

論文 接着系あと施工アンカーの耐アルカリ性に関する試験方法の検討

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

要旨：有機系接着剤を用いたあと施工アンカーの耐久性の適切な評価は重要である。ETAG で基準化されている評価試験方法を参考に、6 製品のアルカリ溶液浸漬試験結果から、付着応力度を評価値として試験方法による影響を確認した。試験結果より、試験片の割裂破壊の有無、接着剤の充填不良、拘束治具の締付けトルクや非拘束径といった拘束条件、乾湿および試験体における位置が付着応力度に影響を与える製品があることが分かった。また、押抜き試験と静的引抜き試験の比較を行い、両試験で得られる付着応力度の相関について確認した。

キーワード：あと施工アンカー、有機系接着剤、耐久性、試験方法

1. はじめに

接着系あと施工アンカーの耐久性能を確認することは、供用開始後の構造物や付帯設備の安全性につながることから、重要であり適切な評価手法が必要である。その評価手法に関しては、ETAG¹⁾や ACI²⁾で基準化されているものの、その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る。接着系あと施工アンカーの接着剤の基材として一般的に用いられている有機系材料の一部で、アルカリ性環境において加水分解による物理的性状の損失が生じる可能性がある一方で、日本においてはアルカリ性に対する品質の確認試験方法が少なく、不飽和ポリエステル樹脂の試験方法 (JIS K 6919) を用いた基準はあるが、他の材料を対象としたものではない。このことから、内藤らは ETAG で基準化されている接着系あと施工アンカーの評価試験方法を参考にして、耐アルカリ性の評価手法の検討を行ってきた³⁾。ETAG による耐アルカリ性の評価試験方法では、予め接着系アンカーを打設した円柱試験体をスライスし、試験片を水酸化カリウム溶液に 2000 時間浸漬後、押抜き試験を実施し、耐アルカリ性を評価している（以降、スライステスト）。本論文では、耐アルカリ性の評価試験において、試験方法が評価値に及ぼす影響の検討を行うことを目的として、6 製品の有機系接着剤を用いてスライステストを実施した。付着応力度に着目し、試験片の割裂ひび割れ、接着剤の充填不良、拘束治具の締付けトルクや非拘束径といった拘束条件、乾湿、押抜き試験および試験体における試験片の位置が及ぼす影響を確認した。なお、試験片の割裂ひび割れ、非拘束径、乾湿、押抜き試験による影響について、2000 時間の浸漬および気中試験片を用いて内藤らが検討をしているが³⁾、本論文は、他の条件による試験により得られた結果も加えて、試験方法の精度という観点から検討を行うものである。

2. 試験概要

2.1 試験片の製作

試験片の製作概要図を図-1 に示す。試験片の製作にあたっては、ETAG の製作基準に従った寸法とした紙製のボイド管にコンクリートを打ち込み、あと施工アンカーを固着させる円柱被着体 (D=150mm) を作成した。コンクリート硬化後、 ϕ =約 15mm のハンマードリルで下向きに穿孔し、カプセル型、注入型の有機系接着剤をそれぞれ充填し、アンカー筋を固着した。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。また、アンカー筋に固着させる有機系接着剤は、一般的に使用される接着剤から、表-1 に示す 6 製品（以降、A, B, C, D, E, F とする）を選定した。アンカー筋打設後、湿潤状態でダイヤモンドカッターにて円柱被着体を厚さ 30mm 程度に切断し、一つの試験体から 4 つの試験片を製作した。なお、切断時の熱による接着剤への影響は無いものと思われる。

2.2 試験方法

ETAG では、耐アルカリ性の評価において、試験方法に以下の基準を設けている。

- ・ 試験片はアルカリ溶液 (pH=13.2) に浸漬し、気温 $20^{\circ}\text{C}\pm 3^{\circ}\text{C}$ 、湿度 $60\%\pm 5\%$ の条件下で保管する。
- ・ アルカリ溶液は水にカリウム粉末または錠剤を混合させ、pH=13.2 とする。
- ・ アルカリ溶液は、試験片浸漬期間中に pH=13.0 を下回らないように管理する。
- ・ 試験片は、アルカリ液に浸漬する試験片と比較用の気中試験片をそれぞれ 10 体ずつ用意し、押抜き試験を行う。なお、気中試験片浸は、浸漬試験片同様の気温と湿度の条件下の気中で保管する。
- ・ 押抜き試験により、割裂破壊した試験片は評価の対象外とする。

