

論文 無機系あと施工アンカーの電磁パルス法による非破壊評価

安藤 重裕*1・加賀 敏明*2・濱崎 仁*3

要旨：無機系あと施工アンカーに対する孔内の清掃水準と付着強度へ及ぼす影響および清掃不良による付着強度と電磁パルス法の評価の関係性を調べた。清掃不良により付着強度が低下し、電磁パルス法により、無機系アンカーについても有機系アンカーと同様に非破壊検査により清掃不良の評価が可能であることを確認した。また、電磁パルス法の受信信号の時間軸波形とその周波数スペクトルの特徴を評価指標で数値化することにより、評価値合計と付着強度の相関が認められ、付着強度が非破壊検査により推定可能であることが示唆された。

キーワード：あと施工アンカー、無機系アンカー、電磁パルス法、非破壊検査

1. はじめに

あと施工アンカーの施工後の品質検査は、自主検査として、ハンマーによる接触打音検査が行われ、必要に応じて非破壊引張試験が行われている¹⁾。しかし、接触打音検査は検査精度が検査員の技量に左右され、客観的な検査診断はなされていない。また、非破壊引張試験の本数や回数は、立会検査に準じて行われるため、試験数が限られる。さらにアンカー筋に荷重を加えるため試験後のアンカー強度に影響を及ぼす可能性がある。

あと施工アンカーの品質に影響を及ぼさない非破壊検査方法として、電磁パルス法を用いた定着部の健全性を評価する方法が提案されている^{2)・8)}。この非破壊検査方法の検証において、有機系カプセル式、有機系注入式、無機系カプセル式のあと施工アンカーに対する検証が行われてきた。しかし、無機系注入式アンカーの適用については、検証がなされていない。

また、あと施工アンカーの孔内の清掃状態が付着強度に大きな影響を及ぼし、清掃不良の場合は付着強度が大きく低下することが報告されている^{9)・10)}。施工の影響と電磁パルス法の健全性評価については、空隙等の施工不良に対する検証はなされているが、清掃水準の影響と健全性の評価についての検証は十分とは言えない。

本稿では、無機系注入式あと施工アンカーについて、穿孔後の清掃水準を変化させて、付着強度と電磁パルス法の評価の相関性を検討した。

2. 実験概要

2.1 試験材料

表-1 に使用した材料の物性値を示す。母材コンクリートの圧縮強度が 22.6N/mm²、コンクリート寸法は 1700×800×400mm の無筋コンクリートブロックを用いた。試験に使用した無機系あと施工アンカーは、カートリッジ内に超速硬セメント、砂等が配合された粉体に水を注入し、攪拌して用いるプレ混合式であり、水結合材比 0.38 で混合して使用した。

アンカー筋は、D13 の高強度鉄筋を使用し、先端形状は寸切りとした。

2.2 試験水準

穿孔に使用した機器は、ハンマードリルと湿式コアドリルの 2 水準とし、穿孔径は φ18mm、アンカー筋の有効埋込み長さが 91mm (7da) となるように、下向きで穿孔を行った。

清掃水準は、ハンマードリルおよび湿式コアドリルにおいて、粉じんおよびノロの吸引、ブラシ掛け回数を変えて調整した。清掃条件を表-2 に示す。清掃条件は、ハンマードリル穿孔、湿式コアドリル穿孔を合わせ、計 8 条件とし、1 条件につき 5 本試験を実施した。粉じんおよびノロの吸引は、乾式湿式兼用集じん機により行い、ブラシ掛けは、アンカー用ナイロンブラシを用いた。

湿式コアドリルの穿孔において、濃厚なノロを孔内に残存させるための W-1、W-2 の試験体では、穿孔時の水

表-1 使用材料の物性

コンクリート母材強度		アンカー材強度				アンカー筋			
圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)	タイプ	硬化剤	圧縮強度	静弾性係数	径	種類	降伏点強度	静弾性係数
				(N/mm ²)	(kN/mm ²)			(N/mm ²)	(kN/mm ²)
22.4	22.6	プレ混合式	水	64.1	65.1	D13	高強度鉄筋 MK785	791	190
22.7				25.6					
22.7				25.8					

*1 住友大阪セメント (株) セメント・コンクリート研究所 博士 (工学) (正会員)

