

3.9 打音試験

目 次

3.9.1. 打音試験の内容	396
3.9.2. 打音試験の方法	396
3.9.3. 試験の結果	397
3.9.4. 判定結果の考察	402
3.9.5. 機械計測による打音試験	404

3.9.1. 打音試験の内容

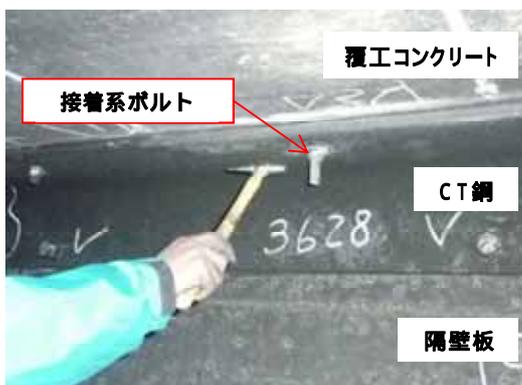
対象区間： 笹子トンネル上り線全線（天井板落下区間を除く）
 実施期間： 2012(平成24)年12月18日～2012(平成24)年12月30日
 試験対象： 3.6 引抜試験で実施した接着系ボルト(185本)

3.9.2. 打音試験の方法

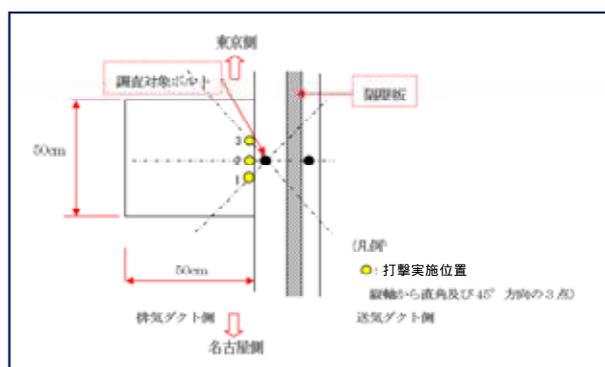
1 試験体に対し、ハンマーを用いて、点検員3名各々が接着系ボルト頭部を鉛直方向及び水平方向に打撃し、「道路トンネル定期点検要領(案)2002(平成14)年4月(国土交通省)」にもとづいて打撃音が清音、濁音かを記録するとともに、反発感の有るか無いかも記録する。また、近接目視、打音及び触診により接着系ボルトの良・不良を判定する。

接着系ボルト頭部及び覆工コンクリートの外観(範囲は接着系ボルト周辺50cm×50cm程度)も確認し、写真を撮影。試験結果および写真類は、記録表として取りまとめる。

また、センサー付き打音装置を利用し、接着系ボルト頭部を打撃したときの打撃音および打撃力をデジタル値として記録する。



打音試験の実施



試験の実施範囲

アンカーボルト		試験番号	20		
		西坑口からの通し番号	5006		
		作業番号	40		
試験前	アンカーボルト近傍 覆工コンクリート外観	実施日	2012/12/20		
			ひび割れ <input type="checkbox"/> 有・ <input checked="" type="checkbox"/> 無		
			漏水 <input type="checkbox"/> 有・ <input checked="" type="checkbox"/> 無		
			遊離石灰 <input type="checkbox"/> 有・ <input checked="" type="checkbox"/> 無		
試験前	アンカーボルト外観	実施日	2012/12/20		
			ボルトさび <input type="checkbox"/> 有・ <input checked="" type="checkbox"/> 無		
			ボルトゆるみ <input type="checkbox"/> 有・ <input checked="" type="checkbox"/> 無		
			ナットさび <input type="checkbox"/> 有・ <input checked="" type="checkbox"/> 無		
		ナットゆるみ <input type="checkbox"/> 有・ <input checked="" type="checkbox"/> 無			
打音点検(NEXCO中日本)		実施日	2012/12/13		
		○			
打音試験	打撃音の清音・濁音による良否	鉛直	○	○	○
		水平	○	○	○
	反発感の有無による良否	鉛直	○	○	○
		水平	○	○	○
	ボルトのゆるみ判定		○	○	○
	ナットのゆるみ判定		○	○	○
総合判定		○	○	○	
備考					

■アンカーボルト天井板の写真

コメント: アンカーボルトに目立った変状はない。

撮影日 2012/12/20

■アンカーボルト近傍の覆工コンクリートの写真

コメント: アンカーボルト周辺の覆工コンクリートに目立った変状はない。

試験記録表の記録例

3.9.3. 試験の結果

3.9.3.1 点検員による判定の違い

点検員による判定のばらつきは少なかった。（全 185 箇所のうち判定が点検員間で不一致であったのは 5 %）。

点検員間の判定のばらつきを減らすためには、点検結果判定方法を明確化すべきと考えられる。

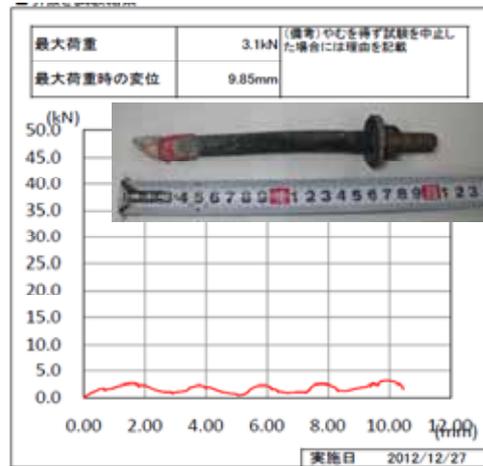
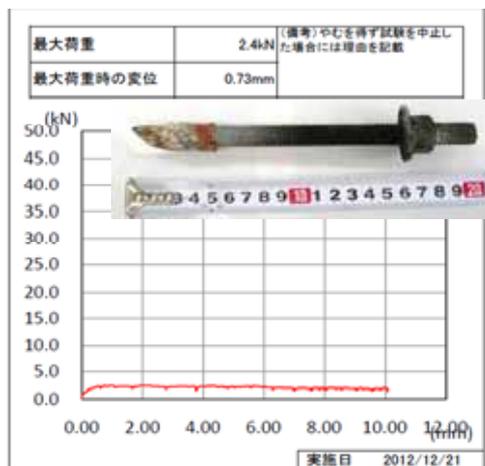
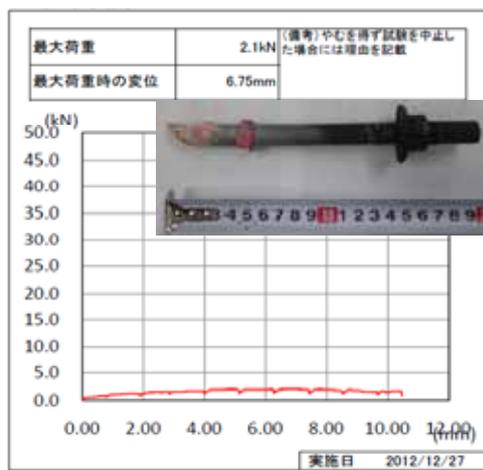
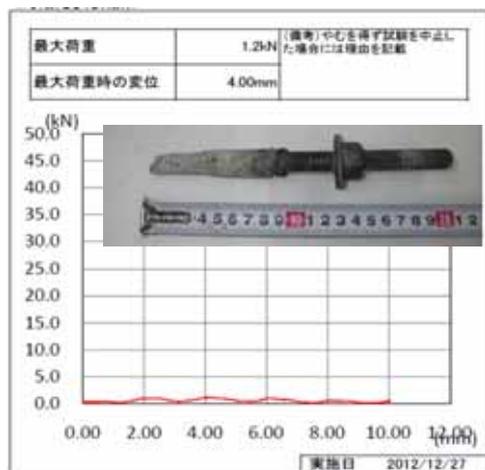
試験の結果

