

既設土留めの健全度診断

篠田 昌弘* 中島 進* 阿部 慶太*

真井 哲生* 江原 季映*

Stability Inspection of Existing Retaining Walls

Masahiro SHINODA Susumu NAKAJIMA Keita ABE

Tetsuo MAI Toshiaki EHARA

A conventional inspection method to evaluate stability of railway retaining walls is visual inspection. This is because there is no quantitative inspection method proposed. Therefore, to develop the inspection method to evaluate its stability, a percussion test which is commonly applied to bridge substructures to check its stability, was applied to the leaning retaining walls. Then, to clarify the relationships between the stability and frequency characteristics, model test was conducted. Consequently, we herewith presented a newly developed stability inspection and evaluation methods, and successfully verified to be applicable to existing leaning retaining walls.

キーワード：土留め，健全度診断，小型起振器，スペクトル面積

1. はじめに

鉄道土木構造物の維持管理において、構造物に変状が生じる場合、初期段階でわずかな変状を検知することが重要となり、さらに、検知できた場合には、継続的な監視や、その変状が進行しないように事前に対策を講じることが非常に重要となる。鉄道土木構造物のうち、石積壁やもたれ壁といった土留めの維持管理では、定量的な健全度診断法が確立してないことから、現状では目視によって構造物の変状を確認した後に、大がかりな対策を講じているのが実情である。

既設土留めの変状は、安定に係わる変状と劣化に係わる変状に大きく分類できる。土留めの劣化に係わる変状の検知手法は、打音法、赤外線法、電磁波レーダーなどがあり、実務で適用されているものの、健全度診断は技術者の技量に依るところが大きい。また、鉄道土留めの安定に係わる変状の検知手法は確立しておらず、実務的な健全度診断手法の開発が望まれている。

そこで、本研究では、土留めの健全度と相関性のある検査指標の抽出のため、既設土留めに対して現地試験を実施した。既設土留めに対する現地試験の結果から土留めの振動特性が検査指標として有効である結果が得られたことから、土留めの振動特性を把握するための小型起振器の開発を実施した。次に、開発した小型起振器を用いた土留め模型の振動試験を実施し、土留めの健全度と

振動特性に相関性があることを明らかにした後、健全度評価法を開発した。開発した健全度評価法を用いて既設土留めに適用し、提案手法の妥当性を確認した。

2. 既設土留めの実態把握

2.1 既設土留めの実態調査

既設土留めの現状を把握する目的で、構造物管理支援システムの検索機能を活用して、実態調査を行った。構造物管理支援システムとは、鉄道事業者が土木構造物の維持管理を効率的に実施するため、各構造物の諸元および調査記録の内容をデータベース化し、全般検査における調査記録や変状データを蓄積管理していくシステムであり、全国14の鉄道事業者と公益財団法人鉄道総合技術研究所が共同で開発したものである¹⁾。

実態調査に用いたデータは、鉄道事業者17社から提供していただいた土留めのデータであり、総数12,642箇所である。これらのデータは、構造形式が不明なもの、およびのり面工や特殊形式（柵板形式、ボックス等）が含まれていることから、代表的な土留めの構造形式のみを抽出した結果、7,989箇所を有効なデータとした。図1に抽出したデータを用いて、構造形式ごとの箇所数で整理した結果を示す。最も多い構造形式が石積壁・ブロック積壁であり、次いでもたれ壁の順になっている。石積壁・ブロック積壁は全体の76.4%あり、土留めの維持管理においては、石積壁・ブロック積壁が大半を占めていることが分かる。なお、この箇所の定義は鉄道事業者でまち

* 構造物技術研究部 基礎・土構造研究室

特集：構造物技術

まちであり、また延長距離とは対応していない。

ここで、上記の有効な7,989箇所のデータから、各構造形式における延長距離についての検討を行うため、延長距離の明らかなデータを抽出した結果、1,657箇所のデータが得られた。図2に各構造形式の延長距離とその割合を示す。最も延長距離が長い構造形式はもたれ壁であり、次いで石積壁・ブロック積壁となった。片持ち式擁壁、重力式擁壁、U型擁壁などは、比較的、延長距離が短いことが分かった。延長距離の割合から、もたれ壁と石積壁・ブロック積壁の割合が全体の76.1%を占めており、これら構造物の維持管理が重要であることが分かる。以上の結果から、本研究では、図1と図2で示した全体に対する割合の多いもたれ壁と石積壁・ブロック積壁を対象とする。

