験の結果を踏まえ、使用マニュアルを作成した。

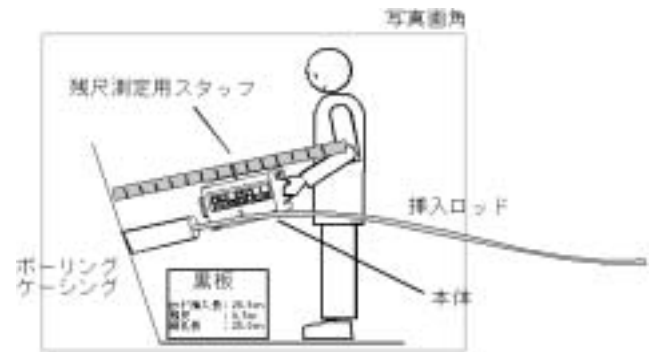


図-14 マニュアルに記載した削孔長管理装置の使用イメージ

また、本削孔長管理装置は、デジタルメジャーとして簡便で堅牢な構造を有し施工現場でのその他の計測にも有効であり、かつオリジナリティが高いと判断されたことから発注者とともに特許出願(特願2003-36188)を行っている。

5. おわりに

本論文では、受注業務で実施したロックボルトおよびグラウンドアンカー長さ計測技術の開発経緯およびその成果について報告した。開発した技術は、工事検査における品質向上に寄与するものであるが、いまだ完全ではない。

今後、設計・施工が仕様規定から性能規定に転換するうえで、これらの工事検査技術の重要性・ニーズはさらに大きくなることが予測される。しかしながら、性能規定・性能照査に耐え得る検査技術はいまだ確立されておらず、さらなる技術向上が必要と考える。

参考文献

- 1) 寺川陽、服部利周、近藤春彦：アンカー等の長さ計測手法の開発、第23回道路会議要旨集、No.3017 pp.34-35,1999
- 2) 日本道路公団 切土補強土工法設計・施工指針