点検員 3 名の判定	箇所数 割合
判定が一致	175 箇所
	95%
判定が不一致	10 箇所
	5%

3.9.3.2 明らかに抵抗機能が喪失していたと考えられる接着系ボルト

荷重変位曲線において、荷重が5.0kN未満のまま変位だけが增加する様相を示す、明らかに抵抗機能を喪失していると思わせる接着系ボルトは、点検員全員が「×」と判定していた。

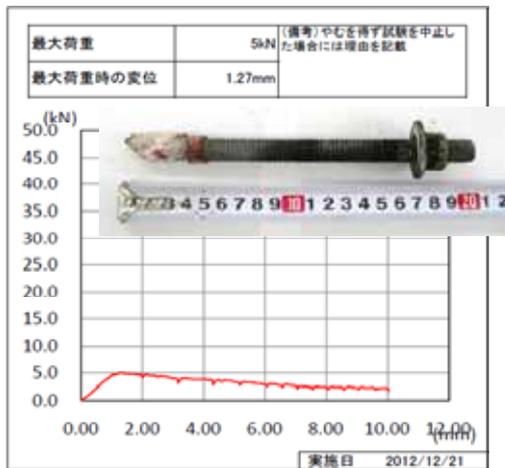
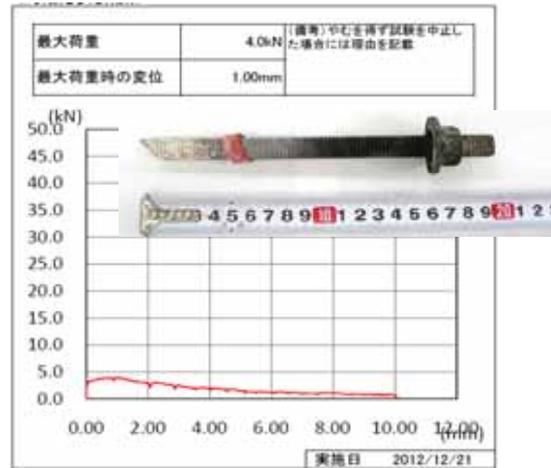
手（触診）で引き抜けたものも存在したことから、点検は近接を基本とし、触診も実施すべきと考えられる。



3.9.3.3 最大荷重が低く、かつピークが明瞭でない荷重変位曲線

引抜強度が 5.0kN 程度以下で、かつ荷重変位曲線のピークがさほど明瞭でないボルトは、点検員全員が「×」と判定していた。

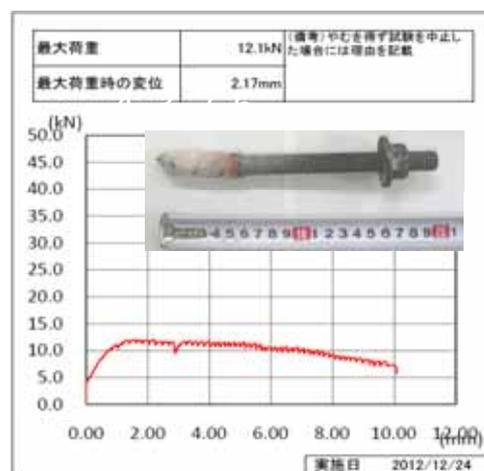
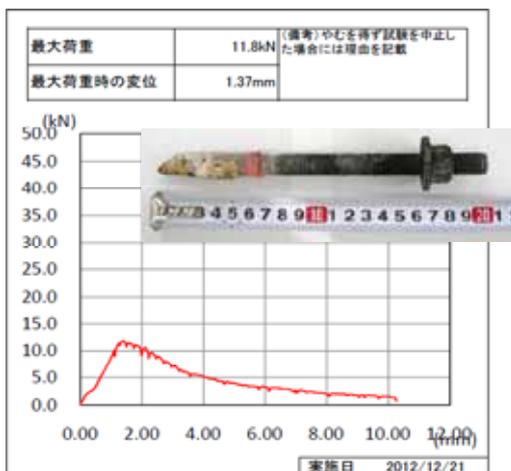
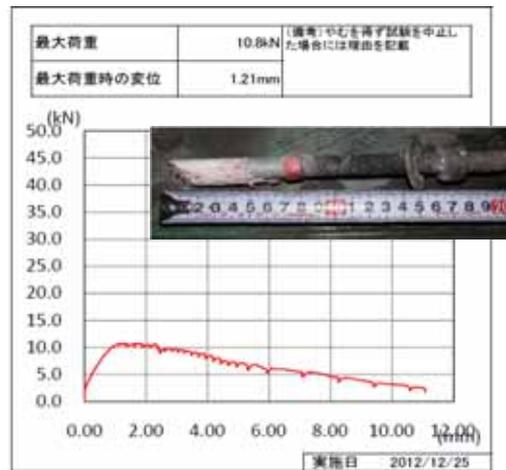
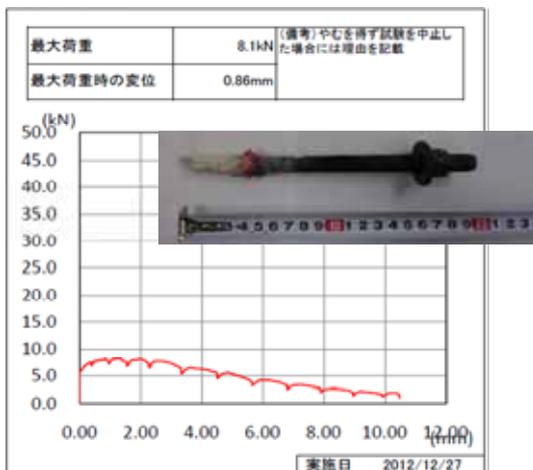
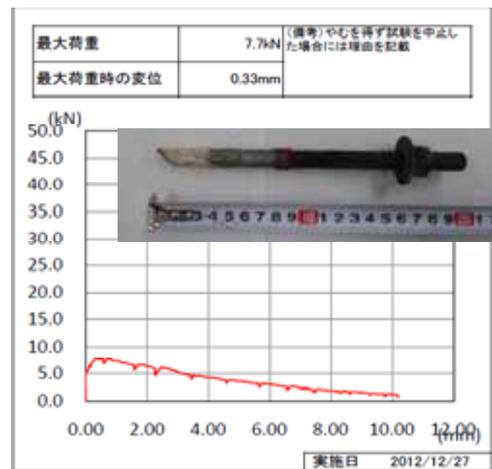
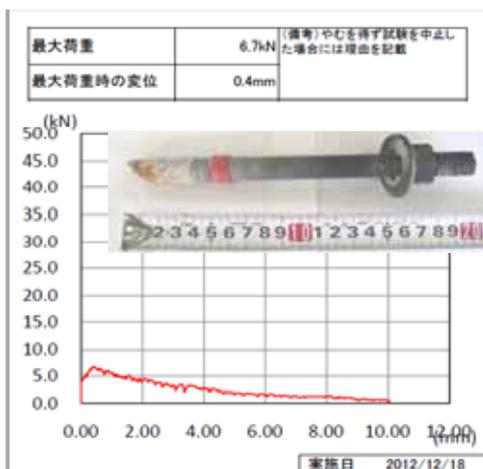
3.9.4.1 及び 3.9.4.3 の結果に基づけば、引抜強度が小さく、かつ、ピークが明瞭でない接着系ボルトは、点検員全員が「×」と判定していた。



