

論文 接着系あと施工アンカーのアルカリ耐久性に関する実験的検討

内藤 圭祐^{*1}・山田 宜彦^{*1}・伊藤 信^{*2}・井口 重信^{*2}

要旨: 接着系あと施工アンカーを使用する際には、その性能の評価が重要である。一方で、有機系接着剤を用いたあと施工アンカーのアルカリ環境下における耐久性に関する評価手法は、日本においてはその試験方法が少ないのが現状である。そこで、アルカリ環境が有機系接着剤を用いたあと施工アンカーに与える影響を確認するため、アルカリ溶液に浸漬した試験片の押抜き試験を実施した。その結果、今回試験で用いた 6 種類の有機系接着剤は、アルカリ耐久性を有することを確認した。また、最大付着応力度の変動係数は、残存強度比の標準偏差と相関性があることがわかった。

キーワード: あと施工アンカー, 有機系接着剤, 耐久性, 耐アルカリ性

1. はじめに

接着系あと施工アンカーは、既設構造物の補強や構造物の付帯設備、仮設構造物など広く用いられており、使用期間は、長期におよぶ場合がある。特に、接着系あと施工アンカーの長期耐久性を確認することは、構造物や付帯設備の安全性につながることから、適切な評価手法が必要である。接着系あと施工アンカーの接着剤には、一般的にセメント系の無機材料や樹脂系の有機材料が基材として用いられており、このうち有機材料の一部では、アルカリ性環境下において加水分解を生じ、物理的性状を損なう恐れがあることから、アルカリ耐久性に対する品質について確認することが求められている¹⁾。しかし、日本においては、その試験方法が少なく、不飽和ポリエステル樹脂の試験方法(JIS K 6919)を用いた有機系接着剤のアルカリ耐久性に関する基準²⁾はあるが、その他の成分の樹脂を対象としたものにはなっていないのが現状である。

一方で、海外における有機系接着剤を用いたあと施工アンカーのアルカリ耐久性に関する評価基準は、ETAG³⁾や ACI⁴⁾において定められているが、試験方法の詳細や結果が公表されていないのが実状であり、これらの評価基準の適用に際しては、試験方法の検証が必要になると考えられる。

そこで、ETAG で基準化されている有機系接着剤を用いたあと施工アンカーのアルカリ耐久性の評価基準を参考に、接着系あと施工アンカーを打設した円柱供試体を作製し、約 30mm 厚に切り出した試験片を一定期間アルカリ溶液に浸漬し、アンカー筋部分の押抜き試験を行った。これにより、あと施工アンカー部のアルカリ耐久性について、破壊形態、付着応力度、初期剛性により評価することを試みた。

2. 試験概要

2.1 試験片の製作

試験片の概要図を図-1 に示す。ETAG の試験片の製作基準では、(1)D=150mm 以上の円形または矩形のあと施工アンカーの被着体を作成すること、(2)使用するアンカー筋は、M12 を標準とすること、(3)試験片は厚さ 30mm に供試体を切断することとしている。そこで本試験では、図-1 に示すように、ETAG の製作基準の最小寸法となる D=150mm の円柱被着体を作製し、その後、φ=約 15mm のハンマードリルで下向きに穿孔し、有機系接着剤をそれぞれ挿入し、アンカー筋を固着した。使用したアンカー筋は、M12 とし、高温用合金鋼ボルト SNB7(JIS G 4107)を用いた。アンカー筋固着後、ダイヤモンドカッターにより湿潤状態で円柱被着体を 30mm 厚になるように切断し、試験片を作製した。なお、切断時の熱による接着剤への影響は無かった。

