コンクリート工学年次論文集，Vol.40，No.1，2018

論文　接着系あと施工アンカーの打撃応答特性に及ぼす孔内清掃および定着長の影響

三島　慎作[*1]・舟波　尚哉[*2]・村上　祐貴[*3]

要旨：本研究では，接着系あと施工アンカーの打撃試験による付着性能評価を目的として，アンカーボルトの定着長(埋め込み深さ)，アンカー孔内の清掃の有無，繰り返し荷重の大きさが，付着性能に及ぼす影響について実験的に評価するとともに，それら付着影響因子が打撃応答特性に及ぼす影響について検討した。その結果，定着長が標準施工時より短い場合は，孔内清掃を行わないことによって付着強度が低下した。また，定着長が標準施工時より短い場合は，孔内清掃を施さない場合，孔内清掃を施した場合に比べて卓越周波数が低周波側へシフトする傾向にあった。

キーワード：接着系あと施工アンカー，周波数応答関数，打撃試験，繰り返し荷重，付着性能

1.　はじめに

あと施工アンカーは，既設の柱や壁などの耐震補強，トンネル換気用のジェットファンや道路標識等の道路付属物の設置等に広く活用されている。あと施工アンカーは付帯設備の一部という位置付けであったため，統一された設計指針等は整備されていなかった。

2012 年 12 月 2 日，中央自動車道上り線笹子トンネルにて天井板が崩落する事故が発生し，11 名の死傷者を出した。この事故の調査報告内容 [1]を取り入れて，土木学会からは「コンクリートのあと施工アンカー工法の設計・施工指針（案）」[2]が発刊され，あと施工アンカーの設計・施工指針（案）が示されることとなった。

また，日本コンクリート工学会では，あと施工アンカーの耐久性評価手法の確立に焦点を当て，2014 年に「あと施工アンカーの耐久性の評価方法の確立と設計の高度化研究委員会」が発足された。同委員会では，あと施工アンカーの諸性能に関する既往の知見の整理がなされたが，あと施工アンカーの疲労特性や非破壊によるあと施工アンカーの性能評価に関する知見の検討事例が極めて少ないことが示唆された [3]。

このようなことを背景に，著者らは，接着系あと施工アンカーの付着性能評価を目的として，接着系あと施工アンカーの打撃試験および引張荷重載荷試験を実施し，初期欠陥（過剰攪拌）や繰り返し荷重が点検時の打撃応答特性や付着強度に及ぼす影響について検討した [4]。その結果，アンカーボルト挿入時の過剰攪拌によって，付着強度が低下するとともに，打撃試験時の周波数応答関数分布が変化することを示した。さらに，アンカーボルトの繰り返し荷重（疲労）試験では，アンカーボルトの付着強度の低下は認められなかったが，繰り返し荷重載荷回数の増加に伴い，周波数応答関数の卓越周波数が低周波側にわずかにシフトすることを明らかとした [4]。また，アンカーボルトの施工不良に焦点を当て，電磁パルス法を用いたアンカーボルトの接着剤充填状況の非破壊評価手法について検討が行われている [5), 6]。

このように，あと施工アンカーの各種性能評価に資する非破壊評価手法に関する知見は蓄積されつつあるが，実務で適用されるまでには，更なる検討が必要である。

本研究では，接着系あと施工アンカーの打撃試験による付着性能評価を目的として，先行研究で未検討であったアンカーボルトの定着長，アンカー孔内の清掃の有無，繰り返し荷重の大きさが，付着性能に及ぼす影響について実験的に評価するとともに，それら付着影響因子が打撃応答特性に及ぼす影響について検討した。

