電磁パルス法によるあと施工アンカー一定着部の定量的非破壊評価における判定方法の検討

EXAMINATION OF JUDGMENT PROCESS IN QUANTITATIVE NONDESTRUCTIVE EVALUATION OF ANCHORAGE ZONE OF POST-INSTALLED ANCHOR BY USING ELECTROMAGNETIC PULSE METHOD

加賀敏明 — * 1 三輪秀雄 — * 2
高鍋雅則 — * 3 和高修三 — * 4
長岡康之 — * 5 濱崎 仁 — * 6

Toshiaki KAGA — * 1 Hideo MIWA — * 2
Masanori TAKANABE — * 3 Shusou WADAKA — * 4
Yasuyuki NAGAOKA — * 5 Hitoshi HAMASAKI — * 6

キーワード：

定量的非破壊評価, あと施工アンカー一定着部, 電磁パルス法, 弾性波, 評価指標

Keywords:

Quantitative nondestructive evaluation, Anchorage zone of post-installed anchor, Electromagnetic pulse method, Elastic wave, Evaluation index

We proposed an improved evaluation process for the quantitative nondestructive evaluation of anchorage zone of post-installed anchor by using electromagnetic pulse method. We changed the method of assigning NG points for each index value so that there is a difference depending on the amount that deviates from the judgment threshold. The improved process can evaluate the degree of the defectiveness, and the effectiveness was demonstrated by comparing with the conventional one.

1. はじめに

筆者らは、あと施工アンカー一定着部の健全性評価手法として、電磁パルス法によるあと施工アンカー一定着部の定量的非破壊評価法を提案しており^{1)~6)}、前報⁷⁾において、健全なアンカーと施工不良を模擬した短期荷重を負担させるアンカー供試体（コンクリート塊供試体）および長期荷重を負担させるアンカー供試体（コンクリート塊供試体、建築実構造物供試体）に適用することでその有効性を確認している。その提案では、まず、正規施工アンカーで測定した弾性波の時間軸波形および周波数スペクトルの特徴から6種類の評価指標値を求め、それぞれでの最大値または最小値を判定閾値とする。次に評価対象アンカーで測定したデータから同じように評価指標値を求め、その値が判定閾値から外れたものに対して点数（以下、NGポイントという）を付与し、その合計点で不良の程度を評価している。しかし、この判定方法では、各評価指標値がその判定閾値から大きく外れていても僅かに外れた場合と一律に同じNGポイントを付与するため、不良の程度に差が付きにくいという課題があった。本稿は、各評価指標値が判定閾値から外れた量に応じて差が付くようにNGポイントの付け方を検討したものであり、この判定方法を短期荷重を負担させるアンカー供試体および長期荷重を負担させるアンカー供試体に適用し、従来の判定方法と比較することでその有効性を確認した。

2. 短期荷重を負担させるアンカーによる判定方法の検討

2.1 供試体

図1 コンクリート塊供試体

図2 アンカーの施工図

^{*1} ㈱アミック マネージャー・博士（工学）
（〒230-0051 横浜市鶴見区鶴見中央4-36-1）

^{*2} ㈱アミック 専務取締役

^{*3} ㈱アミック 部長

^{*4} ㈱アミック 技術顧問・博士（工学）

^{*5} ㈱アミック 代表取締役

^{*6} 芝浦工業大学建築学部建築学科 教授・博士（工学）

^{*1} Manager, AMIC Co., Ltd., Dr.Eng.

^{*2} Senior Managing Director, AMIC Co., Ltd.

^{*3} Director, AMIC Co., Ltd.

^{*4} Technical Adviser, AMIC Co., Ltd., Dr.Eng.

^{*5} President, AMIC Co., Ltd.

^{*6} Prof., Dept. of Architecture, School of Architecture, Shibaura Institute of Technology, Dr.Eng.