2.2 試験片の諸元

今回の試験で使用した有機系接着剤を表-1 に、また試験片の諸元を表-2 に示す。使用した有機系接着剤は、一般的に使用されている 6 製品を選定し、接着方式は、

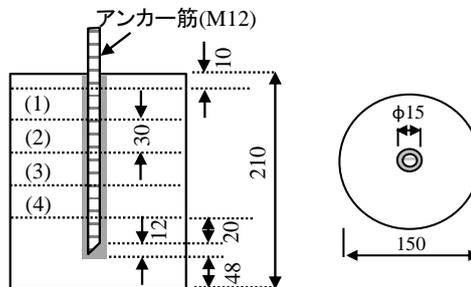


図-1 試験片概要図

*1 東日本旅客鉄道(株) 構造技術センター (正会員)

*2 東日本旅客鉄道(株) 構造技術センター 工修 (正会員)

表-1 あと施工アンカーに用いた有機系接着剤

製品	A	B	C	D	E	F
接着剤の種類	エポキシアクリレート	ビニルエステル	エポキシ	アクリル	エポキシアクリレート	エポキシ
接着剤の主成分	エポキシアクリレート プレポリマー	変性 ビニルエステル	ビスフェノール A型エポキシ樹脂	変性アクリル 樹脂	エポキシアクリレート オリゴマー	ビスフェノール A型エポキシ樹脂
接着方式	カプセル	カプセル	注入	注入	カプセル	注入

カプセル型，注入型とした。

試験片は，後述する ETAG の試験方法に基づき，アルカリ溶液に浸漬する試験片と浸漬の影響を対比するための気中で保管する試験片をそれぞれ 12 個ずつ用意した。アルカリ溶液の浸漬時間は，ETAG では 2000 時間(83 日間)を基準としているが，浸漬時間による影響を把握するため，500 時間(20 日間)，1000 時間(41 日間)，4000 時間(166 日間)，8000 時間(333 日間)の浸漬時間を設定した。

各パラメータの試験時のコンクリートの圧縮強度および割裂引張試験の結果を図-2 に示す。図-2 に示す浸漬時間は，それぞれの浸漬時間を終えた試験片の後述する押抜き試験時点での強度試験の結果を示している。今回の試験では，はじめに 2000 時間の試験を行い，その後 500 時間，1000 時間，4000 時間，8000 時間の順に試験を実施した。アルカリ溶液への浸漬は，コンクリート材齢が 41 日時点で開始しており，コンクリートの強度増加はほとんどない。また，アンカー筋の打設は，コンクリートの材齢が 10 日時点（アルカリ溶液への浸漬時点の 30 日前）に実施しており，接着剤の強度増加もほとんどないと思われる。材料試験の結果は，圧縮強度で平均 28.3N/mm²，割裂引張強度で平均 2.56N/mm²であった。

2.3 試験方法

ETAG によるアルカリ耐久性に関する評価基準では，以下の試験手順が規定されている。

- ・試験片は，アルカリ溶液に浸漬する試験片（以下，浸漬試験片）と同期間の気中で保管する試験片（以下，気中試験片）をそれぞれ 10 個以上用意する。
- ・浸漬試験片は，水酸化カリウム溶液に 2000 時間浸漬し，温度 20℃±3℃，湿度 60%±5% の環境条件下で保管する。なお，浸漬期間中は，pH=13.0 を下回らないように管理する。
- ・気中試験片は，浸漬試験片同様の環境条件下で保管する。
- ・浸漬後，あと施工アンカー部の押抜き試験を実施し，浸漬試験片の結果と気中試験片の結果を比較する。
- ・押抜き試験により，試験片が割裂破壊した場合は，評価の対象外とする。

本試験では，アルカリ溶液，浸漬時の環境条件は，ETAG の規定と同様とし，アルカリ溶液浸漬用の試験片は，浸漬完了後，十分に乾燥させた後，押抜き試験を実施した。

表-2 試験片諸元

	試験片保管	時間	試験片数 (個)																																							
			A	B	C	D	E	F																																		
AL1-1	気中	0	12					12																																		
AL2-1	気中	500						12						12																												
AL2-2	浸漬																																									
AL3-1	気中	1000													12						12																					
AL3-2	浸漬																																									
AL4-1	気中	2000																				12						12														
AL4-2	浸漬																																									
AL5-1	気中	4000																											12						12							
AL5-2	浸漬																																									
AL6-1	気中	8000																																		12						12
AL6-2	浸漬																																									