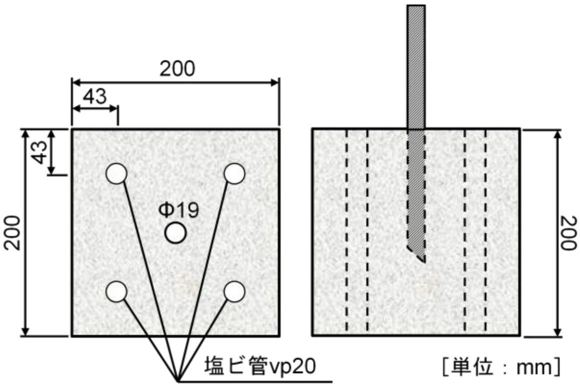
2.　実験概要

2.1　試験体概要

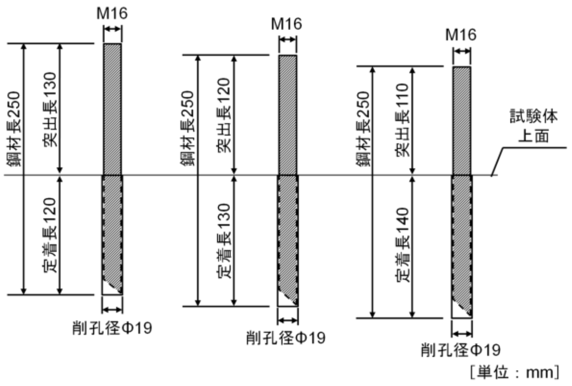
試験体概要を**図－1** に示す。試験体寸法は，断面 200mm×200mm，高さ 200mm の角柱試験体である。試験体隅角部には治具と試験体を固定するボルトを通す目的で，塩ビ管 vp20（内径：20mm，外径 26mm）を打設時に埋設した。あと施工アンカー施工概要図を**図－2** に示す。試験体中心部を直径 19mm のドリルで所定の深さまで削孔し，エポキシアクリレート樹脂を主剤とするカプセル式樹脂アンカーを孔内に挿入した。その後，ハンマードリルを用いて M16 アンカーボルト（降伏強度：186N/mm^2，引張強度：509N/mm^2）に回転・打撃を加えて所定の深さまで埋め込み，固定化するまで静置した。

コンクリートの示方配合を**表－1** に示す。セメントは

*1 長岡工業高等専門学校　環境都市工学科　(学生会員)
*2 長岡工業高等専門学校　環境都市工学専攻　(学生会員)
*3 長岡工業高等専門学校　環境都市工学科准教授　博（工）（正会員)



図－1　試験体概要



(a)　定着長120mm　(b)定着長130mm　(c)定着長140mm

図－2　あと施工アンカー施工概要図

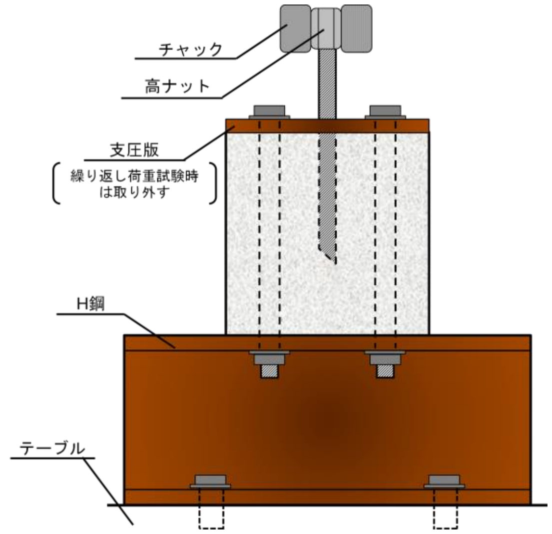
表－1　示方配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	空気量 (%)	単位量(kg/m^3)				
				水	セメント	細骨材	粗骨材	AE減水剤
25	44	40.4	4.5	149	339	733	1123	3.61