2.2 鉄道土留めの変状

前述したように、鉄道土留めの主な変状としては、安定に係わる変状と劣化に係わる変状に分類できる。図3に示すように、外的作用による土留めの沈下、傾斜、はらみ出し、圧ぎ等によって生じる食い違い、打ち継ぎ目ずれは、安定に係わる変状に分類でき、経年劣化による排水孔の機能低下やコンクリートのひび割れ・浮き等は劣化に係わる変状に分類できる。外的作用には、列車通過に伴う繰返し荷重、盛土の嵩上げによる土圧の増加、降雨による水位上昇に伴う土留め背面の作用力の増加、地震力による動的土圧の増加が主な作用と考えられる。経年劣化は、長年にわたる温度条件や湿度条件等の自然条件の変化によるものと考えられる。上記の外的作用により、土留めの沈下、傾斜、はらみ出し、圧ぎ等が生じる場合には、目視では確認できない土留め背面土の緩みや基礎の支持降伏が生じる可能性があり、早期検知や事前対策が重要となる。さらに、生じている変状が構造物

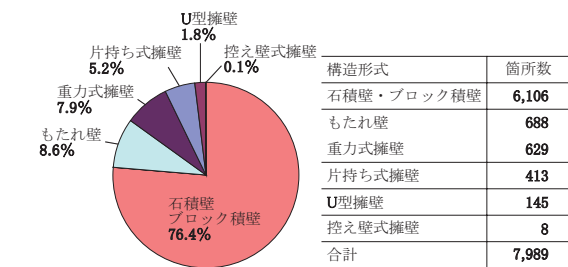


図1 構造形式の箇所数の割合

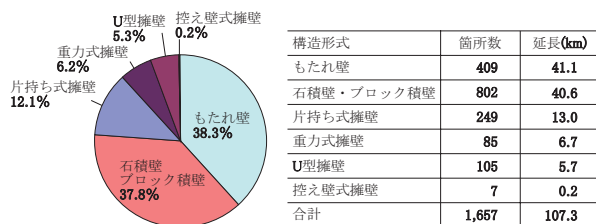


図2 構造形式の延長距離の割合

の安定性に与える影響を定量化することも重要となる。しかしながら、背面土の緩みや基礎地盤の降伏等の変状を非破壊で迅速に検知できる手法は提案されていない。

そこで、本研究では、土留めの様々な変状の内、外的作用による安定に係わる変状に着目し、安定に係わる変状を定量的に把握する健全度診断手法を開発することを目的とする。

3. 既設土留めの振動特性の把握

土留めの安定性に関する健全度診断法を開発するためには、健全もしくは不健全の既設土留めの特性を把握する必要がある。ここでは、土留めの振動特性に着目し、既設土留めに対して後述する衝撃振動試験(図4)を実施し、土留めの健全度と振動特性の関連性を調査した。

3.1 既設もたれ壁の振動特性の把握

図5に示すもたれ壁は、昭和38年に施工された直接基礎で支持されたもたれ壁である。周辺環境としては、山と川に挟まれており、集水地形となっている。このもたれ壁は、図5に示すように、打ち継ぎ目ずれやクラック等が生じていた。この変状は降雨時に盛土背面の水位が増加して生じたものと推定される。当該箇所の健全と不健全なもたれ壁に対して衝撃振動試験を実施した結果を図