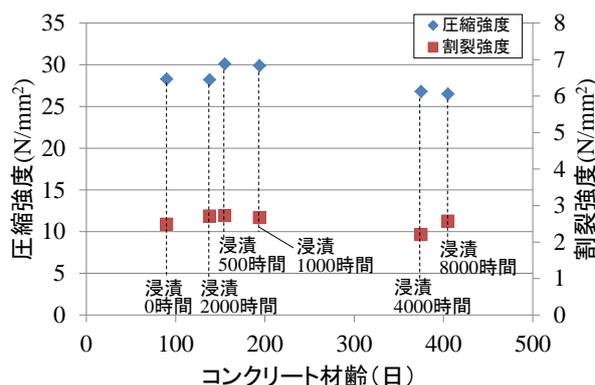


図-2 コンクリート材齢と材料試験結果

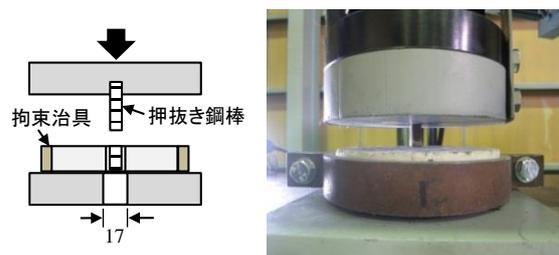
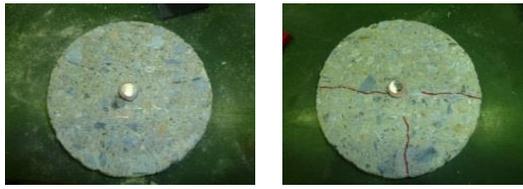


図-3 押抜き試験概要図

図-3 に押抜き試験の概要図を示す。押抜き試験は，万能試験機に押抜き鋼棒（M12，SNB7）を固定し，試験片の非拘束径 d は，17mm とした。また，試験片は，押抜き時の割裂破壊を抑制するため，側面周囲に拘束治具を取り付けた。拘束治具の固定には，強度区分 4.8 の普通ボルトを使用し，ボルト締付けトルクは約 80N・m とした。なお，試験片の押抜き時の変位は，万能試験機の



(a) 割裂破壊無し (b) 割裂破壊有り
写真-1 試験片の割裂破壊

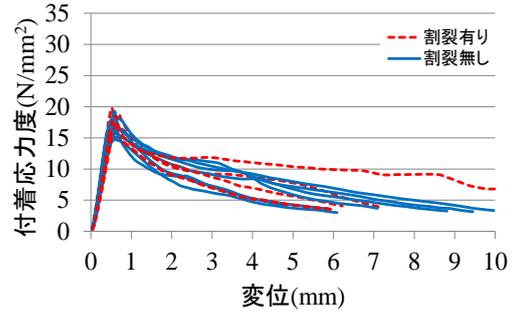


図-4 付着応力度-変位関係の例(AL2-2-B)