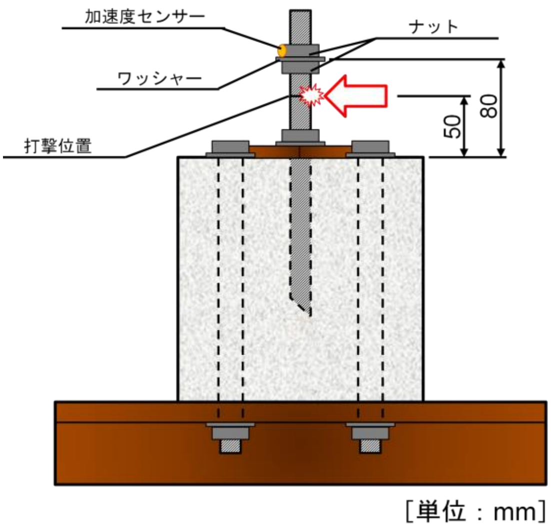
表－2　実験パラメータ

荷重種別	試験体シリーズ	孔内清掃の有無	削孔深さ (mm)	載荷試験時材齢(日)	下限荷重 (kN)	上限荷重 (kN)	最大荷重 (kN)	平均最大荷重 (kN)	変動係数 (%)	破壊形態
静的Sシリーズ	S-A120	有	120	190			72.1	71.3	1.58	破断
							69.7			破断
							72.0			破断
	S-A130	有	130	190			72.8	71.3	1.43	破断
							70.5			破断
							70.7			破断
	S-A140	有	140	190			71.8	72.0	0.32	破断
							72.3			破断
							72.0			破断
	S-B120	無	120	213			65.7	67.7	2.30	引き抜け
							69.6			引き抜け
							67.9			引き抜け
	S-B130	無	130	213			71.9	70.9	1.08	破断
							70.1			破断
							70.6			破断
	S-B140	無	140	213			70.6	71.9	1.31	破断
							72.0			破断
							72.9			破断
繰返しCシリーズ	※1 C-A130_0	有	130	7	0	20	73.5	72.2	2.35	※2（破断）
							73.3			（破断）
							69.8			（破断）
	C-A130_50	有	130	187	20	35.5	70.5	70.7	0.64	（破断）
							70.3			（破断）
							71.4			（破断）
	C-B130_50	無	130	206	20	35.5	70.3	71.0	1.04	（破断）
							70.6			（破断）
							72.0			（破断）
	C-A130_75	有	130	226	20	53.3	―	―	―	引き抜け
							―			破断
							―			破断
	C-B130_75	無	130	238	20	53.3	―	―	―	引き抜け
							―			破断
							―			破断

※1 CA-130_0 は報告済み [4]　※2 破壊形態において(　)で表記したものは, 繰り返し荷重載荷試験で破壊に至らず, その後に静的引張荷重載荷試験を行った際の破壊形態



図－3　引張荷重載荷試験概要図



図－4　打撃試験概要図

早強ポルトランドセメントを使用した。試験体は 70 日間標準養生を行い，その後は気中養生とした。各試験体の試験時の材齢は異なるが，試験期間材齢中の圧縮強度は，43.0N/mm^2～45.0N/mm^{2}の範囲内であり，実験に及ぼす影響は小さいものと考える。

2.2　実験パラメータ

実験パラメータを**表－2** に示す。S シリーズ試験体は打撃試験および静的引張荷重載荷試験を行う試験体である。実験パラメータは，孔内清掃の有無および定着長である。孔内清掃有りの試験体シリーズでは，樹脂カプセル挿入前に，孔内をアンカー用ワイヤーブラシとエアダスターを併用して清掃した。アンカーの定着長（埋め込み深さ）は 120mm, 130mm および 140mm の 3 水準とした。

C シリーズ試験体は，打撃試験および繰り返し荷重載荷試験を行う試験体である。削孔長は標準施工の 130mm に統一し，実験パラメータは，孔内清掃の有無および繰り返し荷重載荷時の下限荷重と上限荷重の大きさとした。繰り返し荷重載荷試験については後述する。なお，試験体 C-A130_0 試験体は，舟波らが実施した実験であり，既往の論文の当該試験体名称は C0 だが，本稿では，C-A130_0 とする [4)]。