3.9.3.4 最大荷重が低い、ピークが出ているもの

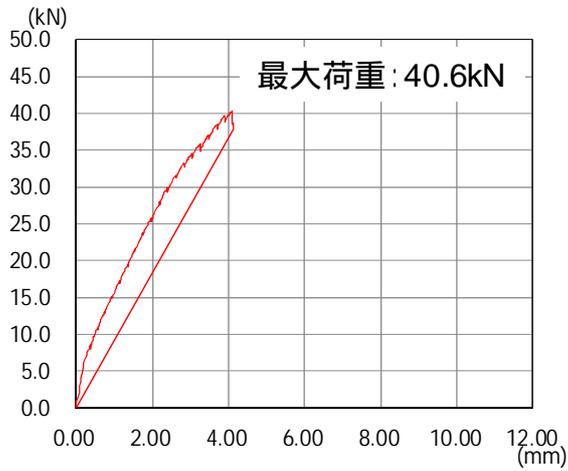
引抜強度が 10.0 kN 程度以下であっても、ピーク点が明瞭に見られるような荷重変位曲線性状を有するボルトでは、引張力に対する抵抗機能を保持していた可能性がある。

試験では、「**Ⅰ**」と判定される傾向がみられた。

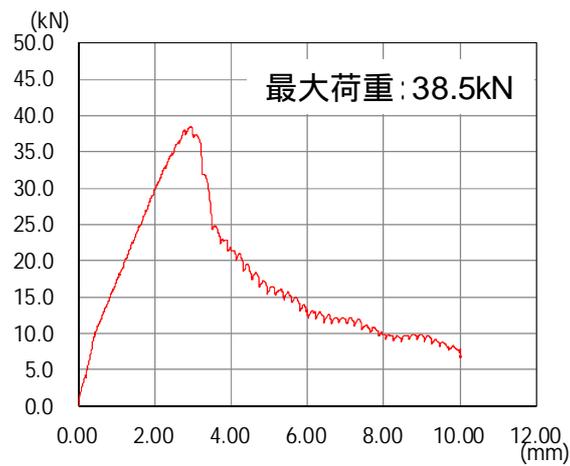


<参考> 最大荷重が大きく、かつ、打音試験で と判定された接着系ボルトの荷重変位曲線

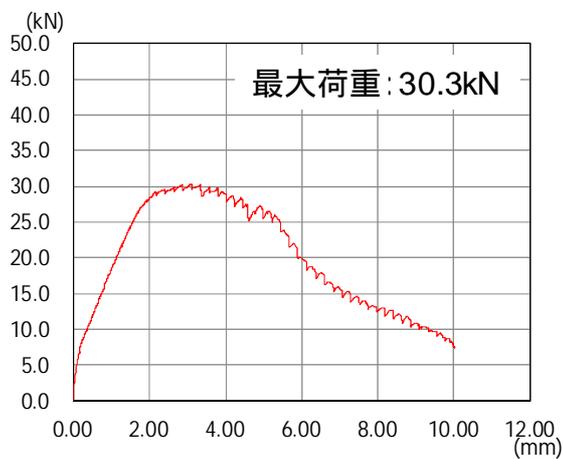
・引き抜け無かった接着系ボルト



・引き抜けた接着系ボルトのうち、最大荷重が大きいもの



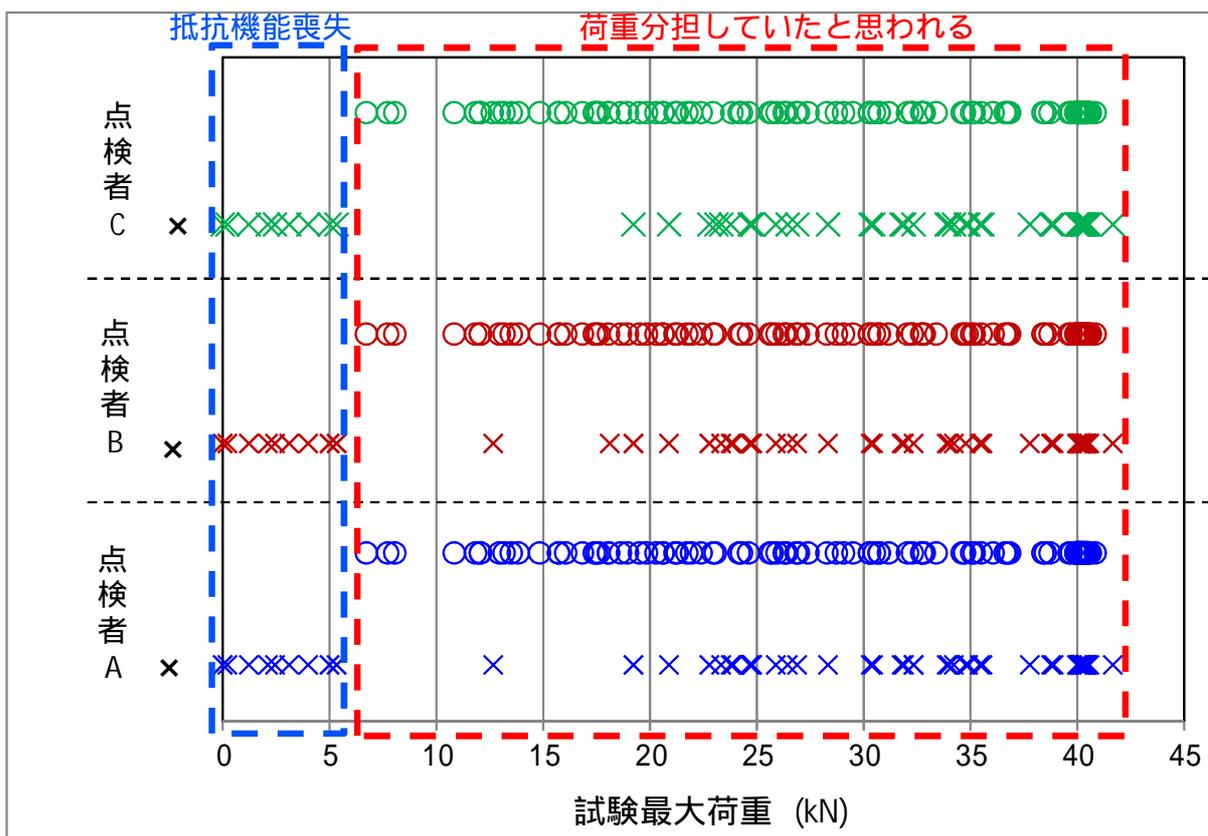
・引き抜けた接着系ボルトのうち、最大荷重が比較的大きいもの



3.9.4. 判定結果の考察

3.9.4.1 判定結果と強度の関係

3.9.3.2 及び 3.9.3.3 で整理した抵抗機能を喪失していたと考えられる接着系ボルトを打音試験にて把握が可能か検証した。抵抗機能を喪失した接着系ボルトは打音試験にて把握できたが、荷重を負担している接着系ボルトの付着強度値を把握することは困難。



グラフのサンプル数：試験対象の 185 箇所