*1 東日本旅客鉄道（株） 構造技術センター 工修（正会員）

*2 東日本旅客鉄道（株） 構造技術センター（正会員）

表－1 あと施工アンカーに使用する有機系接着剤

製品	A	B	C	D	E	F
接着剤種類	エポシアクリレート	ビニルエステル	エポキシ	アクリル	エポシアクリレート	エポキシ
接着剤主成分	エポシアクリレート 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

これらの試験方法を基準に押抜き試験を実施し、評価対象とした試験片諸元を表－2 に示す。表－2 では、諸元として試験片保管状況および時間、後述する押抜き試験時の試験片の乾湿の状態、非拘束径を示した。

(1) アルカリ溶液への浸漬

本試験では、予めカリウム錠剤を用意し、水と混合させることにより、水酸化カリウム溶液を製作した。試験片の浸漬後は、1回/日の頻度でpH測定を行い、pH=13.0を下回らないようにアルカリ溶液を管理した。また、試験片は、アルカリ液浸漬用試験片、気中試験片ともに温度は20℃±3℃、湿度は60%±5%の環境で保管した。保管においては、気中時間を0、500、1000、2000、4000、8000時間の6種類、浸漬時間を500、1000、2000、4000、8000時間の5種類に分類することとした。なお、浸漬試験片を湿潤の状態で行う場合は浸漬後、速やかに押抜き試験を実施したが、乾燥の状態で行う場合は、試験片を試験片重量の変動が無くなるまで、1週間程度気中で乾燥した後に行う押抜き試験を実施した。

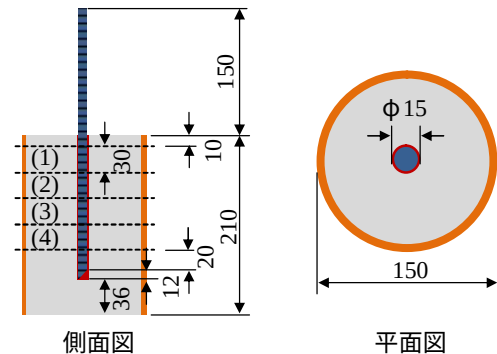
(2) 押抜き試験

表－2 に示した各試験片について、万能試験機により押抜き試験を実施した。試験装置の概要図を図－2 に示す。試験機には、押抜き用の鋼棒（M8、SNB7）を取り付けた。試験片の非拘束径は、d=17mmを基本とし、非拘束径による影響を確認するため、飯泉らの試験⁴⁾を参考にし、一部の試験片ではd=25mmとした。また、試験片には、押抜き時の割裂破壊を抑制するため、予め試験片の側面に拘束治具を取り付け、締付けたトルクを38N・mを基本とし、締付けトルクによる影響を確認するため、一部の試験片では50N・mとした。なお、試験片の押抜き時の変位は、万能試験機のストローク変位により測定した。

3. 試験方法が付着応力度の評価へ与える影響

あと施工アンカーの耐久性の評価値として用いる付着応力度は、押抜き試験で得られた最大荷重を押抜かれた試験片の穿孔径の周面積で除して算出している。以降、試験方法が付着応力度に与える影響について述べるが、用いた試験結果について特に記載がない場合は下記の条件によるものとする。

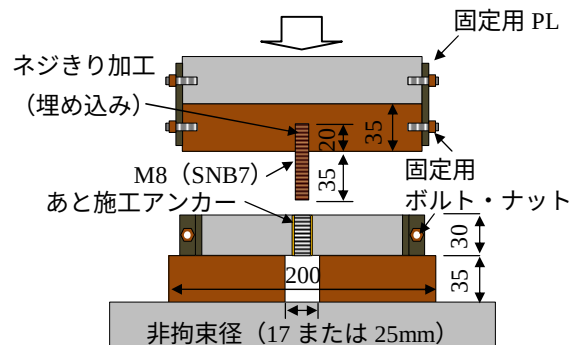
- 1) 割裂ひび割れの有無によらず対象とする。
- 2) 接着剤の充填不良が生じた試験片を除く。