2.3　引張荷重載荷試験

(1)　静的引張荷重載荷試験（S シリーズ）

図－3 に静的引張荷重載荷試験概要を示す。載荷は 200kN 疲労試験機（電気油圧式サーボ機構）を使用し，打撃試験終了後ただちに載荷試験を行った。載荷は荷重制御で行い，載荷速度は 0.1kN/sec とした。載荷試験はアンカーボルト挿入から 2 日以上経過後に行った。なお，アンカーボルト挿入から荷重載荷までの期間が 1 日の試験体と 1 ヶ月の試験体で静的引張荷重載荷試験を実施した結果，いずれもアンカーボルトが破断し，最大荷重に差異が認められなかったことを確認している。試験体上面にはコーン上の破壊を防止する目的で断面 200mm×200mm，厚さ 25mm の支圧板を設置した。試験体隅角部の 4 か所に埋設した塩ビ管にボルト（M16）を挿入し，試験体上面に設置した支圧板とあまた，チャック部でのボルト破断を防ぐため，アンカーボルト先端に長さ 50mm の高ナットを取り付けてチャックで固定した。

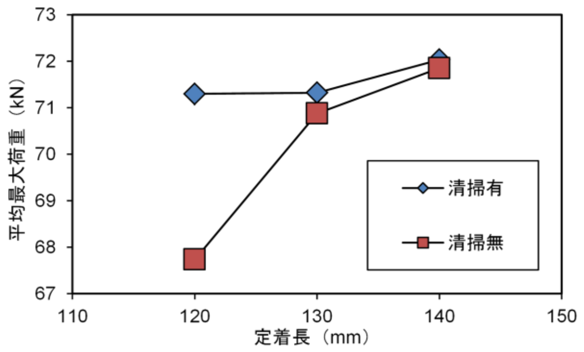
(2)　繰り返し荷重載荷試験（C シリーズ）

図－3 に繰り返し荷重載荷試験概要を示す。載荷は，速度 6Hz の正弦波で行った。C シリーズの上限荷重は，標準施工の SA-130 試験体シリーズの静的引き抜き最大荷重（71.3kN）の約 50%に相当する 35.5kN と，約 75%に相当する 53.3kN の 2 種類とした。下限荷重は，本実験で使用したカプセル式樹脂アンカーの長期許容引張荷重（25.6kN）の約 80%に相当する 20kN とし，繰り返し回数の上限は 100 万回とした。載荷は，ボルト挿入から 1 日以上経過後に開始した。繰り返し荷重載荷回数が上限の 100 万回に到達した時点で，試験体が破壊に至らなかった場合は，**2. 3 節（1）項**の方法で静的引張荷重載荷試験を実施した。

2.4　打撃試験

打撃試験ではインパルスハンマー（周波数範囲：0～8000Hz，測定範囲：2200N）を用いて試験体を加振し，振動応答を加速度センサー（周波数範囲：0.3Hz～20×10^{3}Hz，最大使用加速度：4900m/sec^2）で受信した。計測におけるサンプリング周波数は 25.6×10^3 Hz ，データ数は 4096 とし，実験データは，5 回の打撃によるパワースペクトル可算平均を採用した。サンプリング周波数は対象とする周波数範囲の 2 倍以上となる 25.6×10^3 Hz に設定した。打撃試験は，引張荷重載荷試験直前に実施した。

図－4 に示すように，80mm の高さの位置に固定したダブルナットの上側ナットの側面に，両面粘着テープ（厚さ 0.4mm）を用いて，加速度センサーを密着させた。試