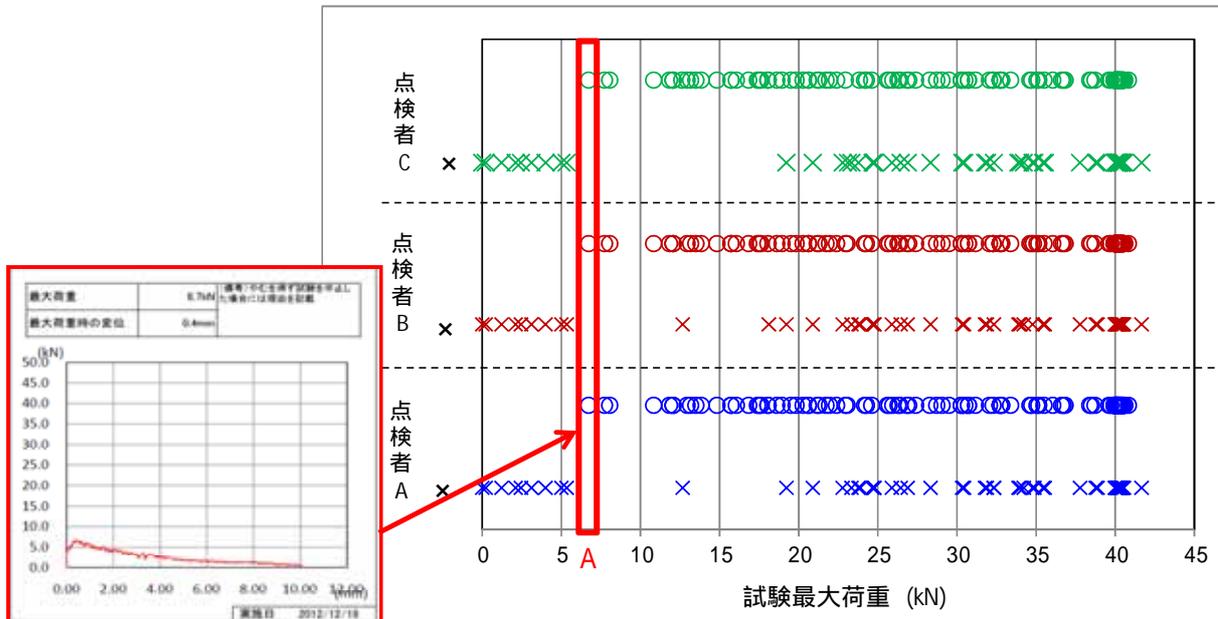
3.9.4.2 ダクト断面別判定結果

ダクト断面別の打音試験結果についてみると、天井板落下区間が含まれる L 断面および M 断面にて x と判定されている接着系ボルト本数の割合は、S 断面に比べると高くなっている。

	S 断面	M 断面	L 断面	合計
	14	61	47	122
	73.7%	66.3%	63.5%	65.9%
x	1	5	4	10
	5.3%	5.4%	5.4%	5.4%
x	4	26	23	53
	21.1%	28.3%	31.1%	28.6%
合計	19	92	74	185

3.9.4.3 笹子トンネルの特殊性の影響の例

図中 A に示す接着系ボルトの打音について点検員へ聞き取りしたところ、「ボルト打撃時に異音を感じたが、接着系ボルトではなく、CT 鋼と覆工コンクリートの間の緩みに起因すると判断した」とのコメントがあり、試験結果には笹子トンネル天井板吊り構造の特殊性の影響も考えられる。



3.9.5. 機械計測による打音試験

3.9.5.1 音響試験

(1) 室内実験

1) 実験概要

実験目的

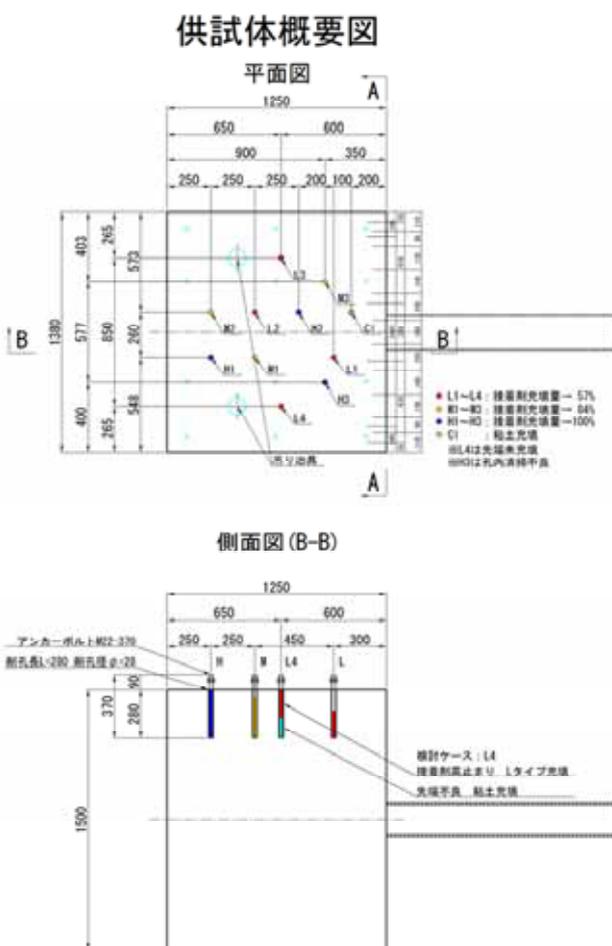
本実験は、打撃音圧の記録が可能なセンサー付打音装置を用いた室内実験を実施して、接着系ボルトの打音に与える要因について分析を行ったもの。

