

あと施工アンカーの信頼性向上に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 26～平 27

担当チーム：材料資源研究グループ

研究担当者：西崎 到、富山 禎仁

【要旨】 コンクリート内部で生じる接着系あと施工アンカーの劣化挙動を明らかにすること、その適切な評価方法を提案することを目的として、ACI 355.4-11 を参考に、KOH 水溶液への浸せきによるアンカー接着剤の経時変化を評価した。その結果、40°C で 4000 時間浸せきした場合においても、アンカーの接着強さの明確な低下は認められなかった一方で、接着剤の樹脂成分である不飽和ポリエステルは、KOH 水溶液による加水分解が進行しつつあることが明らかとなった。スライス試験片を用いた押抜試験による評価方法は、接着剤の充填不良等の影響と思われるデータのばらつきが大きく、これらのばらつきを低減させるためには、円柱供試体を用いた引抜試験を応用する手法が有効である可能性が明らかとなった。

キーワード：接着系あと施工アンカー、アルカリ、耐久性、接着強さ、押抜試験、引抜試験

1. はじめに

接着系あと施工アンカー（以下、接着系アンカーと称す）は比較的容易に定着が可能なることから、土木構造物においても、特に橋梁の耐震補強や河川構造物等の既設構造物の補強などの用途で、既に数多く使われていると共に、今後も需要が見込まれる。しかし、コンクリート内部におけるこれらの長期的な挙動については、十分に解明されておらず、信頼性の高い耐久性評価手法などの知見が得られていないのが現状である。このため、土木用途における接着系アンカーの適切な設計・施工・維持管理法は確立しておらず、基準類も存在していない状況にある。

そこで本研究では、コンクリート内部の高アルカリ環境下で生じるアンカー接着剤の劣化挙動を明らかにすることと、その適切な評価方法を提案することを目的として、接着系アンカーのアルカリ浸せき試験を行った。接着系アンカーの試験方法の一つである ACI 355.4-11¹⁾を参考に、水酸化カリウム（以下、KOH と称す）水溶液への浸せきによるアンカー接着剤の力学特

性の変化を、押抜試験によって評価した。当該規格で規定されている接着系アンカーの耐アルカリ性評価方法では、アンカーを打設したコンクリート円柱を所定の厚さにスライスした試験片を用いる。水酸化カリウム水溶液浸せき前後の試験片の押抜試験を実施し、得られたアンカー接着剤とコンクリートとの接着強さを劣化の指標とするものである。

2. 実験方法

2. 1 試験片

2. 1. 1 接着系あと施工アンカー

接着系アンカーは、製品の形態や施工方法、使用されている接着剤樹脂の種類等が異なる、さまざまな製品が市販されている²⁾。本研究ではこれらの中から、ガラス製カプセルに接着剤（主剤、硬化剤）と骨材とが封入された「カプセル方式」の製品を 3 種類用いた。これらは、カプセルをドリルで削孔した孔に挿入した後、回転・打撃を与えて施工する「回転・打撃型」2 種類（不飽和ポリエステル樹脂、ビニルエステル樹脂）

表 2-1 実験に用いた接着系あと施工アンカーの寸法と強度（製造メーカーの技術資料より）

製品種別	アンカーのタイプ	接着剤樹脂 ^{※1}	外径 (mm)	長さ (mm)	アンカー筋	ドリル径 (mm)	削孔長 (mm)	最大引張荷重 (kN)	付着強さ ^{※2} MPa
A	カプセル方式 回転・打撃型	UP	13	100	M12 ^{※3}	14.5	100	57.4	17.3
B	カプセル方式 回転・打撃型	VE	12.7	100	M12 ^{※3}	14.5	100	73.1	22.0
C	カプセル方式 打込み型	UP	13	102	M12 ^{※4}	15	110	52.7	12.7

※1: UP/不飽和ポリエステル樹脂, VE/ビニルエステル樹脂

※2: 有効付着長（削孔長－カット部長）により算出

※3: SUS304 全ねじボルト 先端斜め 45°カット

※4: SUS304 全ねじボルト 先端斜めカットなし

表 2-2 母材コンクリートの配合

水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				混和剤 A	混和剤 B
		水	セメント	細骨材	粗骨材		
70	47	163	23.3	87.4	1001	セメント×0.25%	セメント×0.003%