*2 (株) アミック マネージャー 博士 (工学)

*3 芝浦工業大学建築学部建築学科 教授・博士 (工学) (正会員)

表-2 孔内清掃条件

試験番号	穿孔方法	ブラシ掛け回数	粉じん吸引、ノロ清掃
D-1	ハンマードリル	0回	粉じん吸引なし
D-2		0回	粉じん吸引のみ
D-3		1回	粉じんを吸引し、1回ブラシ掛け後に再度粉じん吸引
D-4		3回	粉じんを吸引し、3回ブラシ掛け後に再度粉じん吸引
W-1	湿式コアドリル	0回	ノロ吸引を行わず、濃厚なノロを孔内に残す
W-2		0回	穿孔後の孔内ノロ吸引のみ行う
W-3		0回	穿孔直後にビットを挿入したまま孔内流水を行う
W-4		1回	W-3の穿孔後、乾燥&1回ブラシ掛けし、流水洗浄して洗浄水を吸引して乾燥

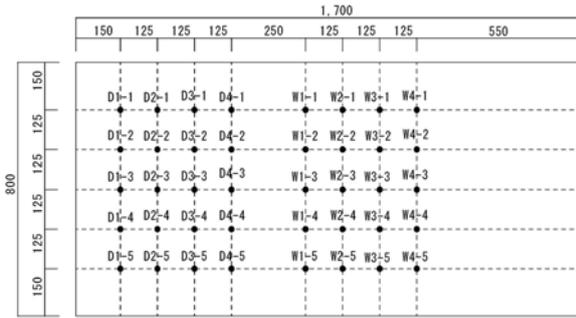


図-1 試験施工箇所

量を極力減少させて、孔内にノロを残させた。W-3、W-4の試験体については、通常施工で実施する水量にて穿孔を行い、各条件に従い清掃を行った。試験体の施工箇所を図-1に示す。

各試験条件で孔内の状況をマイクロスコープで観察し、観察は穿孔直後および湿式コアドリルについては、翌日についても観察した。アンカー定着は、穿孔した翌日に行い、定着においては、アンカー材を孔底より注入した後に、アンカー筋を挿入した。

アンカー筋定着後 28 日以上養生した後に、電磁パルス法による非破壊検査を実施し、その後に付着試験を行った。なお、アンカー筋の埋め込み長さは、アンカー筋の長さから、コンクリートから突出したアンカー筋の長さを差し引き算出した。

2.3 非破壊検査

非破壊検査は、参考文献 8)に示す電磁パルス法により行った。図-2 に測定概要、図-3 に測定状況写真を示す。アンカー筋頭部にリング状のコイルを設置しアンカー筋に弾性波を発生させる。発生した弾性波をアンカー筋の頭部と近傍のコンクリート表面に設置した AE センサで受信し、受信信号を解析してアンカー定着部の健全性を評価する。コイルはウレタンスポンジで固定した。AE センサは、アンカー筋頭部に 1 個、コンクリート表面においてアンカー筋から 40mm の位置に 1 個設置してデータを採取した。アンカー筋頭部のセンサを固定しコンクリート表面に設置するセンサを付替えながらコンクリート表面の直交方向 4 箇所で行った。参考文献 8)ではコンクリート表面に設置する AE センサとアンカ