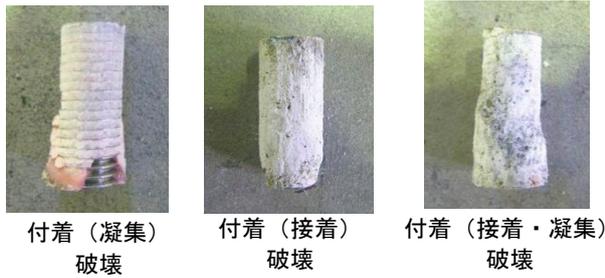


写真-2 アンカー筋周囲の破壊性状

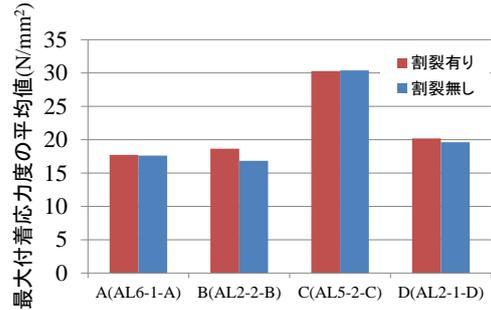


図-5 割裂ひび割れの有無と付着応力度の関係

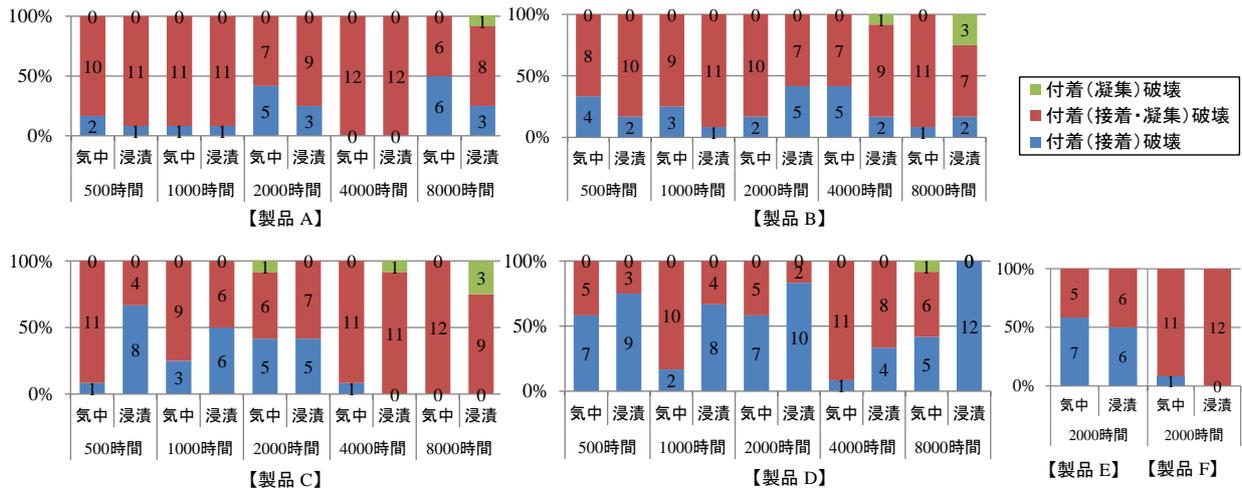


図-6 アンカー筋周囲の破壊性状の比較

ストローク変位により測定した。

3. 試験結果

3.1 破壊性状

(1) 試験片の破壊性状

押抜き試験の結果、一部の試験片に割裂ひび割れが生じた(写真-1)。同一条件における試験片の割裂ひび割れの有無による付着応力度と変位の関係の一例を図-4に、割裂ひび割れの有無による最大付着応力度の平均値の比較を図-5に示す。付着応力度は荷重値を押抜かれた試験片の穿孔径の周面積で除して算出した。図-5では、A~Dの製品において、同一条件下で割裂ひび割れの有無の割合がそれぞれ半数に近かった結果を抽出した。

割裂ひび割れは、試験後に拘束治具を取り外した際に生じることが多かったことから、試験片の割裂発生時点を確認した。その結果、一部の試験片において載荷を一旦停止しながら確認した結果では、最大荷重時点以降に割裂ひび割れが生じていることが確認された。

ETAGでは、試験片の割裂が認められる場合には、評価の対象外としているが、今回の方法で載荷した場合には、試験片の割裂ひび割れの有無は、付着応力度と変位の関係性や最大付着応力度に与える影響が小さいと考えられる。よって、以降の試験結果では、試験片の割裂ひび割れの有無によらず評価した。