2) 実験場所・実験日・実験方法

項目	内容
実験場所及び供試体提供	(独) 土木研究所
実験日	2013(平成 25)年 2 月 22 日(金)
実験方法	ボルト頭部を鉛直方向・せん断(水平)方向に 3 回ずつセンサー付打音装置により打撃

3) 供試体概要

実験は、下図に示す供試体で実施した。



【アンカーボルト・削孔等】
 アンカーボルト:M22
 ボルト全長:370mm
 削孔長 L=280mm
 削孔径 =28

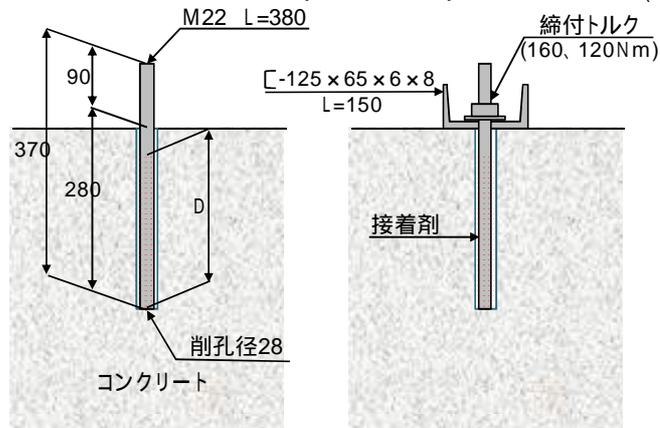
ボルト番号	接着剤充填状態
H1 ~ H3	接着剤充填量 100%
M1 ~ M3	接着剤充填量 84%
L1 ~ L3	接着剤充填量 57%
C1	粘土充填 (先端部のみ粘土充填)

4) 実験に用いたボルトおよび接着剤充填状態

実験に用いたボルト番号と接着剤充填状態を下表に示す。

ボルト番号		接着剤充填状態
H	H1 ~ H3	削孔深さと同じである D=280mm まで接着剤が満たされている状態
M	M1 ~ M3	孔底から D=232.4mm まで接着剤が満たされており、削孔深さに対して接着剤が 84% 充填されている状態
L	L1 ~ L3	孔底から D=190.6mm まで接着剤が満たされており、削孔深さに対して接着剤が 57% 充填されている状態
	粘土充填	充填不良である状況とするために、孔内に粘土を詰めた状態からボルトを挿入した状態

充填量は、使用した接着剤の容量（カタログ値）より、Hタイプ(280mm タイプ)を基本に算定



$$\text{充填率} = D/280$$



粘土の付着状況

提供：(独)土木研究所

ボルトを引き抜いて粘土付着長を計測した結果、付着長は約 200mm であった。

5) ボルト締付管理方法

ナット締付トルクを導入することにより、引張力を与えた。締め付ける際はトルクレンチを用いた。締め付けの軸力の条件設定は以下の 4 ケースである。

「締付トルク 160Nm」、「120Nm」、「0Nm」、「ナットがないボルト」

6) センサー付き打音装置と打撃手順

概要

センサー付き打音装置を以下の写真に示す。打撃方向は2ケースで、ボルト頭部をボルト軸方向(軸方向)に打撃した場合を「軸方向」、ボルト頭部をせん断方向(水平方向)に打撃した場合を「せん断方向」と呼ぶ。各ボルトに対して、各打撃方向で3回の打撃を行った。

センサー付打音装置

ここで用いたセンサー付打音装置は、コンクリート表層部の健全性を点検するために開発されたもので、コンクリート表層部を打撃した際に発生する振動がコンクリート内部を伝搬する過程を、コンクリート表面にて音圧として記録し、分析するための装置。

本検討では、装置本来の使用目的・方法とは異なるが、インパクトハンマー(重量 200g)でボルト先端打撃したときの打撃音を、ボルト先端から 20cm 離れた場所でフード付きマイクロフォン(周波数範囲 20Hz~20kHz)により音圧として収録。