と、ハンマー等でボルトを打込むことでガラスカプセルを破碎し施工する「打込み型」1 種類（不飽和ポリエステル樹脂）である。実験に用いた接着系アンカーの製品規格における寸法、強度を表 2-1 に示す。

2. 1. 2 母材コンクリート

試験片の母材となるコンクリートは、内径 154 mm、高さ 150 mm の硬質ポリ塩化ビニル薄肉管（最小管厚 5.1 mm）を型枠にして打設した。母材コンクリートの配合を表 2-2 に示す。セメントには普通ポルトランドセメントを用い、粗骨材の最大寸法は 20 mm とした。母材コンクリートは打設後、型枠ごとビニール袋内に封入し、材齢 28 日目まで 20°C の環境下で封緘養生した。その後、試験に用いるまでは常温の大気中で養生した。材齢 28 日目における圧縮強度は約 23 N/mm² であり、これは ACI 355.4-11 で規定される母材コンクリートの圧縮強度 2500~4000 psi (17.2~27.6 MPa) に準拠している。

2. 1. 3 試験片作製方法

材齢約 15 週の母材コンクリート上面中央に、製造メーカーが指定する径、長さの孔をハンマードリルで設けてアンカーのカプセルを挿入し、製品 A、B については先端を斜め 45° にカットした全ねじボルト (M12) を挿入しながらカプセルに回転・打撃を与え、製品 C については先端が平らな全ねじボルト (M12) にハンマーで打撃を与えながら挿入し、施工した。

削孔やボルト挿入の際には、ハンマードリルやボルトを支持するガイド等はいなかったため、ドリル孔やボルトの傾き、ドリル孔に対するボルトの偏心が生じるケースが散見された。そこで、図 2-1 に示す方法で二軸傾斜計を用い、母材コンクリート上面の垂線に対するボルトの傾きを求めた。図 2-2 は、接着系アンカーを施工した 60 個の供試体についてボルトの傾きを計測し、ヒストグラムとして整理した結果である。得られた傾きのデータ全てを用いて、正規分布の適合性を χ^2 分布による検定により判定した結果、有意水準 5%で正規分布は棄却されなかったため、図 2-2 には正規分布もプロットしている。