表 1 施工種類による分類

施工種類	アンカーNo.	合計本数	備考
①正規施工	No. 1, No. 13, No. 25, No. 34	18	
②奥充填	No. 4, No. 6, No. 26	6	接着剤充填不足
③手前充填	No. 27, No. 28	9	接着剤充填不足
④過剰撈拌	No. 5, No. 29	6	撈拌時間延長 + 15秒
⑤ブラシ掛けなし	No. 16	3	下穴の清掃不良
⑥ボルト短い	No. 2, No. 3	6	正規8Dを5Dと3Dに切断
⑦水混入	No. 17	3	水没（下穴を満水状態）
⑧ボルト短い・水混入	No. 18, No. 19	6	水没（下穴を満水状態） 正規8Dを5Dと3Dに切断

【共通】 定着種類（接着剤）：有機系カプセル（エポキシアクリレート）
アンカー種類（材質）：全ネジボルト（SNB7）
呼び径：M16

計測時間短縮や測定 of 簡便性向上を目的として、コンデンサやチャージ電圧、センサ個数の変更による装置改良を行ったため、前報⁷⁾ で使用した供試体にて再度、データを取得した。データの取得方法等は前報⁷⁾ を参照されたい。取得したデータのうち有機系カプセルで定着させたアンカーのデータを使って判定方法の検討を行った。図1にコンクリート塊供試体、図2に施工図、表1に施工種類ごとの分類を示す。母材コンクリートは、1800mm×900mm×450mmの直方体が複数個あり、正規施工が18本、施工不良が7種類計39本を対象としている。

2.2 従来の判定方法による評価

評価指標と判定基準を表2に示す。表中に示す受信箇所 of コンクリート表面はアンカー筋周囲4箇所 でセンサを付け替えながら測定し、アンカー筋頭部もその都度の測定で計4回測定している。評価指標には新たに時間軸波形 of 相関係数 CF_t を追加しているが、評価は従来の判定方法で行っている。波形エネルギー比、波形継続時間、スペクトルの重心周波数、スペクトルの標準偏差、スペクトルのピーク数、スペクトルの相関係数の計算方法に関しては前報⁷⁾ を参照されたい。時間軸波形 of 相関係数 CF_t は、評価対象品の時間軸波形 $x_i(i=1\sim N)$ との相関係数として定義し、式(1)で計算した。

$$CF_t = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_{AVi} - \bar{x}_{AVi})(x_i - \bar{x}_i)}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_{AVi} - \bar{x}_{AVi})^2} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x}_i)^2}} \quad (1)$$

ここで、 $x_{AVi}(i=1\sim N)$ はあらかじめ測定した正規施工品複数本の時間軸波形平均値、 $x_i(i=1\sim N)$ は評価対象の時間軸波形平均値、 N は

表 2 評価指標と判定基準

評価指標	記号	受信箇所	判定基準	NGポイント
波形エネルギー比	ER	コンクリート表面/アンカー筋頭部	基準アンカーの最小値未満	2点×4箇所NGで計8点
波形継続時間	DT	アンカー筋頭部 コンクリート表面	基準アンカーの最大値超	アンカー筋頭部 1点×4箇所NGで計4点 + コンクリート表面 1点×4箇所NGで計4点 ↓ 8点×6評価指標計48点
スペクトル重心周波数	SC	アンカー筋頭部 コンクリート表面	基準アンカーの最小値未満	
スペクトル標準偏差	SD	アンカー筋頭部 コンクリート表面	基準アンカーの最小値未満	
スペクトルピーク数	SP	アンカー筋頭部 コンクリート表面	基準アンカーの最大値超	
スペクトル相関係数	CF	アンカー筋頭部 コンクリート表面	基準アンカーの最小値未満	
時間軸波形の相関係数	CFt	アンカー筋頭部 コンクリート表面	基準アンカーの最小値未満	

合計56点/本

時間軸波形 of データ数である。つまり、時間軸波形 of 相関係数 CF_t は正規施工品の時間軸波形平均値 x_{AVi} との類似度を表している。施工不良の判定では、基準となる複数本の正規施工のアンカーを測定して求めた各評価指標の最小値あるいは最大値を判定閾値として、これを外れたものを不良と判定しNGポイントを付与する。各評価指標の合計点は全て8点であり、従来の方法では、閾値を僅かに外れても大きく外れても一律に同じ点数でNGポイントを与えている。NGポイント合計の最高は56点、評価基準としたアンカーは0点である。図3に従来の判定方法で計算したNGポイント of グラフを示す。横軸にアンカーNo.、左側の縦軸はNGポイント of 合計点で、グラフは各評価指標 of NGポイントを縦に積み重ねて示している。右側の縦軸は付着強度で、1施工条件で6本施工した内の3本について引張試験を行い、アンカー筋が降伏したNo.1とNo.17を除いて付着強度 of 平均値を◆印でプロットしている。付着強度は、引張耐力を有効埋込長さにおける表面積で除した値である。また、評価基準を決定するために選定した正規施工品は5本で、アンカーNo.を赤点線で囲っている。正規施工品の残り13本は施工不良と共に評価の対象とした。NGポイント of 付き方を見ると、施工不良は全て検出できているものの、評価対象とした正規施工品にもNGポイントが付与されている。この13本は引張試験を実施していないが、同じ正規施工品のNo.1は全てのアンカー筋が降伏し、No.25は付着強度が26.3N/mm²と比較的高い値を示していることから、正常に施工されたものと推察できる。