図－1 試験片製作概要図

表－2 試験片諸元

試験区分	試験片の保管	試験時試験片の乾湿	時間 (hr)	非拘束径 (mm)	試験片数 (個)					
					A	B	C	D	E	F
1-1	気中	乾燥	0	17	12	12	12	12	13	13
1-2	気中	乾燥	0	25	-	1	2	2	2	3
2-1	気中	乾燥	500	17	12	12	12	12	-	-
2-2	気中	乾燥	500	25	2	2	2	1	-	-
2-3	浸漬	乾燥	500	17	12	12	12	12	-	-
2-4	浸漬	乾燥	500	25	2	2	2	1	-	-
3-1	気中	乾燥	1,000	17	12	12	12	12	-	-
3-2	気中	乾燥	1,000	25	2	2	2	1	-	-
3-3	浸漬	乾燥	1,000	17	12	12	12	12	-	-
3-4	浸漬	乾燥	1,000	25	2	2	2	1	-	-
4-1	気中	乾燥	2,000	17	12	12	12	12	12	12
4-2	気中	乾燥	2,000	25	1	1	1	1	1	1
4-3	浸漬	乾燥	2,000	17	18	16	18	18	18	18
4-4	浸漬	湿潤	2,000	17	8	8	8	7	7	7
5-1	気中	乾燥	4,000	17	12	12	12	12	-	-
5-2	気中	乾燥	4,000	25	2	2	1	1	-	-
5-3	浸漬	乾燥	4,000	17	12	12	12	12	-	-
5-4	浸漬	乾燥	4,000	25	2	2	1	1	-	-
6-1	気中	乾燥	8,000	17	12	12	12	12	-	-
6-2	気中	乾燥	8,000	25	2	2	2	2	-	-
6-3	浸漬	乾燥	8,000	17	12	12	12	12	-	-
6-4	浸漬	乾燥	8,000	25	2	2	2	2	-	-



図－2 押抜き試験装置概要図

- 3) 拘束治具の締付けトルクは $38\text{N} \cdot \text{m}$ とする。
- 4) 非拘束径は $d=17\text{mm}$ とする。

3.1 割裂ひび割れの有無による影響

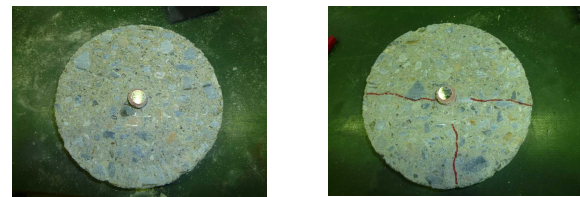
ETAG の試験方法の基準では割裂破壊した試験片は対象外とされている。今回の試験では、試験片 753 個のうち 185 個で写真-1(b)に示すような割裂ひび割れが生じた。試験区分が同じで、割裂ひび割れの有無の割合が同程度の付着応力度の結果を図-3 に示す。割裂ひび割れが無い試験片に対する割裂ひび割れが生じた試験片の付着応力度比は製品 A が 0.99, B の試験区分 2-3 が 0.90, B の試験区分 6-1 が 1.16, C が 1.00, E が 0.97 となり、割裂ひび割れにより付着応力度が低下する傾向は一概には見られなかった。内藤らの検討³⁾で述べられたように最大荷重時点以降に割裂ひび割れが生じていることから、付着応力度への影響が小さいと考えられる。

3.2 接着剤充填不良の影響

今回の試験片 753 個のうち 50 個で、写真-2 に示すような接着剤の充填不良が確認された。まず、試験片のスライステストを実施する前の試験体における位置（以降、試験体表層に近い層から順に 1・2・3・4 の層番号を試験片に与え区別する）ごとの充填不良の発生割合を図-4 に示す。また、充填不良が生じた試験片の位置と未充填率の関係を図-5 に示す。なお、未充填率は試験片表面の撮影画像から接着剤面積と充填不良の面積を求め、その割合から算出した。