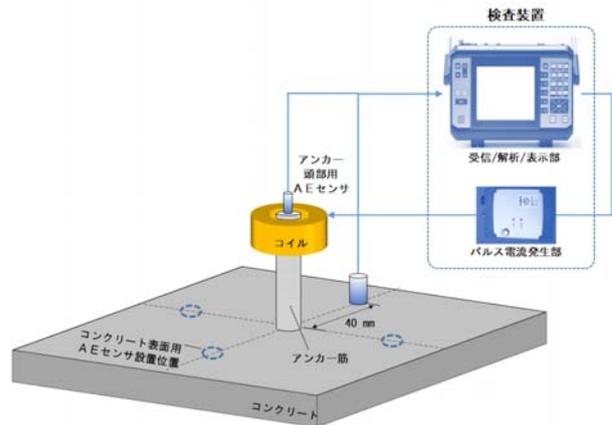


図-2 測定概要



図-3 測定状況写真

表-3 評価指標と判定基準

評価指標	記号	特徴	判定基準
波形エネルギー比	ER	コンクリート表面の時間軸データの二乗和をアンカー筋頭部の時間軸データの二乗和で除した値	正規施工の最小値未満
波形継続時間	DT	時間軸波形で最大振幅（絶対値）に対して10%未満に減衰するまでの時間	正規施工の最大値超
スペクトル重心周波数	SC	2.5 kHz~50kHzまでの最大ピーク周波数の±2.5(kHz)のスペクトルの重心周波数	正規施工の最小値未満
スペクトル標準偏差	SD	2.5 kHz~50kHzまでの最大ピーク周波数の±2. (kHz)のスペクトルの標準偏差	正規施工の最小値未満
スペクトルピーク数	SP	2.5kHz~50kHzのスペクトルのピーク数	正規施工の最大値超
スペクトル相関係数	CF	正規施工のスペクトルデータ（基準データ）の平均値に対する各測定点スペクトルデータの相関係数	正規施工の最小値未満

一筋との距離を 100mm としているが、アンカー筋の離隔が小さくアンカーの埋込長さが短いため 40mm とした。評価は表-3 に示す 6 種類の評価指標⁸⁾で行った。そ

れぞれの特徴と判定基準を併記している。この判定基準に従い不良と判定した場合はNG (Not Good) 8)ポイントを付与する。不良の程度の大きいアンカーほどNGポイントが多く付く傾向となる。本稿ではNGポイントを評価値と称する。評価値合計の最悪値は48点、正規の手順通りに施工したアンカー（以下、正規施工品）は0点である。正規施工品は試験番号のD-4とW-4とした。

2.4 付着試験

図-4に加力・測定装置図を示す。加力は付着破壊を起こさせるために反力板（厚さ38mm、孔径30mm）を試験体の上に設置し、反力板の上にラムチェアー、センターホールジャッキおよび球座を設置し、試験体に引張力を導入した。測定は荷重およびアンカー筋の拔出量とした。アンカー筋の拔出量の載荷端変位の測定箇所は、コンク

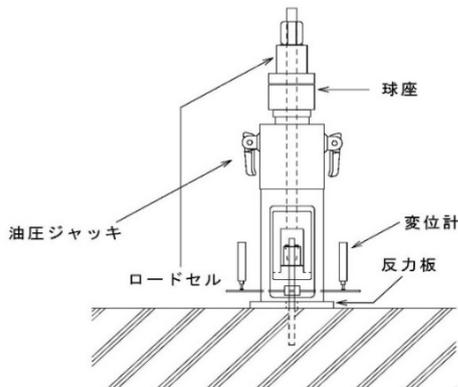


図-4 加力・測定装置

リート表面より50mmの高さとした。

3. 試験結果

3.1 定着前孔内状況

乾式および湿式穿孔後のマイクロスコープによる観察結果を図-5に、図-6に湿式穿孔において、濃厚なノロの状態を示す。

D-1とD-2では、孔内壁面に白色粉じんが残存し、付着していた。一方、D-3とD-4では、残存した粉じんはほとんど観察されなかった。W-1、W-2において、穿孔直後は底部にノロが滞留している状況が観察されたが、壁面にノロは、顕著には観察されなかった。乾燥後の状況では底部に乾燥固化したノロが観察された。W-3とW-4では、目視上ほとんど残存ノロおよび粉じんは見られな