図 3 従来の判定方法による NG ポイント

図4 波形エネルギー比の評価指標値

図5 判定閾値からの変化量を考慮して判定する方法による NG ポイントの計算方法概要

図6 判定閾値からの変化量を考慮して判定する方法により計算した NG ポイント

2.3 判定閾値からの変化量を考慮した判定方法による評価

評価指標値の例として、図4に全てのアンカーの波形エネルギー比の値を示す。横軸にアンカーNo.、縦軸に評価指標値、判定閾値を赤点線で示している。表2に示したように、波形エネルギー比では、判定閾値未満のアンカーを不良と判定する。従来の判定方法では、緑の点線で囲った判定閾値を僅かに下回る正規施工品や施工不良品の一部と、黒の点線で囲った付着強度の低いNo.4やNo.27のアンカーに同じNGポイント2点を付与するため、不良の程度が考慮された評価になっていない。そこで、各評価指標において、判定閾値から外れた変化量に応じてNGポイントを付与することにした。図5にその計算方法の概要を示す。(a)施工不良で低い側に変化する評価指標と(b)施工不良で高い側に変化する評価指標で計算方法が異なり、それぞれ次式(2)(3)により計算する。このため、NGポイントの変動の仕方が従来の方法とは異なり最高が560点になる。

(a) 施工不良で低い側に変化する評価指標

$$NG = \frac{a - y}{a} \times 10 \quad (2)$$

(b) 施工不良で高い側に変化する評価指標

$$NG = \left| \frac{y - a}{m - a} \right| \times 10 \quad (3)$$

式(2)、(3)において、NGはNGポイント、aは各評価指標の判定閾値、yは各評価指標値、mは最大値である。図6にこの判定方法により計算したNGポイントのグラフを示す。図3に示した従来の判定方法に比べて、施工不良と共に評価の対象とした13本の正規施工品は、NGポイントが大きく低下しており、健全な状態で施工されているアンカーを不良と判定してしまう可能性が低減できている。また、接着剤充填不足の②奥充填、③手前充填とその他の施工不良との差が大きくなっている。付着強度が小さくなりやすい接着剤充填不足の検

図7 NGポイントと付着強度の関係

2.4 NG ポイントと付着強度の関係

3. 長期荷重を負担させるアンカー供試体での検証

(1) コンクリート塊供試体

(2) 建築実構造物

3.2 評估結果

(1) コンクリート塊供試体

Figure 1 shows a 5x5 grid of nodes. The horizontal axis is labeled 1000 and the vertical axis is labeled 750. The nodes are arranged in a grid with the following labels:

- Row 1 (top): No. 6, No. 7, No. 8, No. 9, No. 10
- Row 2: No. 11, No. 12, No. 13, No. 14, No. 15
- Row 3: No. 16, No. 17, No. 18, No. 19, No. 20
- Row 4: No. 21, No. 22, No. 23, No. 24, No. 25
- Row 5 (bottom): No. 1, No. 2, No. 3, No. 4, No. 5

The nodes are marked with red circles (No. 1-15) and black circles (No. 16-25). A legend indicates red circles for 'D19' and black circles for 'D13'.