接着剤の充填不良は、試験体製作工程の中で接着剤に気泡が出来る可能性のあるカプセル型接着剤のアンカー筋打設に伴う攪拌時又は注入型接着剤の注入時に生じたものと推定されるが、これらの結果から、その発生位置や未充填率に傾向は見られなかった。各製品の未充填率と付着応力度の関係を図-6 に示す。図-6 の縦軸は、接着剤の充填不良が生じた試験片の付着応力度を、同じ試験区分の試験片の付着応力度の平均値で除している。また、図-6 には製品ごとの線形近似曲線を合わせて示している。

未充填率の増加に伴い付着応力度が低下する傾向が見られた製品 C, D, F について、今回の試験で生じた未充填率の最大値 40%（製品 F）を基準として、充填不良が生じなかった試験片の付着応力度との比を算出することで未充填率の付着応力度へ与える影響を検討した。なお、製品 C, D の未充填率を 40%とした場合の付着応力度は、各製品の線形近似曲線を用いて算出している。付着応力度比の結果は、製品 C が 0.75, D が 0.66, F が 0.64 となった。これらの結果から、接着剤の充填不良が付着応力度へ影響を与える製品があるため、充填不良が生じた試験片を評価対象から除くことにより、付着応力度を精度よく評価できると考えられる。