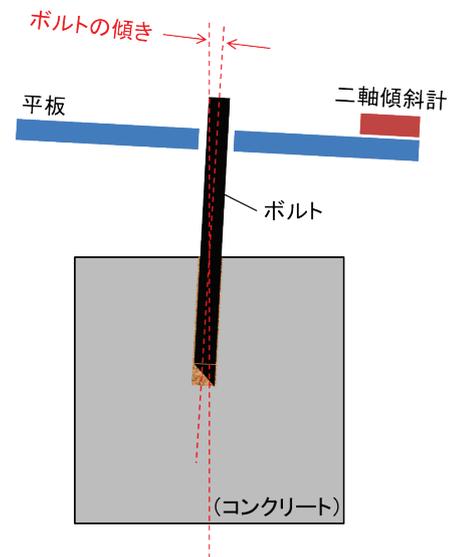


図 2-1 二軸傾斜計を用いたボルトの傾きの計測方法

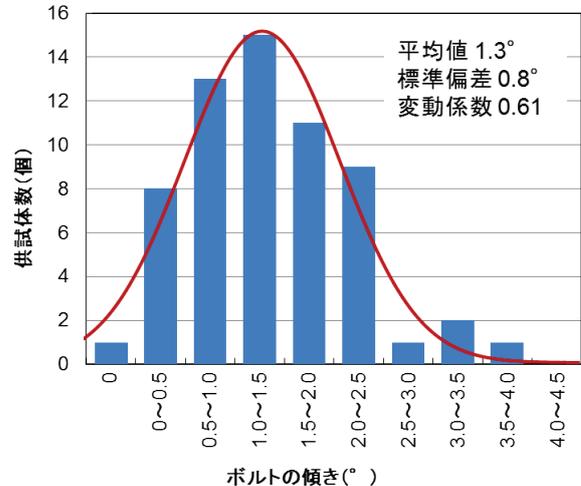


図 2-2 60 個の供試体におけるボルトの傾きの分布

供試体 60 個のボルトの傾きの平均値は 1.3°（最小 0° ~最大 3.5°）、標準偏差は 0.8°、変動係数は 0.61 であった。ACI 355.4-11 では、母材コンクリートの削孔工程においてハンマードリルの手持ち作業を許容しており、その際のドリル孔の傾きは最大で 6° までと規定している。直径 14.5 mm、深さ 100 mm のドリル孔内では、先端を斜め 45° にカットした M12 ボルト

は最大で 1.6° 程度傾く可能性がある。計測したボルトの傾き（すなわち、ドリル孔自体の傾きと、ドリル孔内でのボルトの傾きの和）は最大で 3.5° であったことから、ドリル孔内でのボルトの傾き（最大で± 1.6°）を加味しても、60 個全ての供試体において ACI 355.4-11 を満足する精度でドリル削孔ができたものと判断することができる。

アンカーの接着剤が完全に硬化した後、コンクリート円柱を水平方向に型枠ごとスライスし、これを試験片とした。試験片はコンクリート円柱の上面近傍を避け、1 体につき 3 枚ずつ採取した。試験片の厚さについて ACI 355.4-11 では $1\frac{3}{16} \pm 1/8$ インチ (27~33.3 mm) と規定しているが、本研究ではこれに準拠した 30 mm と、やや薄い 25 mm の 2 種類について試験し、結果を比較した。これは、カプセル方式の接着系アンカーの場合、製品の寸法に応じてドリル削孔長に制約があり、スライス試験片の厚さを 30 mm に設定すると、1 本のアンカーからスライス試験片を 3 枚採取するのが困難となる場合があるためである。接着系アンカー打設後のコンクリート断面と、試験片採取方法の概略を図 2-3 に示す。

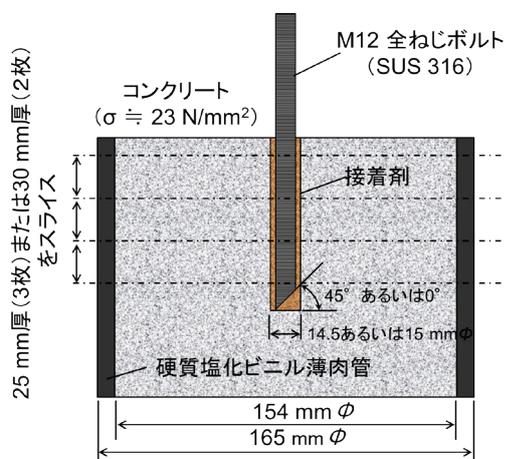


図 2-3 接着系アンカー打設後のコンクリート断面と試験片採取方法の概略

2. 2 薬液浸せき

市販の接着系アンカーに用いられている代表的な樹脂には不飽和ポリエステル樹脂、エポキシ樹脂、ビニルエステル樹脂等がある。このうち、不飽和ポリエステル樹脂は、構成分子の主鎖中に多数のエステル結合を有していることから、他の樹脂と比べて、環境の影響により加水分解を生じやすいことが知られている。このため、本研究では不飽和ポリエステル樹脂をモデ

ルケースとして取り上げ、アンカー接着剤の耐アルカリ性評価方法について検討することとした。不飽和ポリエステル樹脂にはオルソフタル酸系、イソフタル酸系、ビスフェノール系、ヘット酸系等のグレードがあり、要求性能に応じて使い分けられている³⁾。本研究では、これらの中でも耐薬品性に優れるとされている、ビスフェノール系不飽和ポリエステル樹脂を用いた製品 A を実験に供した。

作製した試験片は、プラスチック製水槽に満たした KOH 水溶液中に浸せきした。浸せき開始時の母材コンクリートの材齢はおよそ 20 週である。KOH 水溶液の濃度は約 1 mol/L で pH 13.2~13.5 程度となるように調製し、液温は恒温恒湿室内で 20°C あるいは 40°C 一定で保持した。試験片は、互いに 30 mm 程度の間隔を保つよう、水槽中に立てて静置した。浸せき試験時の試験片設置状況を図 2-4 に示す。