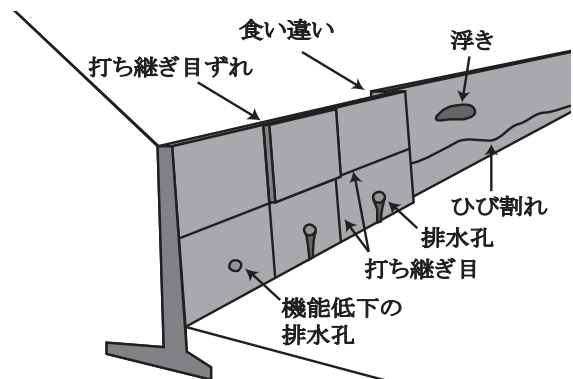


図3 土留めの代表的な変状

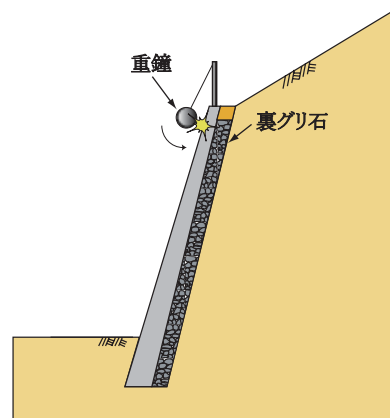


図4 重錘打撃による衝撃振動試験

6と図7に示す。健全なもたれ壁のフーリエ振幅スペクトルは、背面地盤の高い減衰の影響で極値が明確でないことが分かる。一方、不健全なもたれ壁は、極値が明確であり背面地盤の減衰による影響が小さいことが考えられる。これは、変状によりもたれ壁と背面地盤に隙間が生じ、背面地盤の減衰による影響が小さくなったためと考えられる。

3.2 既設石積壁の振動特性の把握

図8に示す石積壁は高さ4m程の空積みの石積壁であり、建設年次は不明である。周辺環境としては、斜面上に構築されており、前面が河川となっているため、集水地形となっている。当該箇所は、多数の目地切れが発生しており、はらみ出しも生じていた。この石積壁に対して衝撃振動試験を実施した。図9と図10に、比較のため健全な石積壁の代表的なフーリエ振幅スペクトルと当該箇所の不健全な石積壁のフーリエ振幅スペクトルを示す。もたれ壁の衝撃振動試験結果と同様に、健全な石積壁は極値が明確でなく、当該箇所の石積壁は、背面地盤の減衰による影響が小さく、極値が明確になっているこ

とが分かる。以上の試験結果から、健全な土留めは揺れにくく、不健全な土留めは揺れやすいことが分かる。このことから、既設土留めの健全度診断には、土留めの揺れやすさを指標とすればよいことが分かる。

3.3 衝撃振動試験の課題

既設もたれ壁と既設石積壁に対して実施した衝撃振動試験結果と、従来実施してきた河川橋梁下部構造物の振動特性を比較すると、土留めの振動特性には、背面土の存在により減衰の影響が顕著であることと、高い振動数領域でも応答することが特徴として挙げられる。また、衝撃振動試験を既設土留めに対して適用した結果、以下の課題が判明した。

- ①30kg程度の重い重錘を設置するのが困難。
- ②重錘の設置に関してノウハウが必要。
- ③背面土の高い減衰のため、高振動数の入力が困難。
- ④現場条件により衝撃荷重が異なる。