図－5　定着長と平均最大荷重

験体上面から 50mm の高さの位置でアンカーボルト側部をインパルスハンマーで水平に打撃した。加えて，静的引張荷重載荷試験と同様に，試験体と H 鋼を固定した。また，実構造物において，アンカーボルトはナット等で締結されている場合が多いことから，100mm×100mm，厚さ 9mm の鋼製プレートを試験体端面に設置し，デジタルトルクレンチを用いてワッシャーとナットでアンカーボルトを締結し，打撃試験を実施した。締め付けトルクの大きさは 0N・m，35N・m および 70N・m の 3 水準とした。

3.　荷重載荷試験結果

3.1　静的引張荷重載荷試験結果（S シリーズ）

静的引張荷重載荷試験結果を**表－2** に示す。S シリーズ試験体の破壊形態は，S-B120 試験体を除き，鉄筋破断であった。最も定着長が短く，孔内を清掃していない S-B120 試験体では全試験体で引き抜け破壊が生じた。

図－5 に示すように，S-B120 試験体の平均最大荷重は，清掃を行った定着長 120mm（S-A120 シリーズ）の平均最大荷重に比べ，約 5%低下した。このように孔内を清掃していない孔壁では，アンカーボルトあるいは，コンクリートとの樹脂の付着性能の低下に繋がることが確認された。

3.2　繰り返し荷重載荷試験結果（C シリーズ）

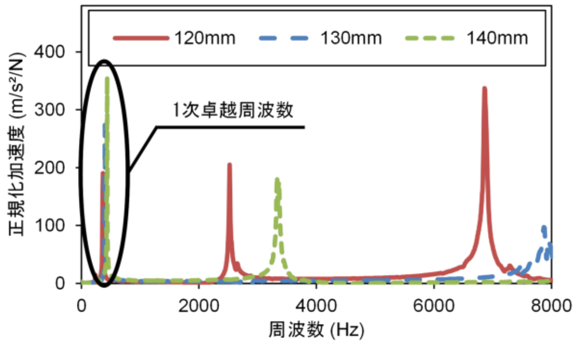
繰り返し荷重載荷試験結果を**表－3** に示す。上限荷重比が 50%の試験体は，繰り返し載荷回数上限である 100 万回まで破壊に至らなかった。繰り返し荷重載荷試験後に実施した静的引張荷重載荷試験では，全ての試験体でボルト破断が生じた。C-A130_50 と C-B130_50 の平均最大荷重は，ほぼ同様の値を示しており，孔内清掃を行わないことによる，アンカーボルトの付着強度の低下は認められなかった。

次に，上限荷重比が 75%の試験体では，いずれの試験体も上限載荷回数の 100 万回に到達する以前に引き抜け破壊あるいは，ボルト破断が生じた。孔内清掃を施していない C-B130_75 試験体シリーズの方が孔内清掃を実施した C-A130_75 試験体シリーズに比べて，破壊時の平均繰り返し荷重回数が小さくなったが，変動係数や破壊形態の状況を鑑みれば，本実験の範囲内では両者に明確な差異は生じていないものと考えられる。

表－3　繰り返し荷重載荷試験結果

荷重種別	試験体シリーズ	繰り返し回数(回)	平均繰り返し回数(回)	変動係数(%)	破壊形態
繰返しCシリーズ	C-A130_0	2000000	2000000	―	(破断)
		2000000			(破断)
		2000000			(破断)
	C-A130_50	1000000	1000000	―	(破断)
		1000000			(破断)
		1000000			(破断)
	C-B130_50	1000000	1000000	―	(破断)
		1000000			(破断)
		1000000			(破断)
	C-A130_75	287012	271596	14.131	引き抜け
		256180			破断
		348508			破断
	C-B130_75	44040	161087	51.433	引き抜け
		224254			破断
		214967			破断