(2) アンカー筋周囲の破壊性状

押抜き試験により押抜かれた接着剤およびアンカー筋

(以下、アンカー筋周囲)の状況を写真-2に示す。アンカー筋周囲の破壊性状は、接着剤とアンカー筋の界面で破壊が生じているもの(以下、付着(凝集)破壊)と接着剤とコンクリートの界面で破壊が生じているもの(以下、付着(接着)破壊)と付着(凝集)破壊と付着(接着)破壊が混合しているもの(以下、付着(接着・凝集)破壊)があった。なお、非拘束径を17mmとした今回の試験では、コーン破壊したものはなかった。

アンカー筋周囲の破壊性状の割合を図-6に示す。浸漬時間ごとにおける破壊性状は、相対的に付着(接着・凝集)破壊が多く確認された製品(A, B, C, F)と付着(接着)破壊が多く確認された製品(D), および付着(接着・凝集)破壊と付着(接着)破壊の割合が同程度の製品(E)があった。なお、付着(凝集)破壊は、A~Dの製品の一部で確認されたのみであった。同時間の気中試験片と浸漬試験片の破壊性状の変化は、相対的に破壊性状の変化が少なかった製品(A, B, E, F)と変化が見られた製品(C, D)があった。

3.2 最大付着応力度

浸漬試験片について、浸漬時間ごとの最大付着応力度の平均値の結果を図-7に示す。最大付着応力度の平均値は、浸漬時間の経過とともに増加し、その後低下したケース(製品A)や浸漬時間の経過とともに最大付着応力度の平均が増加したケース(製品B, C), また、浸漬時間の経過とともに最大付着応力度の平均が一旦低下し、その後増加したケース(製品D)があった。

同時間の気中試験片の最大付着応力度の平均値に対する浸漬試験片の最大付着応力度の比(以下、残存強度比)を図-8に示す。また、全てのパラメータにおける各製品の最大付着応力度の変動係数の最大, 最小, 平均を図-9に示す。残存強度比は、全ての製品において1.0を下回る場合があったが、8000時間の残存強度比では、A~Dの製品において1.0を上回る結果となった。残存強度比の変化では、浸漬時間とともに残存強度比が増加したケース(製品A), 同様に残存強度比が一時的に低下し、その後増加したケース(製品B, D), 同様に一時的に増加し、その後低下したケース(製品C)であった。特にDの製品の残存強度比では、2000時間が0.81となり、4000時間で0.68となった。最大付着応力度の変動係数の平均値は、Dの製品が最も高く(0.18), Cの製品で最も低い(0.08)結果となった。

3.3 初期剛性

押抜き試験時のあと施工アンカー一部の初期剛性を把握するため、試験で得られた付着応力度とひずみ量の関係から付着応力度-ひずみ曲線を求め、初期剛性を算出した。ここでのひずみ量は、押抜き量(機械変位)を試験片長さで除して算出した。初期剛性は、上限値を最大付