図-6 濃厚なノロの状態

乾式	D-1	D-2	D-3	D-4
穿孔直後				

湿式	W-1	W-2	W-3	W-4
穿孔直後				
乾燥後				

図-5 定着前孔内状況

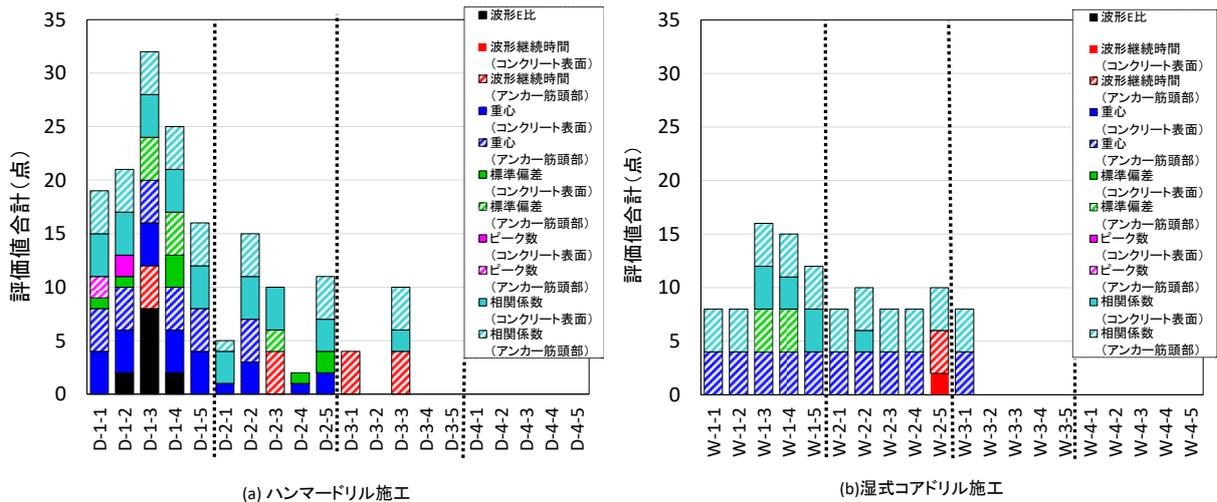


図-7 評価値結果

かった。

3.2 非破壊検査結果

評価値の結果を図-7に示す。ハンマードリルにより穿孔し、清掃水準の低かったD-1では、評価値合計が20点程度であり、他と比べ高い傾向であった。また、ハンマードリルでは、スペクトル相関係数で評価値が高い傾向であった。

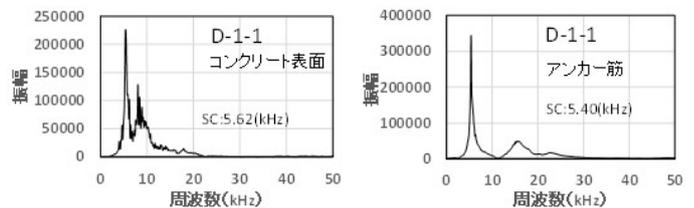
湿式コアドリルによる穿孔で、清掃状態の悪いW-1では評価値合計は10点程度であり、コンクリート表面よりアンカー筋頭部での評価値が高い傾向となった。

図-8に清掃不良試験体と正規施工品との周波数スペクトルを示す。メーカーが規定する正規施工は、穿孔後に孔内を3回以上ブラシ掛けと吸塵を行うものである。正規施工品に比べ清掃不良品では、ハンマードリル、湿式コアドリルともに周波数スペクトルの重心スペクトル(図中にSCと記載)が低周波数側へシフトする傾向が認められた。清掃不良により付着部の剛性が低下する、つまり拘束が緩くなることで固有振動数が低下したためである。したがって、接着剤の種類が変わると付着部の剛性が変わるため、剛性が同等な施工条件となるグループで評価しなければならない。

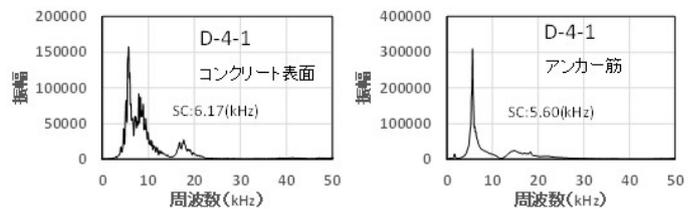
また、表-4にコンクリート表面のスペクトル相関係数を示す。ハンマードリルでは、正規施工品D-4(5本×4箇所=20箇所)の平均値が0.97、清掃不良品D-1の平均値が0.81、湿式コアドリルでは、正規施工品W-4の平均値が0.96、清掃不良品W-1の平均値が0.90であり、正規施工品に比べ清掃不良品では相関係数が小さくなる傾向が認められた。アンカー筋頭部のスペクトル相関係数も同様の傾向だった。