(a) 割裂ひび割れ無し (b) 割裂ひび割れ有り
写真-1 押抜き試験後の試験片

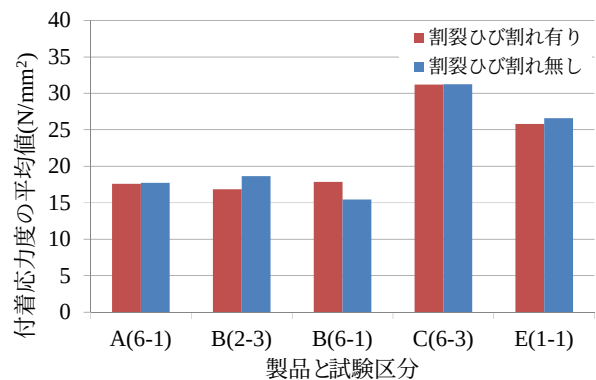


図-3 割裂ひび割れの有無による付着応力度の比較

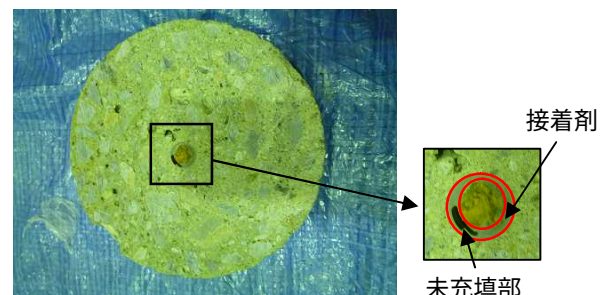


写真-2 接着剤の充填不良が生じた試験片の例

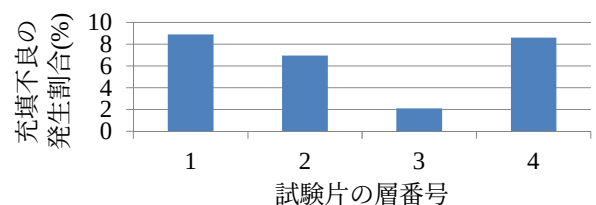


図-4 試験片の位置による充填不良発生割合

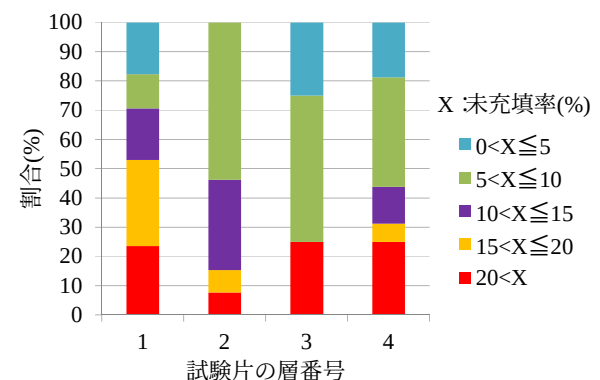


図-5 試験片位置と未充填率 X の関係

3.3 試験片の拘束による影響（締付けトルク）

押抜き試験時は、試験片の割裂破壊を抑制するため、拘束治具を用いている。その拘束治具のボルトの締付けトルクによる付着応力度への影響を確認するため、同じ試験区分の試験片で、締付けトルクが $38\text{N}\cdot\text{m}$ と $50\text{N}\cdot\text{m}$ の試験結果を比較した結果を図-7 に示す。なお、2種類の締付けトルクで評価対象となる試験片の数が同程度の結果を抽出している。締付けトルクが $38\text{N}\cdot\text{m}$ の試験片に対する締付けトルクが $50\text{N}\cdot\text{m}$ の試験片の付着応力度比は、製品 A が 1.04, C が 0.97, D が 1.10, F が 0.70 となった。この結果から、製品 F のように締付けトルクが付着応力度に比較的大きく影響する製品があるため、試験片を拘束する際の締付けトルクを一定に管理することで、付着応力度を精度よく評価することが出来ると考えられる。

3.4 試験片の拘束による影響（非拘束径）

押抜き時の試験片の非拘束径による影響を確認するため、同じ試験区分の試験片で非拘束径を $d=17\text{mm}$ と $d=25\text{mm}$ の 2 種類により押抜き試験を実施した結果を図-8 に示す。縦軸は、各製品で非拘束径ごとに平均した付着応力度とした。非拘束径を $d=25\text{mm}$ とした試験片数は表-2 に示すように $d=17\text{mm}$ とした試験片と比較して少ないが、非拘束径 $d=17\text{mm}$ の試験片に対する $d=25\text{mm}$ の試験片の付着応力度比は製品 A が 0.93, B が 0.91, C が 0.99, D が 0.99, E が 0.98, F が 0.91 となった。非拘束径 $d=17\text{mm}$ の場合の破壊形態は写真-3(a), (b), (c) に示すような破壊形態が確認され、接着剤とアンカー筋の境界で破壊が生じているもの（写真-3(a)）、接着剤とコンクリートの境界で破壊が生じているもの（写真-3(c)）、それらの破壊形態が混合したもの（写真-3(b)）であった。一方で、 $d=25\text{mm}$ の破壊形態は全て写真-3(d) に示すようなコーン状の破壊部分を含む付着破壊であった。コーン状の破壊部分を含む場合の付着応力度の評価は、コーン状の破壊部分の有無によらず試験片全体の厚さを用いた周面積により算出しており、非拘束径が $d=25\text{mm}$ の場合は、コーン破壊の影響により、純粋な付着応力度の評価を阻害していると思われる。このことから、非拘束径を穿孔径と同程度にすることにより、精度よく付着応力度が評価できると考えられる。

3.5 アルカリ液浸漬試験片の乾湿による影響

あと施工アンカーの耐アルカリ性を評価する場合、アルカリ液に浸漬した試験片を用いる。一度浸漬した試験片で押抜き試験を実施する際、湿潤した状態と乾燥させた状態で付着応力度にどの程度影響があるか検討した。試験区分 4-3（湿潤状態）と 4-4（乾燥状態）の試験結果を比較したものを図-9 に示す。この結果より、湿潤状態の試験片に対する乾燥状態の試験片の付着応力度比は、