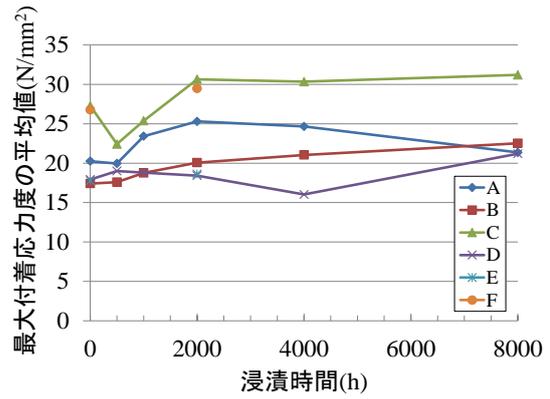


図-7 浸漬試験片の最大付着応力度の平均

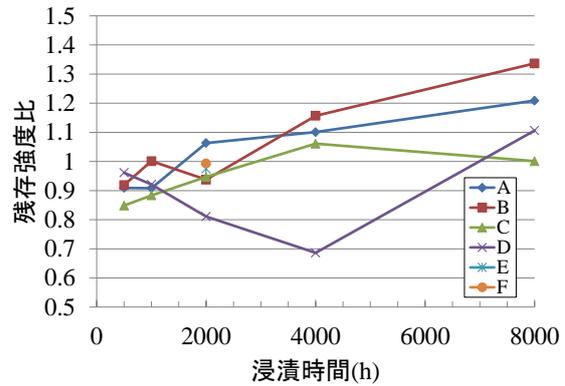


図-8 最大付着応力度の残存強度比

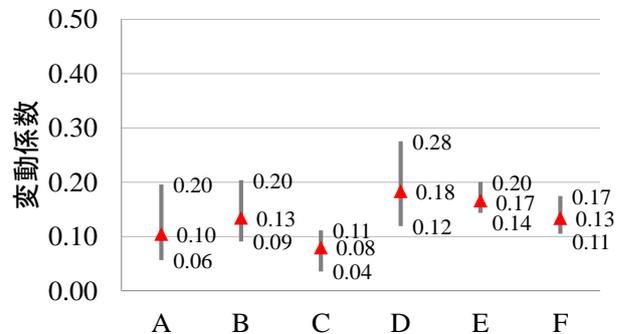


図-9 最大付着応力度の変動係数

着応力度の1/3とし、下限値は、各試験片ともに 2.0N/mm^2 として付着応力度の差をひずみ量の差で除して算出した。

図-10に浸漬試験片における浸漬時間ごとの初期剛性の平均値の結果を示す。初期剛性の平均値が浸漬時間とともに一旦増加し、その後低下したケース(製品A, B)と同様に浸漬時間とともに一旦低下し、その後増加したケース(製品C, D)があった。同時間の気中試験片の初期剛性の平均値に対する浸漬試験片の初期剛性の比(以下、初期剛性比)を図-11に示す。初期剛性比は、全ての浸漬時間で1.0を上回るケース(製品B)のほか、概ね0.9以上となるケース(製品C, D)があった。なお、製品Aは、500時間では、0.77となったが、その他の浸漬時間では、1.0を上回る結果となった。

図-12 に全てのパラメータにおける各製品の初期剛性の変動係数の最大, 最小, 平均を示す。初期剛性の変動係数の平均値は, 最大付着応力度の変動係数の平均値同様に D の製品が最も高い結果となった。

4. 考察

4.1 アルカリ耐久性の評価

表-3 に今回実施した試験結果の総括表を示す。製品 A は, アルカリ溶液浸漬時間が 2000 時間以降で最大付着応力度, 初期剛性の平均値が低下する傾向が見られたが, 残存強度比, 初期剛性比は, 1.0 以上であることを確認した。また, 破壊性状の変化は相対的に小さい結果であった。製品 B は, 同様に浸漬時間が 2000 時間以降において一時的に残存強度比が 1.0 を下回ったが, その後は, 1.0 を上回る結果となった。また, 最大付着応力度は, 2000 時間以降も増加する傾向であり, 破壊性状についても変化は小さい結果となった。製品 C は, 一時的に残存強度比, 初期剛性比が 1.0 を下回ったが, 2000 時間以降では最大付着応力度に変化がなく, 初期剛性は増加する傾向であった。製品 D では, 残存強度比, 初期剛性比が 2000 時間, 4000 時間の浸漬において 1.0 を下回る結果となったが, 8000 時間では 1.0 を上回る結果となった。製品 E, F は, いずれも残存強度比は, 1.0 をわずかに下回るものの, 破壊性状については, 変化は小さい結果であった。以上より, 今回試験を実施した製品 A~F は, 残存強度比のほか, 最大付着応力度, 初期剛性の平均値の傾向, 初期剛性比, アンカー筋周囲の破壊性状の変化で評価すると, アルカリ耐久性が劣ると判定される項目があるが, 全ての項目でアルカリ耐久性が劣ると判定されるものはないことから, 一定のアルカリ耐久性を有していると推定される。