3.3 付着強度

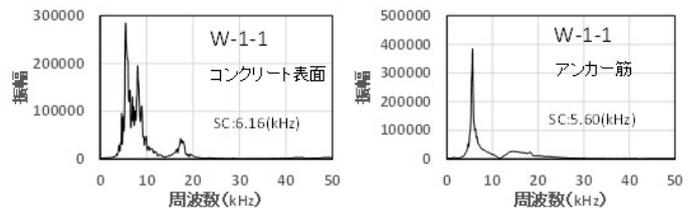
付着強度試験結果を表-5に、荷重変位曲線を図-9に示す。正規施工品の付着強度は、ハンマードリルで



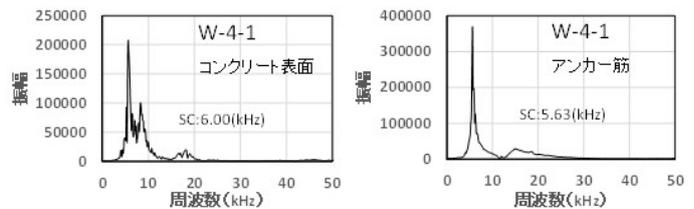
(a)ハンマードリル 清掃不良



(b)ハンマードリル 正規施工



(c)湿式コアドリル 清掃不良



(d)湿式コアドリル 正規施工

図-8 周波数スペクトル

表-4 コンクリート表面のスペクトル相関係数

ハンマードリル			湿式コアドリル		
試験番号	相関係数*	平均値	試験番号	相関係数*	平均値
D-1-1	0.84	0.81	W-1-1	0.95	0.90
D-1-2	0.80		W-1-2	0.94	
D-1-3	0.76		W-1-3	0.88	
D-1-4	0.80		W-1-4	0.89	
D-1-5	0.84		W-1-5	0.85	
D-4-1	0.95	0.97	W-4-1	0.96	0.96
D-4-2	0.97		W-4-2	0.96	
D-4-3	0.96		W-4-3	0.93	
D-4-4	0.98		W-4-4	0.98	
D-4-5	0.98		W-4-5	0.97	

*コンクリート表面4箇所 の平均値

19.5N/mm²、湿式コアドリルで 21.7N/mm² であり、標準偏差は、1.6N/mm² 以下であった。清掃不良の D-1、W-1 の標準偏差については、正規品の 2 倍程度のばらつきとなった。また、埋込長さについても、孔内に残存した粉じん、ノロにより目標とした定着長を確保出来ない試験体もあった。正規品に対する付着強度は、清掃不良の D-1 では、40%程度、W-1 では 65%程度であり、いずれの施工方法においても正規の施工を行わない場合、清掃不良の影響により付着強度が低下することが確認された。清掃不良の抜け出し挙動は、ハンマードリル施工の場合、D-1 の荷重変位曲線は、初期からゆっくり抜け続ける状況であり、無機系アンカーに特徴的である脆性的な破壊は認められなかった。D-2 では一旦アンカー筋が抜け出した後に、抜け出し量が 1.5 から 4mm 程度で荷重が上がる状況となった。これはアンカー筋が抜け始めた時にモルタルあるいはコンクリートの一部が破壊し、孔壁の間に破壊片が挟まり、アンカー筋が徐々に抜けることを阻害したことが考えられる。

D-3、D-4では、アンカー筋がD-1、D-2のように徐々に抜け出す挙動は認められず、孔壁面とアンカー材の滑りは生じていなかった。これらの結果より、ハンマードリルでの施工において、ブラシ掛けが重要であることが確認された。

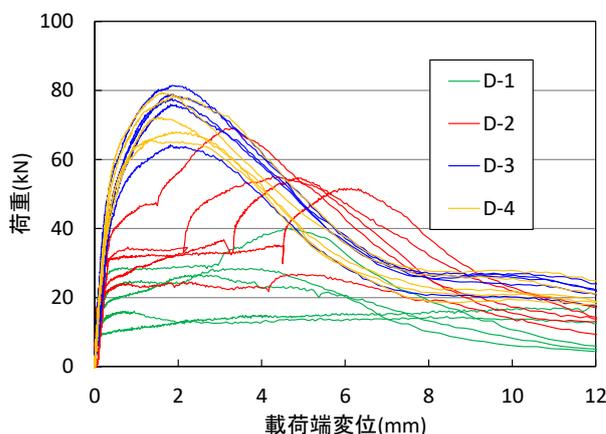
湿式コアドリルにおける抜け出し挙動においては、いずれの清掃水準においても、載荷端変位で 1mm 程度までに最大耐力に達していた。清掃水準の低いものにおいても、最大耐力後は、D-2 のように途中で荷重が上がるような状況は認められなかった。この抜け出し挙動の違いについては、湿式コアドリルではハンマードリルに比べ、孔壁の凹凸が少ないため、D-2 では、この影響が表れた可能性がある。