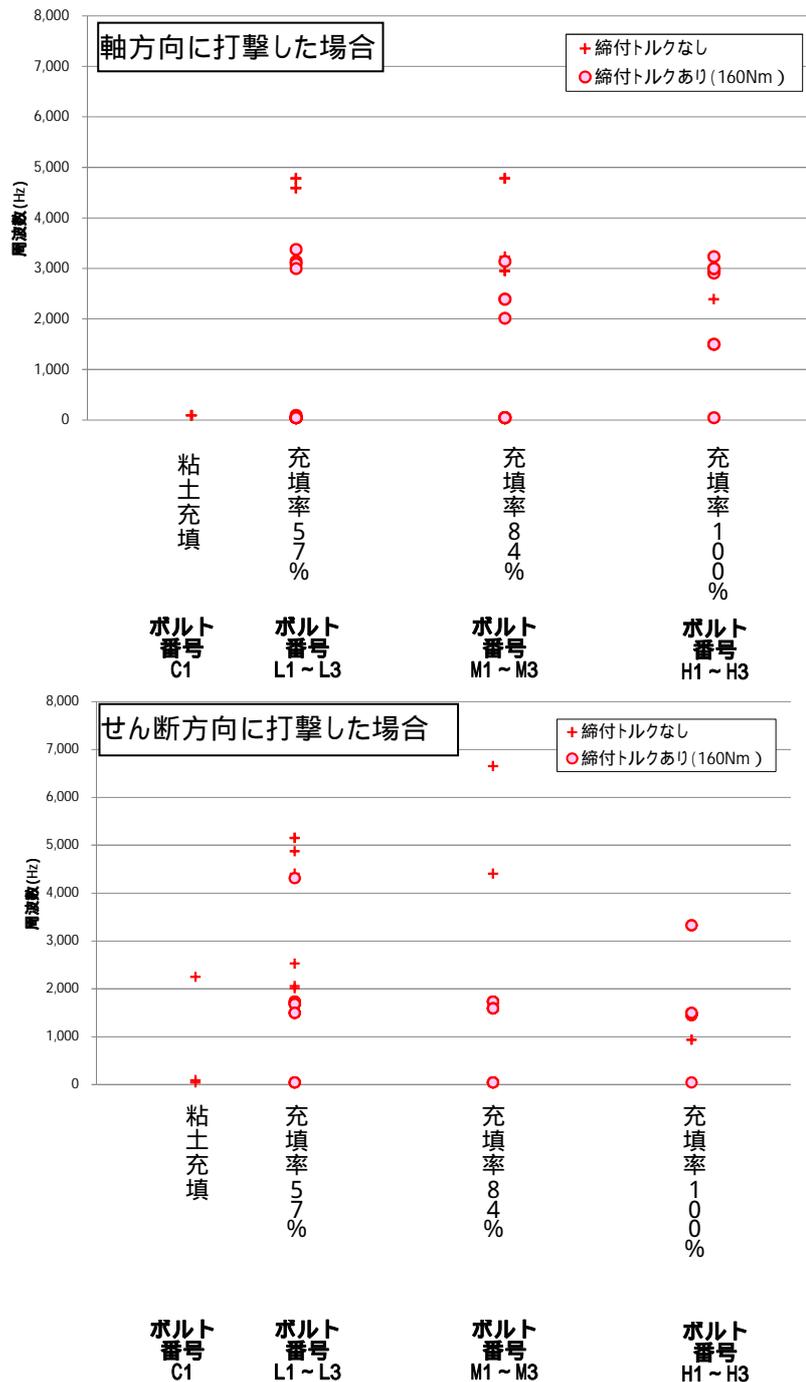
(2) 実験結果

1) 導入トルク別 1次固有振動数による比較

各充填率の接着系ボルトに対して、軸方向及びせん断方向に3回打撃を行い、記録した音圧のFFT波形から、それぞれ1次固有振動数を判読し接着剤充填率別に比較を行った。

データのばらつきが非常に大きいのが、締付トルクなしで軸方向に打撃した場合、充填率が100%のときに比べて84%と57%のときには1次固有振動数は大きくなる傾向が見られる。締付トルクが入ると、充填率の違いによらず1次固有振動数は変化しなくなる傾向がある。

せん断方向に打撃した場合にも同様の傾向がみられる。



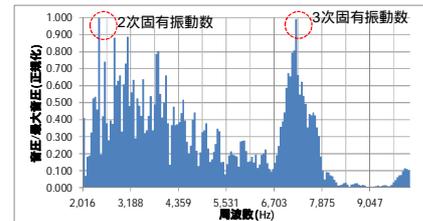
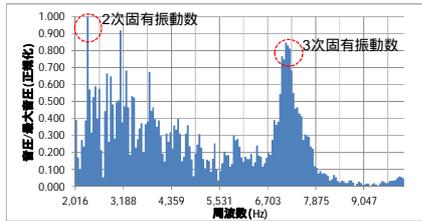
2) フーリエスペクトル図による接着剤充填率別固有振動数の比較

接着剤の充填率の違いにより、固有振動数の違いがみられるかを把握するために、各打撃時に得られた音圧を最大音圧で除した値を縦軸、周波数を横軸にしたフーリエスペクトル図を作成し、比較を行った。

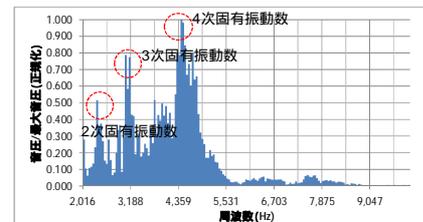
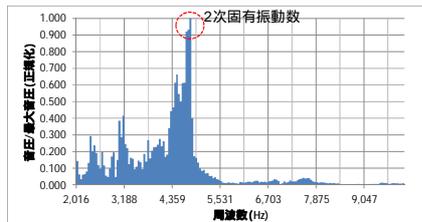
ナット有無別(ナット有は手でナットを締めつけたもの)の固有振動数の比較(軸方向)

ナットの有無によらず、接着剤の充填率が 100%であると周波数の高い領域(約 7,000Hz)に固有振動数を有するが、充填率 57%では周波数の低い領域(約 5,000Hz 以下)でのみ固有振動数が確認された。

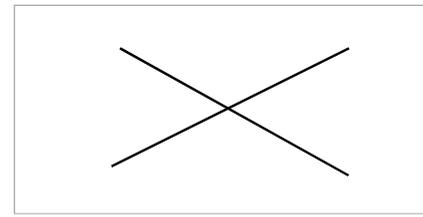
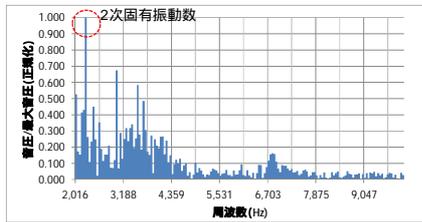
充填率
100%



充填率
57%



充填不良
(粘土充填)



ナットなしのケース

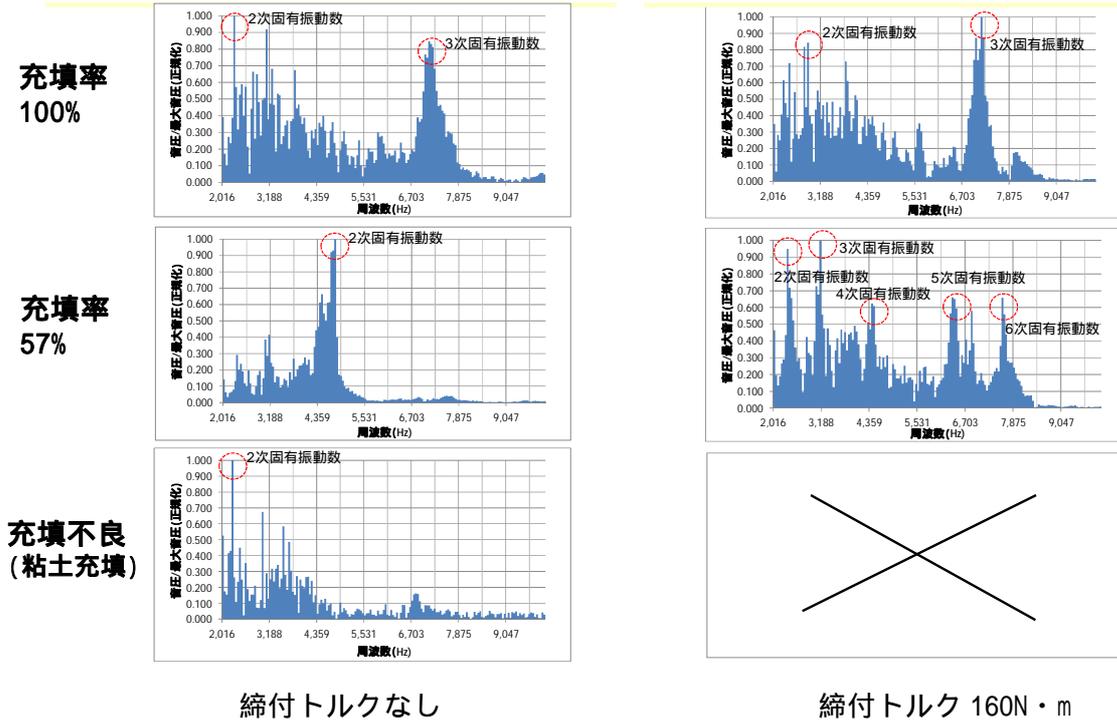
ナット有のケース

締付トルク有無別の固有振動数の比較(軸方向)