上記のことから、起振力、可搬性、再現性、入力振動数を考慮した既設土留めの健全度診断法の開発が必要であることが分かった。



図5 変状が生じたもたれ壁



図8 変状が生じた石積壁

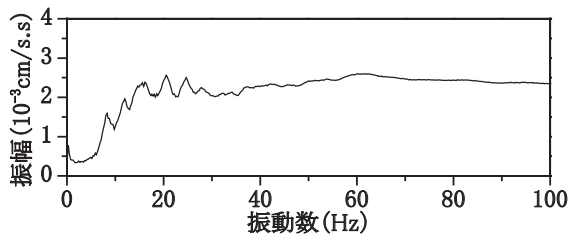


図6 健全なもたれ壁のフーリエ振幅スペクトル

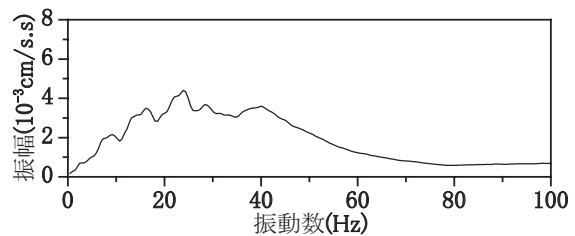


図9 健全な石積壁のフーリエ振幅スペクトル

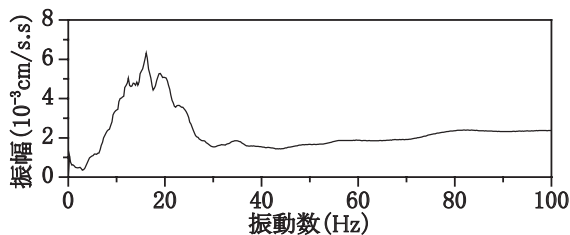


図7 不健全なもたれ壁のフーリエ振幅スペクトル

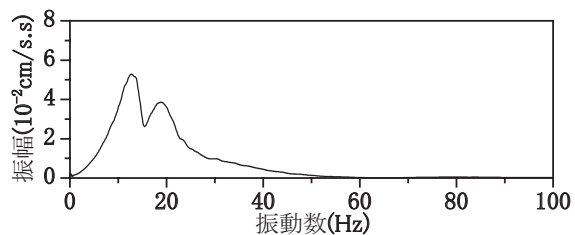


図10 不健全な石積壁のフーリエ振幅スペクトル

特集：構造物技術

4. 小型起振器の開発

既設土留めに対する衝撃振動試験の課題を改善するために、小型起振器を開発した。起振器には、磁気回路に永久磁石方式、電磁石方式、機械方式があり、それぞれに長所と短所が存在する。永久磁石方式では、高い起振力と高い振動数の入力に困難であるが、軽量で可搬性が高く、現場計測に適していることから、本検討では、永久磁石方式の小型起振器に着目し開発を実施した²⁾。

本研究で開発した小型起振器は、永久磁石のうちでは最も強力とされるネオジウム磁石を用いた永久磁石方式の起振器である。図11にネオジウム磁石を用いた小型起振器の構造を示す。この起振器は、永久磁石で発生した静磁界内で駆動コイルに電流を流すことで力を発生させている。

表1に小型起振器の性能を示す。この小型起振器は、総重量が147 Nと衝撃振動試験で用いる重錘と比較すると約1/2の重さであり、現場での可搬性に優れている。小型でありながら、最大加速度や周波数範囲も十分な性能を有している。電源はAC100Vであり可搬型の発電機を使用できる。

5. 土留め模型の振動試験

前述した既設もたれ壁と石積壁に対する衝撃振動試験結果から、もたれ壁と石積壁の健全度は、振動特性により評価できる可能性が高いことが分かった。そこで、も

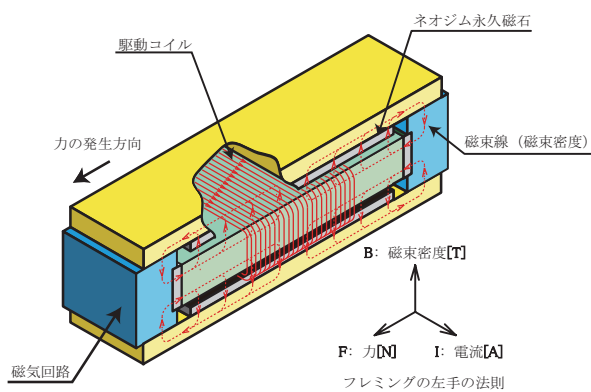


図11 開発した小型起振器の構造

表1 小型起振器の性能

最大加振力 (N)	98
最大変位 (mm)	80
最大速度 (cm/s)	74.8
最大加速度 (m/s ²)	14
周波数範囲 (Hz)	3-200 (最大加速度時)
電源	AC100V
総重量 (N)	147
寸法 (mm)	
長さ	358
幅	336
高さ	194

たれ壁と石積壁の健全度と振動特性の相関性を詳細に調べるために、土留め模型に対して、開発した小型起振器を使って振動試験を実施した。

5.1 実験条件

本実験で用いた載荷装置を図12に示す。この載荷装置は、反力フレーム、せん断土槽、油圧ジャッキから構成されている。せん断土槽には3つの水平方向の油圧ジャッキが設置されており、せん断土槽内の土をせん断変形させることができる。

図13に載荷パターンを示す。ここで、せん断土槽の水平変位とは、図12中の中段ジャッキの水平変位量を指す。載荷ステップはせん断土槽を制御するためのステップである。載荷パターンとしては、所定の水平変位までせん断土槽による載荷を行った後、小型起振器試験により振動特性の把握を行う。次に、せん断土槽の水平変位を初期状態（ゼロ）に戻し、再度、小型起振器試験により振動特性の把握を行う。これを所定の水平変位まで繰り返すことで、もたれ壁と、石積壁を模擬したブロック積壁模型の健全度の低下に伴う振動特性の変化に着目した。