図 8 コンクリート塊供試体

アンカーNo.		呼び 径	定着種類 (接着剤)	施工種類	備考
No. 1	No. 2	D13	有機系 注 入 (エポキシ シ)	正規施工	
No. 3	No. 4				
No. 5	No. 24				
No. 6	No. 7	D19			
No. 8	No. 9				
No. 10	—				
No. 11	No. 12	D19		鉄筋側接着剤 塗布	鉄筋に沿うように接着剤を塗布し、鉄筋を回転しながら挿入して定着
No. 13	No. 14	D13			
No. 15	—				
No. 16	No. 17			D19	樹脂不足 (先端・手前 充填)
No. 18	No. 19				
No. 20	—				
No. 21	No. 22	D19		樹脂不足 (先端充填)	下穴先端のみの接着剤で定着
No. 23	No. 25	D13			
No. 26	No. 27				
No. 28	No. 29		D13	清掃不良	下穴にコンクリート粉が残った状態で接着剤を注入し定着
No. 30	—				

(共通) アンカー種類：異形鉄筋
アンカー長さ(mm)：750 (埋込250)

(共通) アンカー種類：異形鉄筋
アンカー長さ(mm)：750(埋込250)

(a) 床 (梁上端) (b) 壁小口 (c) 梁下端

表 4 建築実構造物供試体のアンカー施工条件

アンカー No.	長さ (mm)	定着種類 (接着剤)	施工種類	施工 場所	備考	
No.1	750 (埋込 250)	有機系 注 入 (エポキシ シ)	正規施工	梁 下 端		
No.2			樹脂不足 (先端充填)		下穴先端のみの接着剤で定着	
No.3			樹脂不足 (先端・手前充填)		下穴先端のみの接着剤で定着後、穿 孔手前に接着剤を塗布し蓋をする	
No.4			鉄筋側接着剤塗布		鉄筋に沿うように接着剤を塗布し、 鉄筋を回転しながら挿入して定着	
No.5			清掃不良		下穴にコンクリート粉が残った状態 で接着剤を注入し定着	
No.6	450 (埋込 250)		正規充填		壁 小 口	
No.7			樹脂不足			下穴先端のみの接着剤で定着後、穿 孔手前に接着剤を塗布し蓋をする
No.8			(先端・手前充填)			鉄筋に沿うように接着剤を塗布し、 鉄筋を回転しながら挿入して定着
No.9			鉄筋側接着剤塗布			下穴にコンクリート粉が残った状態 で接着剤を注入し定着
No.10			清掃不良			
No.11	750 (埋込 250)	有機系 注 入 (エポキシ シ)	正規充填	(梁上 端)		
No.12	樹脂不足 (先端充填)		下穴先端のみの接着剤で定着			
No.13	450 (埋込 250)		樹脂不足 (先端・手前充填)			下穴先端のみの接着剤で定着後、穿 孔手前に接着剤を塗布し蓋をする
No.14	鉄筋側接着剤塗布		鉄筋に沿うように接着剤を塗布し、 鉄筋を回転しながら挿入して定着			
No.15	清掃不良		下穴にコンクリート粉が残った状態 で接着剤を注入し定着			
No.16						
No.17	750 (埋込 250)		樹脂不足 (先端充填)		下穴先端のみの接着剤で定着	
No.18	樹脂不足 (先端・手前充填)		下穴先端のみの接着剤で定着後、穿 孔手前に接着剤を塗布し蓋をする			
No.19	鉄筋側接着剤塗布		鉄筋に沿うように接着剤を塗布し、 鉄筋を回転しながら挿入して定着			
No.20			清掃不良		下穴にコンクリート粉が残った状態 で接着剤を注入し定着	
No.21						
No.22		正規施工	(梁上 端)			
No.23						
No.24		鉄筋側接着剤塗布		鉄筋に沿うように接着剤を塗布し、 鉄筋を回転しながら挿入して定着		
No.25						

(共通) アンカー種類：異形鉄筋
呼び径：D13

の従来の判定方法と (b) の判定閾値からの変化量を考慮して判定する方法で比べると、短期荷重を負担させるアンカー供試体の場合と同じように樹脂不足の先端・手前充填、先端充填とそれ以外の施工不良で NG ポイントの差が大きくなっている。樹脂不足のアンカーの方が不良の程度が大きいためであると推察される。また、先端・手前充填と先端充填では、不良の程度が大きいと考えられる先端充填の NG ポイントが大きくなった。短期荷重を負担させるアンカー供試体の場合と同様に、不良の程度まで評価する場合は判定閾値からの変化量を考慮して判定する方法が有効であると言える。なお、鉄筋側接着剤塗布と清掃不良は検出しにくくなっているが、清掃不良についてはエポキシ系接着剤強度の清掃不良による影響は小さいとの報告⁸⁾もあり、正規施工品との差が小さいためと考える。