接着系ボルトの充填率別に、締付トルク 160N・m でトルク管理したものと、手でナットを締めたもので、軸方向の打撃時の固有振動数の比較を行った。

締付トルクがない場合、充填率 100%では、周波数の高い領域(約 7,000Hz)に固有振動数がみられる。一方、充填率 57%では、周波数の低い領域(約 5,000Hz 以下)でのみ固有振動数がみられる。

締付トルクが 160N・m の場合、充填率に違いがあっても固有振動数の顕著な差はみられず、いずれの充填率においても約 7,000Hz 付近で固有振動数がみられる。



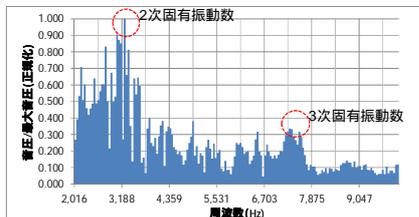
締付トルク有無別の固有振動数の比較(せん断方向)

接着系ボルトの充填率別に、締付トルク 160N・m でトルク管理したものと、手でナットを締めたもので、せん断方向の打撃時の固有振動数の比較を行った。

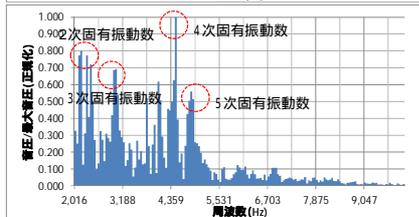
締付トルクがない場合、充填率 100%では、周波数の高い領域(約 7,000Hz)に固有振動数がみられる。一方、充填率が 57%では、周波数の低い領域(約 5,000Hz 以下)のみ固有振動数がみられる。

締付トルクが 160N・m の場合、軸方向同様に、充填率 100%では、周波数の高い領域(約 7,000Hz)に固有振動数がみられる。充填率 57%でも、顕著でないものの周波数の高い領域(約 7,000Hz)にも固有振動数がみられ、締付トルク無し・充填率 100%のときのフーリエスペクトルと同様のスペクトル性状を有する。

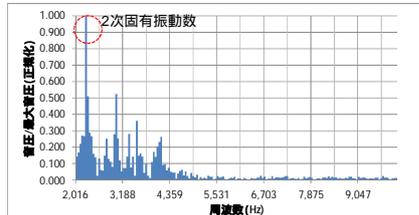
充填率
100%



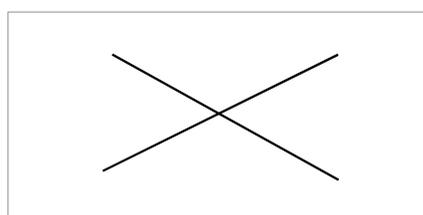
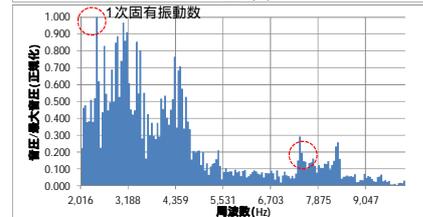
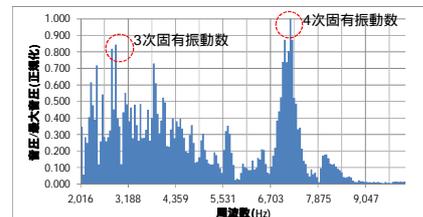
充填率
57%



充填不良
(粘土充填)



締付トルクなし



締付トルク 160N・m

(3) 現地試験

1) 試験場所・試験日・試験方法

項目	内容
試験場所	中央自動車道(上り線) 笹子トンネル
試験日	2012(平成 24)年 12 月 18 日 ~ 2012(平成 24)年 12 月 30 日
試験方法	ボルト頭部を鉛直方向・せん断方向に 3 回ずつ打音

2) 引抜強度ランクと音響試験結果別のスペクトル図の比較

引抜強度ランク (A~C ランク : 3.6 参照) と打音試験結果の「 \square 、 \times 」別に 1 次固有振動数、最大音圧時の周波数、および、スペクトル図に差がみられるかを検証した。

最大音圧に与える周波数は、必ずしも 1 次固有振動数に一致しない。

引抜強度が、C ランク (12.2kN 未満) のうち、3.9.3.2 及び 3.9.3.3 で整理した抵抗機能喪失に分類されるボルトでは、1 次固有振動数および最大音圧時の周波数が他の結果に比べて低い傾向がみられるが、値のばらつきもみられる。

引抜強度が、3.9.3.4 で整理した C ランク (12.2kN 未満) でも抵抗機能を有するボルトと引抜強度が A ランク (40kN 以上) のボルトの比較では、両者の違いを見いだせなかった。

引抜強度 A ランク (40kN 以上)	引抜強度 C ランク (12.2kN 未満)	
	抵抗機能を有するボルト	抵抗機能喪失ボルト
打音試験 1 次固有振動数: 891Hz 最大音圧時の周波数: 2,349Hz	打音試験 1 次固有振動数: 609Hz 最大音圧時の周波数: 609Hz	打音試験 × 1 次固有振動数: 328Hz 最大音圧時の周波数: 328Hz
打音試験 1 次固有振動数: 750Hz 最大音圧時の周波数: 3,984Hz	打音試験 1 次固有振動数: 609Hz 最大音圧時の周波数: 609Hz	打音試験 × 1 次固有振動数: 1,359Hz 最大音圧時の周波数: 2,953Hz
打音試験 1 次固有振動数: 516Hz 最大音圧時の周波数: 2,438Hz	打音試験 1 次固有振動数: 797Hz 最大音圧時の周波数: 2,953Hz	打音試験 × 1 次固有振動数: 375Hz 最大音圧時の周波数: 1,409Hz

1 次固有振動数、最大音圧時の周波数及び2000Hz以上の帯域のスペクトル図の比較
(代表的な9サンプルを例示、軸方向打撃)

3.9.5.2 機械式インピーダンス法試験

(1)室内実験（データ提供：（独）土木研究所）

本実験は、コンクリート強度の推定や表面近傍の浮き・剥離の存在を判定するために開発された装置（コンクリートハンマー）を用いた室内実験を実施して、接着系ボルトの充填状況の違いについて、測定結果の分析を行った。