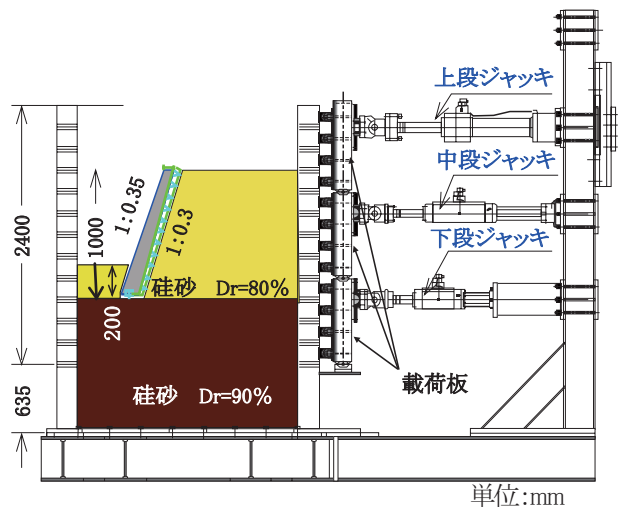


図12 載荷装置

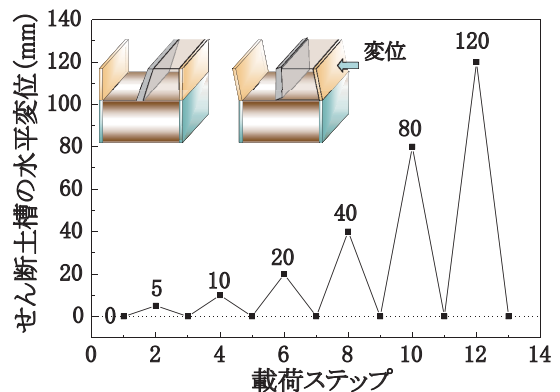


図13 載荷パターン

模型実験に用いたもたれ壁は実物の約1/5を想定し、壁高1.0m、前面勾配と背面勾配はそれぞれ、1:0.35、1:0.3である。ブロック積壁模型ももたれ壁模型と同様に実物の約1/5を想定し、壁高1.0m、前面勾配と背面勾配は1:0.3とした。

5.2 実験結果

図14と図15に初期状態とせん断土槽による80mm載荷時の小型起振器試験から得られた伝達関数(振幅)を示す。もたれ壁とブロック積壁模型の両者とも、初期状態では40Hz付近に明瞭な極値が存在しており、背面土を含めた全体の固有振動数が卓越している。もたれ壁模型実験結果から、せん断土槽による繰返し載荷とともに、もたれ壁に変状が生じて、この極値が低振動領域に推移することが分かった。また、変状が生じると、伝達関数(振幅)において、低振動数領域での振幅値が大きくなることが分かった。一方、ブロック積壁模型実験では、目地切れが発生すると、低振動数領域で全体的に振幅比が大きくなり、揺れやすい構造体となった。

以上の結果から、もたれ壁とブロック積壁の健全度と振動特性には相関性があることが分かった。さらに、ブロック積壁はく体剛性に左右され、く体剛性が低下すると安定度が低下し、揺れやすい構造体となることが分かった。なお、実際の土留めの振動は3次元的に挙動することが想定される。そのため、固有振動数の把握には、振動モードの特定が必要になる。振動モードの特定は実務上、困難なことから、土留めの揺れやすさの指標を新しく定義して、土留めの定量的な健全度評価を行う必要がある。新しい定量的な健全度評価法については、後に詳しく説明する。

6. 既設土留めの健全度評価法

前述したように、既設もたれ壁と既設石積壁に対する衝撃振動試験結果から、変状が生じた既設もたれ壁と既設石積壁は低振動数領域で揺れやすく、健全な既設もたれ壁と既設石積壁は低振動数領域で揺れにくいことが分かった。また、もたれ壁と石積壁を模擬したブロック積壁模型の載荷実験からも同様な傾向が得られた。そこで本研究では、フーリエ振幅スペクトルの面積を用いた健全度診断手法を提案する。スペクトル面積は、加速度のエネルギーと相関性のある値であることから、提案法は土留めの健全度をエネルギーで評価することになる。