※破壊形態において(　)で表記したものは，繰り返し荷重試験で破壊に至らず，その後に静的引張荷重載荷試験を行った際の破壊形態



図－6　各定着長の周波数応答関数（清掃有り）

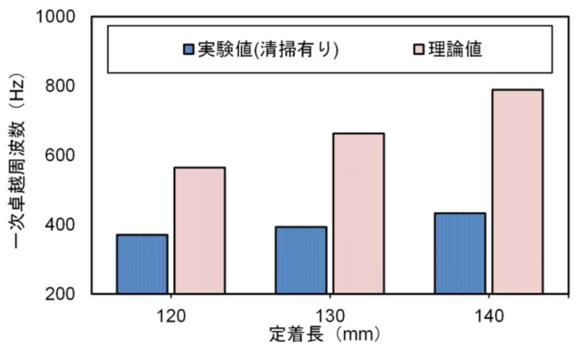
4.　打撃試験結果

4.1.　定着長が打撃応答特性に及ぼす影響

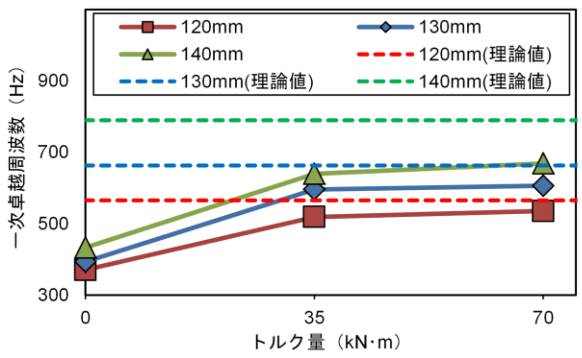
図－6 に S シリーズ試験体の周波数応答関数を示す。ここで周波数応答関数（伝達関数）とは，インパルスハンマーによって得られた打撃の周波数スペクトルで，加速度センサーによって出力された周波数スペクトルを各周波数域で正規化したものである。本研究では，測定ノイズの影響を低減するため，式(1)より算出した。

$$H(f)=\frac{Y(f)}{X(f)}=\frac{Y(f)X(f)^*}{X(f)X(f)^*}=\frac{C_{xy}}{P_{xx}(f)} \qquad (1)$$

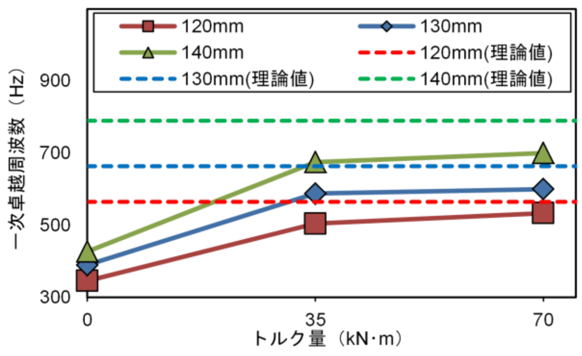
ここで，$H(f)$：周波数応答関数，$Y(f)$：加速度センサーの周波数スペクトル，$X(f)$：インパルスハンマーの



図－7　S-A 試験体シリーズにおける一次卓越周波数と理論値



（a）　清掃有りの場合



（b）　清掃無しの場合

図－8　各トルク量における一次卓越周波数と理論値

周波数スペクトル，$X(f)^*$：インパルスハンマーの周波数スペクトルの複素共役，C_{xy}：インパルスハンマーと加速度センサーの周波数スペクトルのクロススペクトル，$P_{xx}(f)$：インパルスハンマーのパワースペクトルである。なお，図－6 に示す各試験体シリーズの周波数応答関数は，代表的な 1 体の周波数応答関数である。定着長 140mm の試験体シリーズを除き，全ての試験体で卓越周波数は三次まで確認された。定着長が 140mm の試験体シリーズでは，測定範囲外の 8kHz 以上の周波数帯域に三次の卓越周波数が存在すると考えられる。