1)実験場所・実験日・実験方法

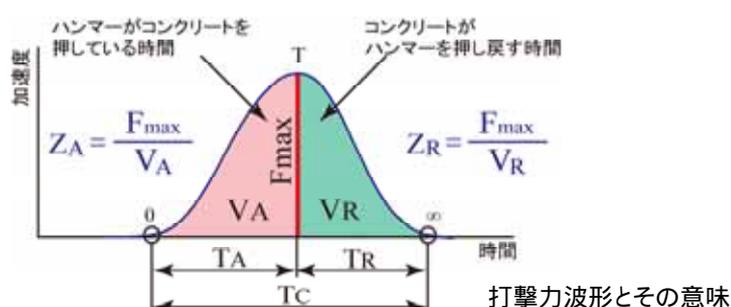
項目	内容
実験場所	（独）土木研究所
実験方法	ボルト頭部を鉛直方向・せん断（水平）方向に3回ずつコンクリートハンマーにより打撃

2)供試体

供試体は、3.9.5.1 3)に示すものと同じ。

3)センサー付き打音装置

コンクリートハンマーは、コンクリート強度の推定や表面近傍の浮き・剥離の存在を判定するために開発された装置で、打撃した時の打撃力・反発力の時間波形を解析し、機械インピーダンス値を推定するものである。製品の仕様上、金属への打撃は装置の適用範囲外とされており、ここでの試験が本装置自体の精度や能力を確かめることを目的としたものではない。



機械インピーダンス $Z = F_{\max}/V$ ：動的荷重を作用させた被載荷物がどの程度の速度で運動するかを示した値。

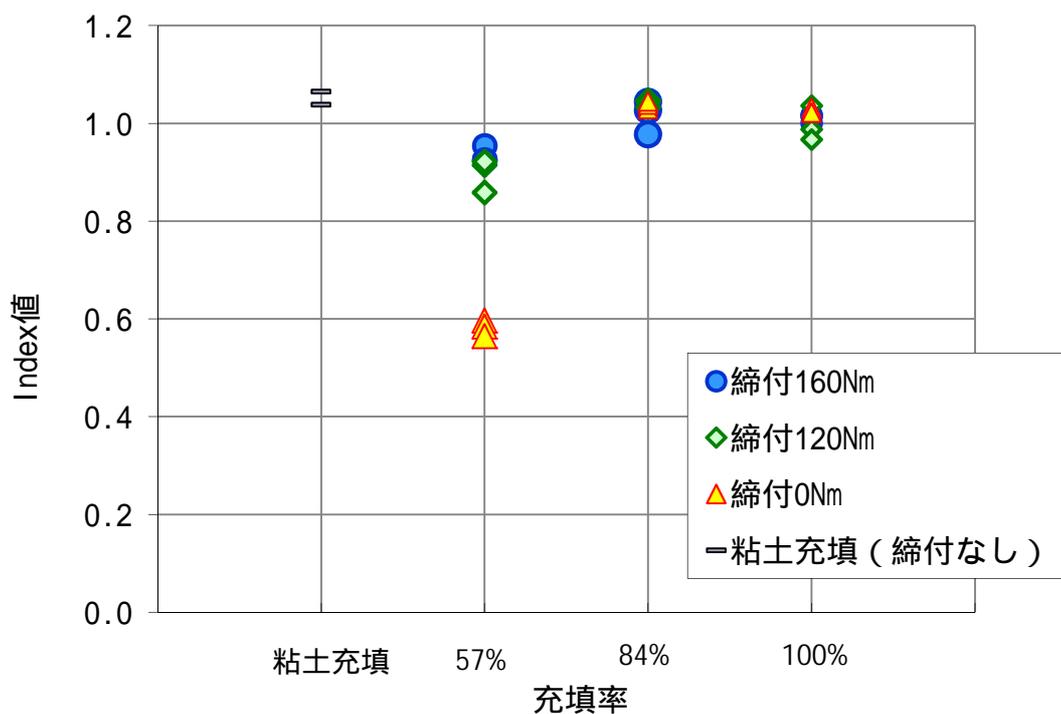
ここで、 F_{\max} ：最大打撃力、 V ：始点から終点までの加速度の数値積分

Index値 $\text{Index} = Z_A/Z_R$

ピークの前半と後半の機械インピーダンスの比

4)室内試験結果

充填率と Index 値（締付トルク有無別）を比較した結果を以下に示す。締付トルクが導入されていない場合には、接着剤充填率の違いにより Index 値に差が見られ、充填率が 57% の場合には Index 値が低くなる傾向がみられる。しかし、締付トルクが大きくなると、充填率の違いに応じた Index 値の差が無くなり、160Nm の締付トルクが導入されると、充填率の差に関わらず Index 値は 1.0 付近の値となる。



(2) 現場試験

1) 目的

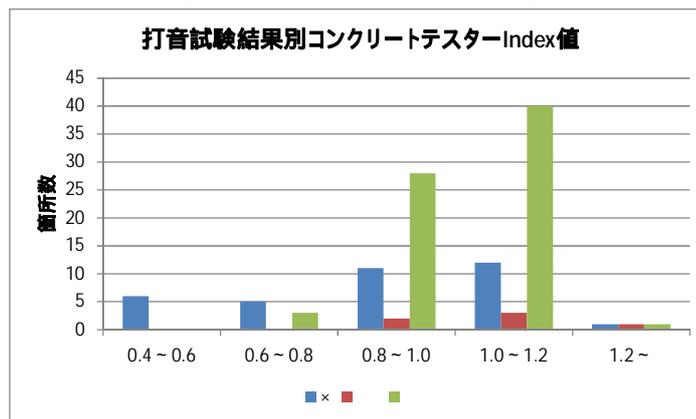
室内試験で実施した試験方法と同様に、現場試験での打音試験および引抜強度と Index 値の比較を行った。

2) 試験場所・試験日・

項目	内容
試験場所	中央自動車道（上り線） 笹子トンネル内
試験日	2012(平成 24)年 12 月 20 日(木)・25 日(火)・26 日(水)・27 日(木)・29 日(土)
試験方法	ボルト頭部を鉛直方向・せん断(水平)方向に 3 回ずつコンクリートハンマーにより打撃

3) 試験結果

- ・ 3.6 の引抜試験で引き抜けた 113 本の接着系ボルトに対する打音試験結果¹別にコンクリートテスター Index 値をみると、ヒストグラムの分布性状は異なり、打音試験結果が×の場合、Index 値が小さくなる傾向が見られる。



¹ 打音試験結果：点検員が「○・×」判定をした結果から、3名の試験員の結果を合わせて、3名とも「○」と判定されたものを「○」、1名および2名が「○」と判定したものは「○」、3名とも「×」と判定した場合は「×」として集計した。

- ・ 3.6 の引抜試験で引き抜けたもの（113 箇所）と引き抜けなかったもの（72 箇所）の比較では、ヒストグラムの分布性状は変わらない。