3.4 付着強度と非破壊評価値の関係

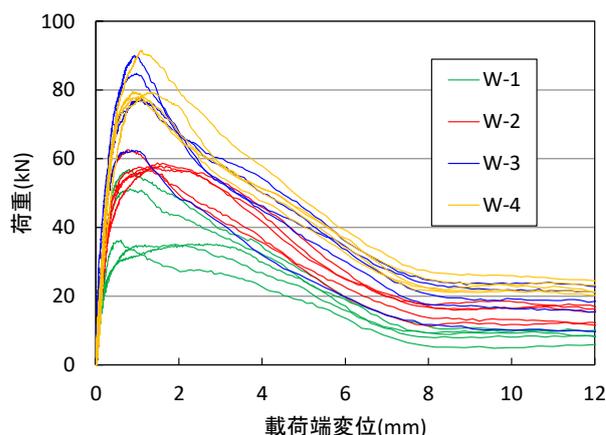
図-10 に評価値合計と付着強度の関係を示す。ハンマードリル、湿式コアドリルのいずれにおいても、評価値合計が高いほど、付着強度は低くなる傾向であり、評価

表-5 付着強度試験結果

ハンマードリル					湿式コアドリル					
試験番号	埋込長さ (mm)	付着強度 (N/mm ²)			試験番号	埋込長さ (mm)	付着強度 (N/mm ²)			
		平均値	標準偏差				平均値	標準偏差		
D-1	-1	83.0	12.1	7.6	2.9	-1	90.4	15.8	12.4	2.5
	-2	85.6	4.7							
	-3	87.9	5.3							
	-4	86.2	7.7							
	-5	87.1	8.2							
D-2	-1	90.1	19.2	13.8	4.3	-1	90.4	16.1	16.1	0.7
	-2	92.4	7.3							
	-3	94.7	14.6							
	-4	95.1	14.4							
	-5	95.7	13.5							
D-3	-1	96.3	20.2	19.7	1.5	-1	90.5	21.5	21.2	2.6
	-2	97.1	21.0							
	-3	97.4	20.3							
	-4	94.5	17.0							
	-5	95.9	19.9							
D-4	-1	92.1	19.7	19.5	1.6	-1	90.8	21.5	21.7	1.3
	-2	95.5	17.8							
	-3	93.3	21.0							
	-4	92.1	17.9							
	-5	95.1	20.9							