スペクトル面積の算定においては、ある閾値を設定した後、この閾値以下の面積を求めることとした。図16に不健全と健全な土留めのフーリエ振幅スペクトルのイメージを示す。前述したように、不健全な土留めでは、低振動数領域で振幅値が大きく、健全な土留めでは振幅値

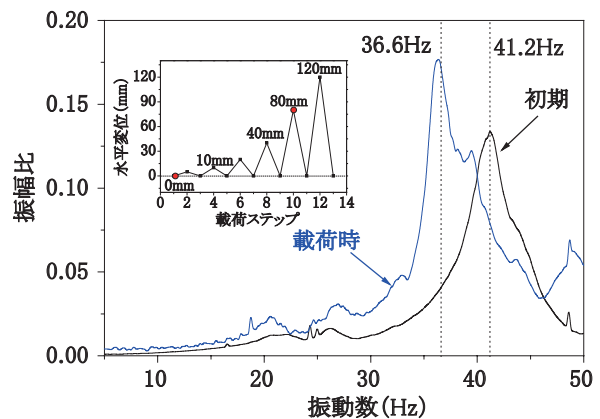


図14 もたれ壁のフーリエ振幅スペクトル

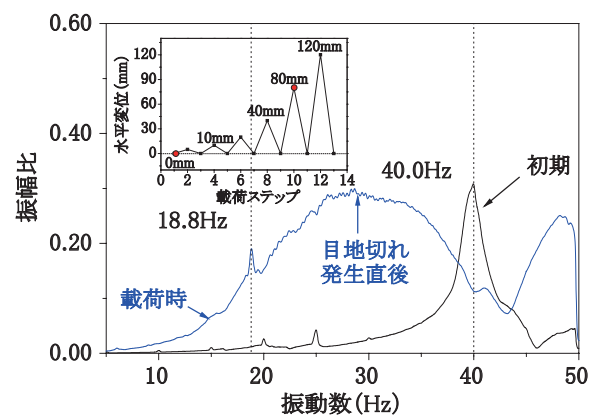


図15 ブロック積壁のフーリエ振幅スペクトル

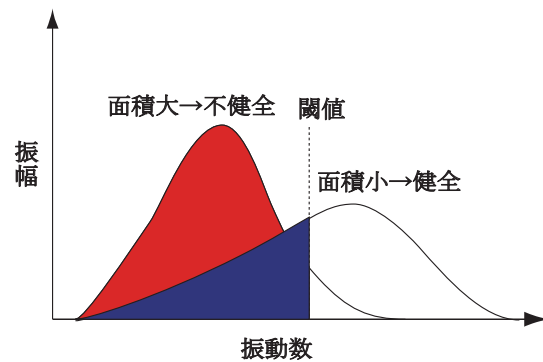


図16 健全・不健全な土留めのフーリエ振幅スペクトルのイメージ

が小さいことが分かっている。したがって、スペクトルの面積を用いることで、土留めの健全度を定量的に評価できる。図17に土留めの安定性診断フローを示す。

7. 既設土留めにおける検証試験

図5に示したもたれ壁とそれに隣接するもたれ壁に対して小型起振器試験を実施した。試験対象としたもたれ壁は、不健全2箇所、補強1箇所、健全1箇所である。試験結果から得られたフーリエ振幅スペクトルを図18に示す。図から、不健全な土留めは低振動数領域で振幅値

特集：構造物技術

が大きく揺れやすく、健全な土留めと補強した土留めは低振動数領域で振幅値が小さく揺れにくいことが分かる。図18に示した結果を用いてスペクトル面積を求め、健全なもたれ壁のスペクトル面積で正規化した結果を図19に示す。ここで、スペクトル面積算定のための閾値は40Hzとした。算定結果から、不健全なもたれ壁のスペクトル面積が相対的に大きいことが分かる。一方、補強したもたれ壁のスペクトル面積は、不健全なもたれ壁のスペクトル面積よりも小さくなることから、提案法により補強効果を定量的に評価できることが分かる。

8. まとめ

本研究では、土留めの振動特性を把握するための小型起振器を開発し、小型起振器を用いた土留めの健全度評価法を開発した。既設土留めに提案手法を適用した結果、提案手法の妥当性が確認できた。