図－7 に S-A シリーズ試験体における一次卓越周波数とアンカーボルトの固有振動数（理論値）を示す。また，図－7 に示す一次卓越周波数は，試験体 3 体の均値である。なお，各定着長の理論値は，アンカーボルト突出部のコンクリートとの境界部を固定，突出部先端を自由として，式(2)より算出した。

$$f=\frac{1}{2\pi}\frac{\lambda^2}{L^2}\sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \qquad (2)$$

ここで，λ 値：1.875，L：突出長（110mm～130mm），E：ヤング係数（200000N/mm^2），I：断面二次モーメント（1798.4mm^4），ρ：密度（7.865g/cm^3），A：断面面積（157mm^2）である。

各試験体の周波数応答関数における一次卓越周波数は，いずれも理論値の値を下回った。また，定着長が長いほど，理論値からの低下割合が大きくなった。これより，トルクを導入していないため試験体端面より深部まで振動していることが確認された。

4.2. 締め付けトルクの大きさが打撃応答特性に及ぼす影響

図－8 に各トルク量における一次卓越周波数と理論値を示す。孔内清掃の有無によらず，トルク量の増加にしたがい，卓越周波数が高周波側にシフトしている。また，トルク量の増加に従い卓越周波数は，理論値に近づく結果となった。これは，トルクの導入によって，アンカーボルト突出部の下端部が固定され，アンカーボルトの振動特性が，突出部分のアンカーボルトの振動特性に近づくためであると考えられる。このように，締め付けトルクの，大きさによって卓越周波数は変化するため，打音点検の際はトルクを一定にする必要があると考えられる。

なお，本実験の範囲内では，トルクの導入による卓越周波数の変化に孔内清掃有無の影響は確認できない。

4.3. 常時負荷荷重が打撃応答特性に及ぼす影響

ここで常時負荷荷重とは，道路付属物を付属している際の本体の荷重であり，本実験では，繰り返し荷重載荷時の下限値である。C-A130_0 試験体シリーズと C-A130_50 試験体シリーズの繰り返し荷重載荷前の一次卓越周波数に対する繰り返し荷重載荷後の一次卓越周波数の比（卓越周波数比）を図－9 に示す。常時負荷荷重の有無によらず，繰り返し荷重を載荷することで，一次卓越周波数は低下した。その卓越周波数比は，常時負荷荷重有りの場合と常時負荷荷重無しの場合でそれぞれ 0.97 と 0.93 であり，常時負荷荷重による違いは認められなかった。

4.4. 孔内清掃の有無が打撃応答特性に及ぼす影響

(1)　S シリーズ試験体

図－10 に各削孔深さにおける一次卓越周波数を示す。

静的引張荷重載荷試験でボルト破断を生じた定着長130mm と 140mm の試験体では，清掃の有無による一次卓越周波数に明確な差異は生じていなかった。一方，定着長 120mm の試験体シリーズでは，清掃有りの S-A120 試験体に比べて，清掃無しの S-B120 試験体の卓越周波数が約 7%低下した。引張荷重載荷試験において，S-B120 試験体では引き抜け破壊が見られ，付着強度の低下が確認されており，アンカーボルトの定着不良による影響が一次卓越周波数に現れたと考えられる。

(2)　C シリーズ試験体

各トルク量における疲労前後の一次卓越周波数を図－11 に示す。トルクが導入されていない状態では，孔内清掃の有無によらず，卓越周波数は低周波側にシフトする傾向にあった。一方，トルク量が 35kN・m と 70kN・m の場合の卓越周波数は，疲労前後の卓越周波数に明確な変化は認められなかった。前述したようにトルクの導入によって，アンカーボルトの打撃応答特性が突出部のアンカーボルトの振動特性に近づいたためであると考えられる。