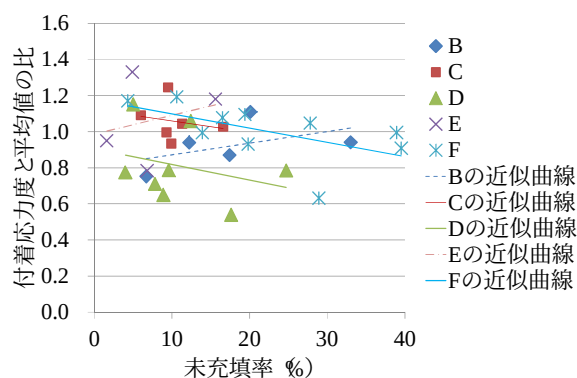


図-6 未充填率と付着応力度の関係

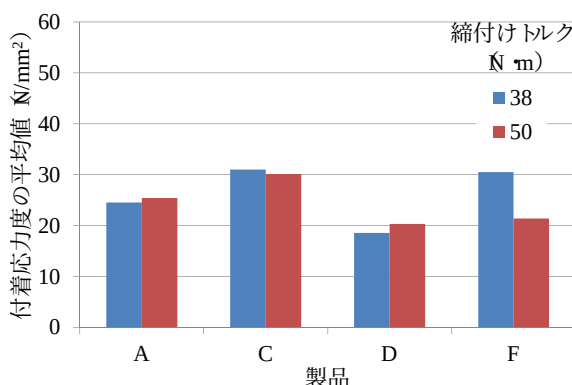


図-7 締付けトルクと付着応力度の関係

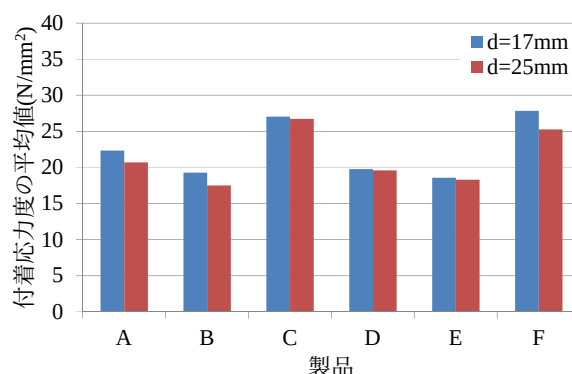


図-8 非拘束径と付着応力度の関係

製品 A が 0.95, B が 1.02, C が 1.08, D が 1.08, E が 1.04, F が 0.79 となった。製品 A, F で乾燥により付着応力度が低下する傾向が見られており、特に製品 F ではその影響が大きかった。これらの結果から、耐アルカリ性を純粋に評価するためには、アルカリ液浸漬後の試験片は、一定期間乾燥させる必要があると考えられる。

3.6 押抜き試験による影響

あと施工アンカーが構造物に使用される場合、押抜きの作用を受ける状態にあることは少なく、引抜きの作用を受けた状態にあることが多いと想定される。そのため、押抜き試験と引抜き試験の 2 種類の試験方法で付着応力度に与える影響を確認した。引抜き試験については、ETAG の基準を参考に実施した⁵⁾。

引抜き試験は、試験体を製品 A, B, C, D について製作し、荷重は鋼材引張試験用万能試験機を用いて行い、試験機下側の荷重梁を固定し、上側の荷重梁を引き上げることで、引抜き試験を行った。なお、アンカー筋の引抜き時の非拘束径は、 $d=25\text{mm}$ としているため、押抜き試験で同製品の $d=25\text{mm}$ の結果を抽出して比較を行っている。図-10 に示した結果には、各製品の付着応力度の平均値の他、各製品における最小値と最大値の範囲を実線、4 製品全体を対象とした線形近似曲線を点線で示した。引抜き試験に対する押抜き試験の付着応力度比は製品 A が 0.91, B が 0.66, C が 0.88, D が 0.97 となり、全体として低下する傾向が確認された。また、最小値と最大値の範囲から、C を除いた製品で押抜き試験の方がばらつきが大きい傾向が見られた。これらは、穿孔径と比較して非拘束径が大きい場合に破壊形態がコーン状の破壊形態となり、静的引抜き試験と比較して試験片が薄い押抜き試験では、コーン状の破壊形態の影響が比較的大きいため、付着応力度が低く、ばらつきが大きい傾向になったと推定されるが、近似曲線の結果から両試験の付着応力度には一定の相関があると考えられる。

3.7 試験片位置による影響

今回の試験では、一つの試験体から 4 つの試験片を作成している。各試験片では、接着剤の充填状態の違い等により付着応力度に差が生じる可能性が考えられるため、各試験片の試験体における位置が付着応力度へ与える影響について確認した。図-11 は、同じ試験区分で 1 層の付着応力度に対する各層の付着応力度の比を算出し、製品ごとに平均した結果を示している。この結果から、製品 F を除いて、1 層と 4 層を比較すると付着応力度が減少する傾向が見られた。1 層の試験片に対する 4 層の試験片の付着応力度比は製品 A が 0.91, B が 0.93, C が 0.93, D が 0.83, E が 0.79, F が 1.19 となった。この傾向から、削孔した穴の底部に近い試験片ほど付着応力度が低下する傾向があり、その原因としては、アンカー筋自体の傾きの影響や接着剤の充填状態の違いが試験片位置により異なるためと推定される。このことから、対象とする試験片の試験体における位置を揃えることにより、精度よく付着応力度が評価できると考えられる。