(2) 建築実構造物

図 11 に建築実構造物の NG ポイントグラフを示す。(a) の従来の判定方法と (b) の判定閾値からの変化量を考慮して判定する方法で比べると、樹脂不足の先端・手前充填、先端充填とそれ以外の施工不良で NG ポイントの差が大きくなっている。また、横向き施工で先端・手前充填より不良の程度が大きいと考えられる先端充填の NG ポイントが大きくなった。前節および前項の供試体と同じように不良の程度まで評価する場合は判定閾値からの変化量を考慮して判定する方

法が有効であると言える。

4. まとめ

得られた結果をまとめて以下に示す。

- ① 電磁パルス法によるあと施工アンカー定着部の健全性評価方法において施工不良の程度に応じた評価の検討として、短期荷重を受けるアンカー試験体に従来の判定方法と、判定閾値からの変化量を考慮して判定する方法を適用した。NG ポイントグラフを比較した結果、判定閾値からの変化量を考慮して判定する方法は、評価対象とした正規施工品の NG ポイントが大きく低下し、健全な状態で施工されているアンカーを不良と判定してしまう可能性が低減できることが確認できた。また、接着剤充填不足の②奥充填、③手前充填とその他の施工不良との差が大きくなることから、付着強度が小さくなりやすい接着剤充填不足の検出にはこの判定方法が有効であることが確認できた。
- ② 上記の供試体において、判定閾値からの変化量を考慮して判定する方法は従来の判定方法に比べ、NG ポイントと付着強度の相関係数の低下から逆相関の関係性が強くなっており、付着強度が小さいアンカー程多くの NG ポイントが付きやすいことが分かった。このことから、不良の程度まで評価したい場合は、

(a) 従来の判定方法

(b) 判定閾値からの変化量を考慮して判定する方法

図 11 建築実構造物供試体の NG ポイントグラフ

この方法が有効であることが確認できた。

- ③ 長期荷重を負担させるアンカー供試体のうちのコンクリート塊供試体に判定閾値からの変化量を考慮して判定する方法を適用した。樹脂不足の先端・手前充填，先端充填とそれ以外の施工不良で NG ポイントの差が大きくなった。また，先端・手前充填と先端充填では，先端充填の NG ポイントが大きくなった。不良の程度の大きいアンカーに多くの NG ポイントが付いたと考えられ，不良の程度まで評価したい場合は従来の方法に比べこの方法が有効であると言える。
- ④ 長期荷重を負担させるアンカー供試体のうちの建築実構造物に判定閾値からの変化量を考慮して判定する方法を適用した。樹脂不足とそれ以外の施工不良で NG ポイントの差が大きくなった。さらに，横向き施工で先端・手前充填より不良の程度が大きいと考えられる先端充填の NG ポイントが大きくなることが分かり，不良の程度まで評価したい場合は従来の方法に比べこの方法が有効であると言える。

参考文献

- 1) 宮田，内田，鎌田，長岡，三輪，高鍋，木村，西上，劉，田中：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
- 2) 高鍋，三輪，宮田，高坂，加賀，長岡：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

- 3) 高鍋，三輪，加賀，長岡：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
- 4) 加賀，長岡，三輪，高鍋，和高：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 — 評価指標の検討 —，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
- 5) 加賀，三輪，高鍋，和高，長岡：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. 65-70，2018. 1
- 6) 佐藤，濱崎，三輪，加賀：注入方式で施工された接着系あと施工アンカーの非破壊試験に関する検討，日本非破壊検査協会コンクリート構造物の非破壊検査シンポジウム論文集 (vol. 6)，pp. 263-268，2018. 1
- 7) Kaga, T., et al.: QUANTITATIVE NONDESTRUCTIVE EVALUATION OF ANCHORAGE ZONE OF POST-INSTALLED ANCHOR BY USING ELECTROMAGNETIC PULSE METHOD, AIJ Journal of Technology and Design, Vol.25, No.60, 603-608, 2019.6(in Japanese)
- 加賀，三輪，高鍋，和高，長岡，濱崎：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
- 8) 本橋，濱崎，飯泉，渡辺，田沼，棚野，土屋：接着系あと施工アンカーの引張り強度特性に与える施工品質の影響，日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1，pp. 1337-1338，2014. 9

[2021 年 6 月 1 日原稿受理 2021 年 7 月 20 日採用決定]