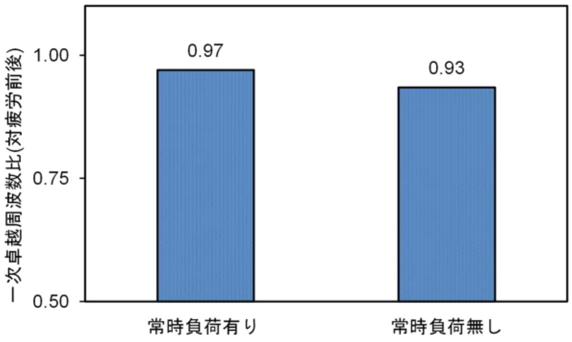
5.　まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

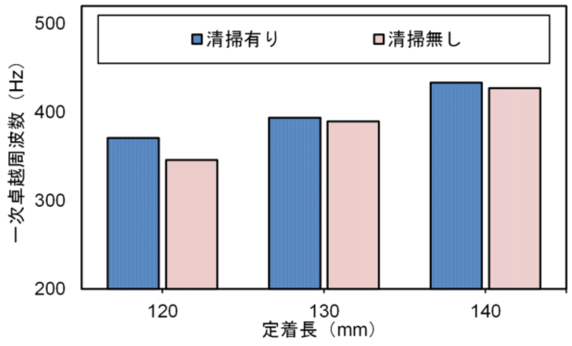
(1)　本実験の範囲内では定着長が標準施工の約 92%の場合，孔内清掃を行わないことによる平均最大荷重の低下が認められた。

(2)　トルク量の増加に従い卓越周波数は，理論値に近づく結果となった。これは，トルクの導入によって，アンカーボルト突出部の下端部が固定され，アンカーボルトの振動特性が，突出部分のアンカーボルトの振動特性になるためであると考えられる。したがって，締め付けトルクの大きさによって卓越周波数は変化するため，打音点検の際はトルクを一定にする必要があると考えられる。

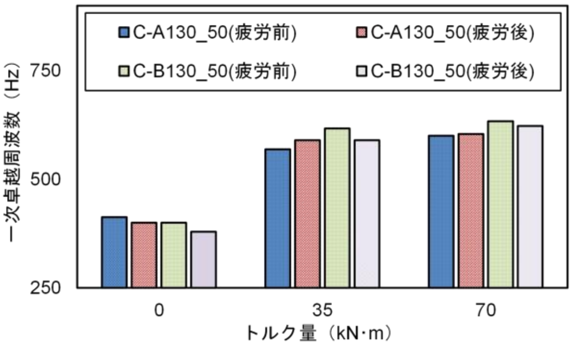
(3)　本実験の繰り返し荷重載荷試験では，孔内清掃の有無および常時負荷荷重が付着性能に及ぼす影響は認められなかった。打撃試験において，疲労による卓越周波数の低下が確認されたが，その変化は小さかった。



図－9　常時負荷荷重よる一次卓越周波数比



図－10　各削孔深さにおける一次卓越周波数



図－11　各トルク量における清掃の有無と繰り返し荷重載荷前後の一次卓越周波数

参考文献

1)　国土交通省：トンネル天井板の落下事故に関する調査・検討委員会報告書，2013

2)　土木学会：コンクリートのあと施工アンカー工法の設計・施工指針（案），コンクリートライブラリー141，2014

3)　日本コンクリート工学会：あと施工アンカーの耐久性評価と設計方法の高度化研究委員会報告書，2016

4)　舟波尚哉，高橋知也，池田富士雄，井山徹郎，村上祐貴：繰り返し荷重を受けた接着系あと施工アンカーの打撃応答特性に基づく付着性能評価に関する基礎的研究，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，Vol.17，pp.89-94，2016

5)　前川晴香，内田慎哉，鎌田敏郎，宮田弘和：アンカーボルト打撃時の応答特性に着目した接着剤充填状況の非破壊評価手法，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp.1693-1698，2015

6)　山本貴大，鎌田敏郎，寺澤広基，服部晋一：電磁パルス法による接着系あと施工アンカーの施工不良を対象とした非破壊評価手法，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，Vol.17，pp.95-100，2016