4. 試験方法が付着応力度へ与える影響

表-3 に、本論文で検討した試験方法における各項目が付着応力度へ与える影響度を、製品ごとの付着応力度の比率により示した。比率の算出過程は、製品 A の割裂破壊の項目を例に挙げると、割裂破壊が無い試験片の付着応力度の平均値に対する、割裂破壊が有る試験片の付着応力度の平均値の比率を算出し (0.99), 付着応力度に影響が無い場合の比率 (1.00) からの差 (-0.01) を算出

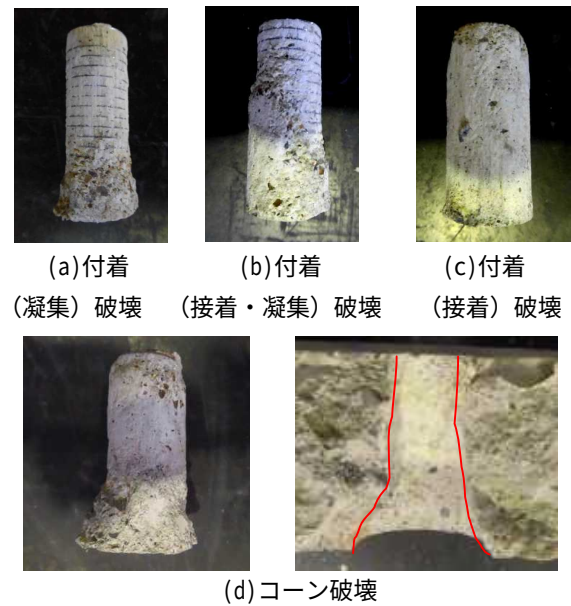


写真-3 試験片の破壊形態

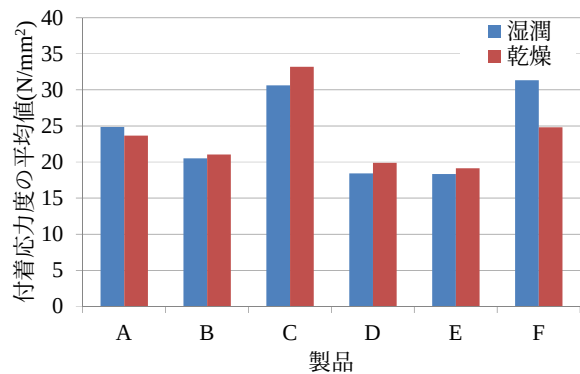


図-9 試験片の乾湿による付着応力度の比較

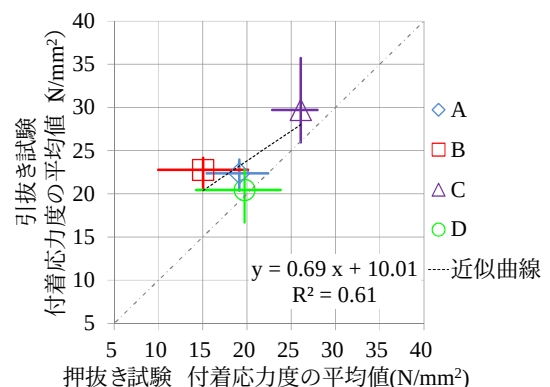


図-10 押抜き試験と静的引抜き試験の関係

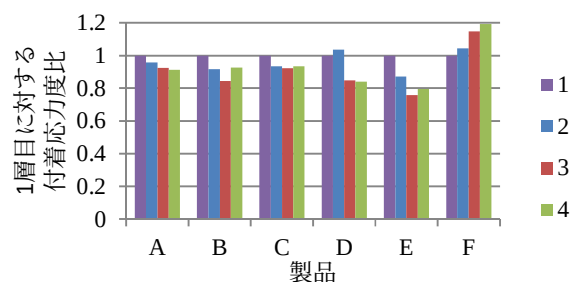


図-11 試験片の位置による付着応力度への影響

表－3 各項目が付着応力度に与える影響

製品		A		B		C		D		E		F		比率 絶対値) 平均値
項目	付着応力度比 算出条件	比率	評価 対象 数	比率	評価 対象 数	比率	評価 対象 数	比率	評価 対象 数	比率	評価 対象 数	比率	評価 対象 数	
割裂破壊	有 無	-0.01	12	-0.10 0.16	24	0.00	12	—	—	-0.03	13	—	—	0.04
未充填率	未充填率40% 未充填率0%	—	—	—	—	-0.25	14	-0.34	20	—	—	-0.32	14	0.29
締付けトルク	50N・m 38N・m	0.04	12	—	—	-0.03	26	0.10	25	—	—	-0.30	20	0.12
非拘束径	25mm 17mm	-0.07	123	-0.09	132	-0.01	71	-0.01	79	-0.02	24	-0.09	20	0.05
乾湿状態	乾燥 湿潤	-0.05	26	0.02	24	0.08	14	0.08	13	0.04	24	-0.21	8	0.10
押抜き試験	押抜き 引抜き	-0.14	13	-0.34	15	-0.12	14	-0.03	14	—	—	—	—	0.16
試験片位置	4層 1層	-0.09	73	-0.07	65	-0.07	62	-0.16	68	-0.21	22	0.19	17	0.13