4.2 変動係数による残存強度比への影響評価

図-9 に示したように, 押抜き試験による最大付着応力度には, ばらつきが生じており, このばらつきによって, 残存強度比の結果に対してもばらつきが生じることが考えられる。

残存強度比によりアルカリ耐久性を評価するためには, 予め対象とする製品 (有機系接着剤) の残存強度比のばらつきの範囲を推定し, 試験による残存強度比の結果がばらつきによる影響か, もしくは, アルカリによる影響かを判断することが必要である。

そこで, アルカリ溶液による影響がない試験片により, 最大付着応力度の変動係数や試験片個数が残存強度比の結果におよぼす影響範囲を明らかにするため, A~D の製品を評価した (図-13)。A~D の製品の最大付着応力度の変動係数の算出は, アルカリ溶液への浸漬による影響がないこと, コンクリート材齢, 接着剤材齢による変

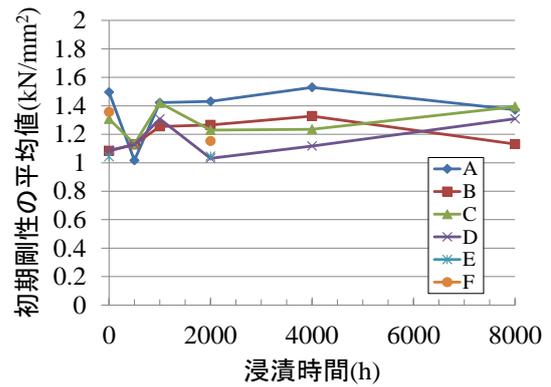


図-10 浸漬試験片の初期剛性の平均

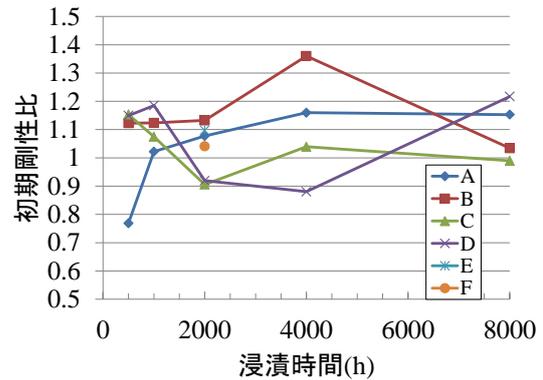


図-11 初期剛性比

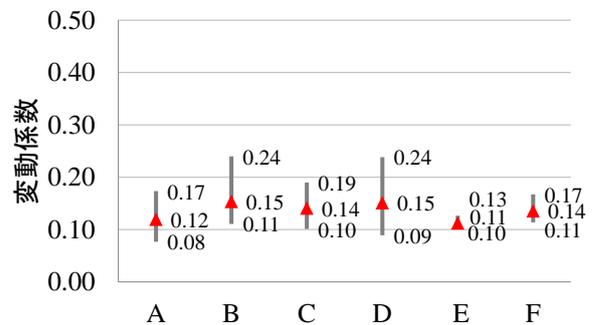


図-12 初期剛性の変動係数

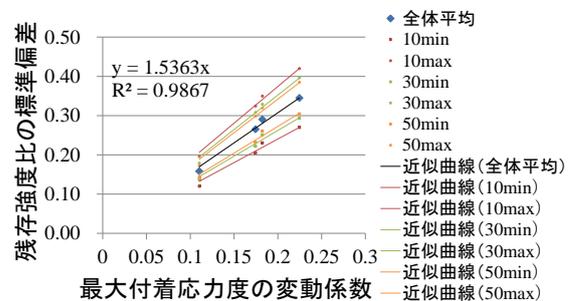


図-13 最大付着応力度の変動係数の影響

化がないことを仮定し, 初期値となる 0 時間~8000 時間までの気中試験片数 (n=72) を対象とした。一方で, 残存強度比の標準偏差は, ①上記試験片数の個々の最大付着応力度から 5184 通りの組み合わせによる残存強度比を