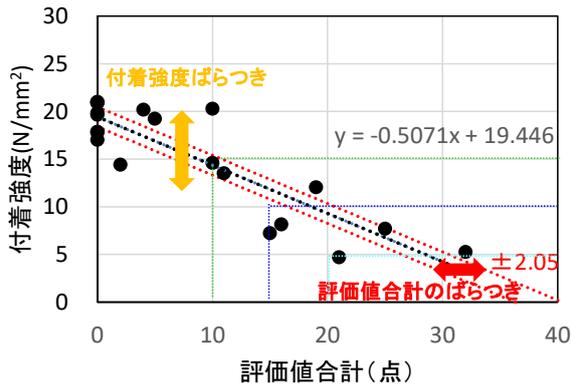
(a)ハンマードリル施工



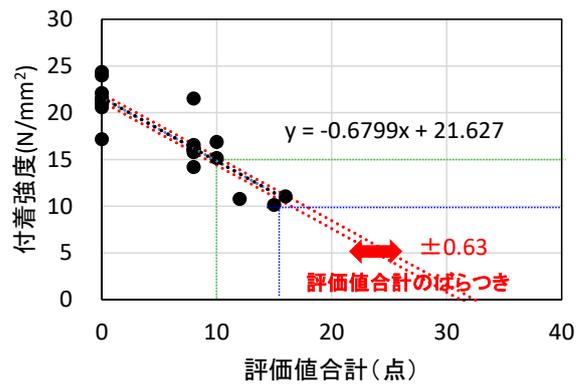
(b)湿式コアドリル施工

図-9 荷重変位曲線

値合計が 10 点以上で付着強度は約 15N/mm² 以下、15 点以上で約 10N/mm² 以下、20 点以上で 5N/mm² 程度であった。



(a) ハンマードリル施工



(b) 湿式コアドリル施工

図-10 評価値合計と付着強度

付着強度および評価値合計のばらつきをそれぞれ 1σ まで考慮してみる。測定 のばらつきは、評価値合計のばらつきから付着強度のばらつきによる変動分を差し引いたものになるのでこれを計算すると、ハンマードリルでは ± 2.05 点、湿式コアドリルは ± 0.63 点となり、経験上得られている測定 のばらつきとほぼ一致する。ハンマードリル、湿式コアドリルともに 20 点以上であれば付着強度は $10\text{N}/\text{mm}^2$ を下回り、非破壊検査により付着強度不足の判定が可能であると推測される。また、評価値合計と付着強度の関係は、ハンマードリル、湿式コアドリルともに概ね同様であり、付着強度が低い場合には、非破壊で付着強度の測定ができるものと推測される。

4. まとめ

- 1) 電磁パルス法により、無機系注入式あと施工アンカーについても有機系アンカーと同様に清掃不良の評価が可能であることを確認した。
- 2) ハンマードリルによる施工及び湿式コアドリルによるメーカー規定による施工を行わない場合、付着強度が低下することが確認された。
- 3) ハンマードリルおよび湿式コアドリルの施工において、無機系あと施工アンカーの電磁パルス法による検査で、電磁パルス法の評価を点数化することにより、評価値合計と付着強度の相関が認められ、付着強度が低い場合には、非破壊で強度の推定可能であると考えられる。

参考文献

- 1) 日本建築あと施工アンカー協会：あと施工アンカー施工指針（案）【接着系/カプセル方式】，pp.46-48, p.50, 2016.7
- 2) 宮田弘和ほか：電磁パルス法に基づくアンカーボルト固着部の健全度評価に関する実験的検討，日本非破壊検査協会平成 25 年度秋季講演大会講演概要集，

- pp.33-36, 2013.11
- 3) 三輪秀雄，高坂信，橋本光男：電磁パルス法による全面定着方式ロックボルト定着部の非破壊的評価手法の検討，土木学会第 70 回年次学術講演会講演概要集，pp.255-256, 2015.9
- 4) 高鍋雅則ほか：電磁パルス法を用いたあと施工アンカーボルト定着部の評価に関する検討，日本非破壊検査協会平成 27 年度秋季講演大会講演概要集，pp.75-78, 2015.10
- 5) 高鍋雅則，三輪秀雄，加賀敏明，長岡康之：電磁パルス法によるあと施工アンカーボルトの健全性評価結果の精度に関する研究，日本非破壊検査協会平成 28 年度秋季講演大会講演概要集，pp.91-94, 2016.10
- 6) 加賀敏明ほか：電磁パルス法によるあと施工アンカーボルト定着部の健全性評価 一評価指標の検討一，日本非破壊検査協会平成 29 年度秋季講演大会講演概要集，pp.179-182, 2017.10
- 7) 加賀敏明ほか：電磁パルス法によるあと施工アンカーボルト定着部の定量的評価，日本非破壊検査協会第 25 回超音波による非破壊評価シンポジウム講演論文集，pp.65-182, 2018.1
- 8) 加賀敏明ほか：電磁パルス法によるあと施工アンカーボルト定着部の定量部の定量的非破壊評価，日本建築学会技術報告集，第 25 巻，第 60 号，pp.603-308, 2019.6
- 9) 名古屋一彦ほか：接着系あと施工アンカーの孔内清掃の違いが付着性能に与える影響，日本建築学会大会学術講演梗概集 構造IV，pp.113-114, 2018.9
- 10) 田村努ほか：超速硬セメント系注入式あと施工アンカーの付着特性 その 17 清掃による影響，日本建築学会大会学術講演梗概集 構造IV，pp.353-354, 2019.9