している。なお、表－3 には比率の算出に用いた評価対象数と、各項目ごとに各製品の比率を絶対値として平均した値についても合わせて示す。今回の試験方法で設定した条件の範囲で各項目の影響度を比較すると、未充填率の比率の平均値が他の項目と比較して大きく、試験片の接着剤の充填不良が付着応力度の評価の精度に与える影響が大きいと考えられる。また、押抜き試験と引抜き試験の比較を除いたその他の項目の影響度は、比較的小さいが、試験方法により付着応力度へ影響がある結果が示された。したがって、これらの項目を試験における管理項目として、試験方法による付着応力度評価への影響を可能な限り減らすことで、付着応力度による耐アルカリ性評価の精度向上へ繋がると考えられる。

5. まとめ

得られた知見を以下に示す。

- (1) 試験片の非拘束径を穿孔径と同等程度にすることであと施工アンカー部の付着応力度の評価精度は向上すると考えられる。
- (2) 試験片の乾湿が、付着応力度に影響を及ぼす製品があり、浸漬した試験片は一定期間の乾燥により、付着応力度の評価精度は向上すると思われる。
- (3) 接着剤の充填不良が生じた場合、付着応力度が低下する製品があるため、充填不良が生じた試験片を評価対象から除くことで付着応力度の評価精度は向上すると考えられる。
- (4) 試験片の拘束治具における締付けトルクが、付着応力度に影響を及ぼす製品があるため、締付けトルクを一定に管理することで付着応力度の評価精度は向上すると思われる。
- (5) 押抜き試験は、引抜き試験より比較的付着応力度が

低く、ばらつきが大きくなる傾向が見られたが、両試験の付着応力度には一定の相関が見られた。

- (6) スライステストにより作成された試験片は、表面から深い位置にあった試験片ほど付着応力度が低下する傾向にあるため、位置を揃えることで付着応力度の評価精度は向上すると考えられる。

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) EOTA: ETAG001 Part five: BONDED ANCHORS, Apr.2013
- 2) American Concrete Institute: 355.4-11 Qualification of Post-Installed Adhesive Anchors in Concrete and Commentary, 2011
- 3) 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
- 4) 飯泉博章, 本橋健司, 濱崎仁, 渡辺一弘, 田沼毅彦, 棚野博之, 土屋直子: 接着系あと施工アンカーの耐アルカリ性の評価, 日本建築学会大会学術講演概要集, pp.1339-1340, 2014.
- 5) 勝山なつ季, 井口重信, 門真太郎, 田附伸一: 接着系あと施工アンカーの耐久性に関する実験的検討(静的引抜き試験), コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.2, pp1195-1200, 2015.7