表-3 試験結果

製品	A	B	C	D	E	F
最大付着応力度の平均値の傾向	2000時間以降低下	2000時間以降増加	2000時間以降変化なし	2000時間以降一時的に低下→増加	/	/
残存強度比	0.91~1.21	0.92~1.34	0.84~1.10	0.68~1.11	0.97	0.99
初期剛性の平均値の傾向	2000時間以降一時的に増加→低下	2000時間以降一時的に増加→低下	2000時間以降増加	2000時間以降増加	/	/
初期剛性比	0.76~1.6	1.03~1.36	0.91~1.15	0.88~1.22	1.10	1.04
破壊性状の変化	相対的に変化は小さい			変化有り		相対的に変化は小さい

算出, ②無作為に 10 個, 30 個, 50 個のサンプルを 100 回繰返し抽出し, その際の残存強度比の標準偏差 (1σ) から標準偏差の最大値, 最小値を算出することにより, 残存強度比の標準偏差の範囲を求めた。

この結果, 今回の試験範囲では, 最大付着応力度の変動係数が小さいほど, 残存強度比の標準偏差の平均値は小さくなり, 精度良くその傾向を示すことがわかった。また, 残存強度比の標準偏差は, 対象とする試験片数が少ない場合, また, 最大付着応力度の変動係数が大きい場合においてその影響が大きくなることがわかった。

以上より, 残存強度比による評価手法を用いてアルカリ耐久性を評価する場合は, 製品の最大付着応力度のばらつきが大きいほど評価精度が低下すると推定される。

4.3 ETAG によるアルカリ耐久性の評価

ETAG によるアルカリ耐久性の評価基準に対し, 今回の試験を実施した結果, 有機系接着剤がアルカリ耐久性を有すると想定される材料であっても残存強度比にばらつきが生じることを確認した。特に, 最大付着応力度の変動係数が大きい有機系接着剤に対して, 残存強度比によってアルカリ耐久性を評価することは, ばらつきの影響は大きくなることから, アルカリ溶液への浸漬による影響が現れにくいと考えられる。

したがって, 上記のような場合は, 試験片の対象数を多くすることのほか, 今回の評価項目で用いた最大付着応力度や初期剛性の平均値の変化やアンカー筋周囲の破壊性状など, 複数の評価項目によりアルカリ耐久性を検証することが評価精度の向上につながると考えられる。

5. まとめ

今回の試験条件の範囲で得られた知見を以下に示す。

- (1) A~F の製品は, 最大付着応力度の平均値の推移, 残存強度比, 初期剛性の平均値の推移, 初期剛性比,

アンカー筋周囲の破壊性状を確認した結果, 一定のアルカリ耐久性を有している推定される。

- (2) 最大付着応力度の変動係数は, 残存強度比の誤差に影響を与えると考えられ, 対象とする試験片数が少ない場合や, 変動係数が大きい有機系接着剤を対象とする場合は, その誤差が大きくなる。
- (3) 最大付着応力度の変動係数が小さいほど, 残存強度比の誤差が小さくなる。

謝辞

本実験を行うにあたり, 一般社団法人日本建築あと施工アンカー協会様, あと施工アンカーの製品を提供いただいた各メーカー様に多大なご協力を頂きました。ここに付記し, 感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 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), pp.57, 2014
- 2) 日本国有鉄道 構造物設計事務所: あと施工アンカー工法設計施工の手引き, 1985
- 3) EOTA: GUIDELINE FOR EUROPEAN TECHNICAL APPROVAL OF METAL ANCHORS FOR USE IN CONCRETE BONDED ANCHORS, ETAG001 Part five, Apr.2013
- 4) American Concrete Institute: Qualification of Post-Installed Adhesive Anchors in Concrete and Commentary, 355.4-11, 2011
- 5) 内藤圭祐, 山田宣彦, 井口重信: 接着系あと施工アンカーの耐久性に関する実験的検討 (耐アルカリ性試験), コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.2, pp1207-1212, 2015.7