既設土留めは、構造形式、周辺環境、地盤条件等で応答特性が異なることが想定される。そのため、多数の現地試験結果を集約し、統計処理することで土留めが保有すべきスペクトル面積を求めることが理想的であるが、現在では蓄積したデータ数が少ない。したがって、当面は隣接する健全な土留めと比較することで、安定性を相対的に評価する方法が適切であると考えられる。今後は、実測データを蓄積し、土留めが保有すべきスペクトル面積の算定式を作成する予定である。提案手法が土留めの健全度診断手法として実務で活用され、試験データが蓄積されることを期待している。

謝辞

本研究では、既設土留めの実態把握のため、構造物管理支援システムを運用している鉄道事業者にご協力をいただき、データを提供いただいた。ここに深謝致します。また、本研究では、既設土留めの振動特性を把握することが重要であった。現地調査に関しては、東日本旅客鉄道株式会社の秋山保行様、内藤孝和様に多大なるご協力をいただいたことに深謝致します。

文献

1) 菊池誠, 川浦美佐子, 菊池紀生: 構造物管理支援システムの開発, 第45回鉄道におけるサイバネティクス利用国内シンポジウム論文集, Vol. 43, 2006

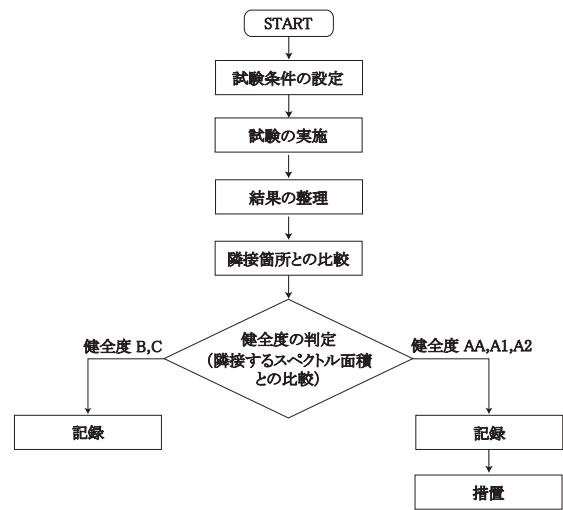


図17 既設土留めの健全度診断フロー

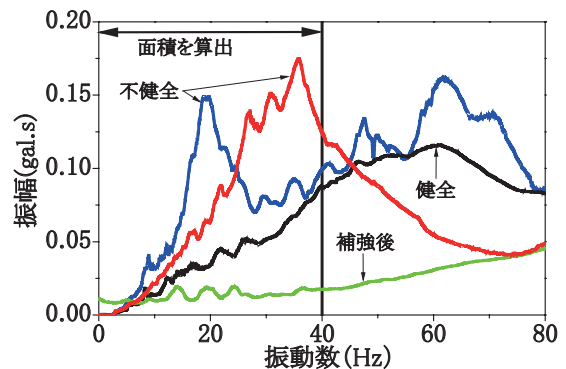


図18 異なる健全度におけるフーリエ振幅スペクトル

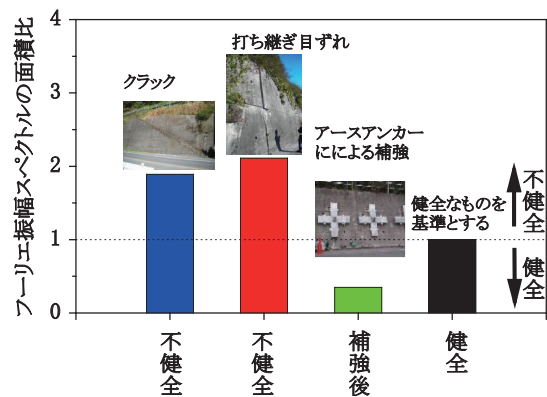


図19 異なる健全度におけるフーリエ振幅スペクトルの面積比

2) 篠田昌弘, 大村寛和, 田中裕二, 阿部慶太, 藤田圭一, 土屋宗典: 小型起振器を用いた鉄道河川橋脚の健全度診断, 第55回地盤工学シンポジウム平成22年度論文集, 地盤工学会, pp.275-282