図 2-4 浸せき試験時の試験片設置状況

所定の時間が経過した時点で試験片を取り出し、軽く水洗した後、押抜試験を実施した。押抜試験は、試験片取り出し後から 1 時間以内に実施した。ACI 355.4-11 の規定に準拠し、20°C、湿度 60%RH の気中に暴露した試験片についても同様に評価した。スライス試験片の数量は、一水準あたり 10 枚とした。

2. 3 押抜試験

押抜試験の概略図を図 2-5 に示す。押抜試験は、厚さ 25 mm の鋼製反力板で試験片の底面全面を支持し、直径 8 mm の治具により、試験片上面よりボルト中心に荷重を加えることにより行った。反力板の開孔部の直径は 16、17、20、23 mm とし、結果を比較することとした。押抜試験には万能試験機を用い、試験速度は 1 mm/min. で行った。破壊に至るまでの最大荷重から、式 (1) により接着強さを求めた。

$$\tau_{dur,i} = \frac{N_{u,i}}{\pi d_a h_{sl}} \quad (1)$$

ここに $\tau_{dur,i}$: 接着強さ (MPa), $N_{u,i}$: 最大荷重 (N), d_a : アンカー径 (mm), h_{sl} : 試験片厚さ (mm)

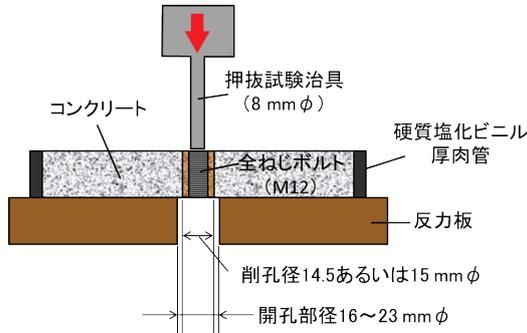


図 2-5 スライス試験片による押抜試験の概略図

2. 4 赤外線分光分析

赤外線分光分析は、有機化合物の中の炭素同士や、炭素-酸素、炭素-水素などの化学結合の様々な振動による光の吸収が、赤外線域に現れることを利用した化学分析手法である。試料の赤外線 (波長 800~4000 cm^{-1} 程度) 吸収スペクトルから、樹脂の種類や劣化の有無に関する情報が得られる⁴⁾。そこで、押抜試験後の接着剤の表面近傍 (接着剤表面から深さ数 10 μm 程度までの範囲) から採取した少量の微粉状のサンプルについて赤外線分光分析を行い、薬液浸せき前後における接着剤の化学構造の変化について調べた。

接着剤から得られる微粉状のサンプルには樹脂分と骨材分とが混合しているため、光学顕微鏡で観察しながら、樹脂分と思われる粒子のみを選別し、これをコンプレッションセルで加圧圧縮することで赤外顕微鏡を用いた透過スペクトルの測定を行った。

3. 実験結果と考察

3. 1 押抜試験における各種条件の影響

3. 1. 1 試験片厚さの影響

未浸せきの試験片 (製品 A) を用い、押抜試験を実施した。試験に用いる反力板の開孔部径は 16 mm とした。押抜試験において、母材コンクリートには肉眼で確認できるひび割れは生じなかった。試験片の厚さを ACI 355.4-11 で規定される範囲内にある 30 mm と、これよりもやや薄い 25 mm の 2 種類について試験した結果を図 3.1 に示す。試験片厚さが 30 mm、25 mm のい

ずれの場合においても、接着強さの平均値は 11.1 MPa となった。厚さ 30 mm における標準偏差、変動係数はそれぞれ 2.9 MPa、0.26 である一方、厚さ 25 mm の場合の標準偏差、変動係数は 3.0 MPa、0.27 であり、ほぼ同じ結果となった。これらの結果に基づき、以降の実験については、ACI 355.4-11 の規定外である 25 mm 厚の試験片を用いて行うこととした。

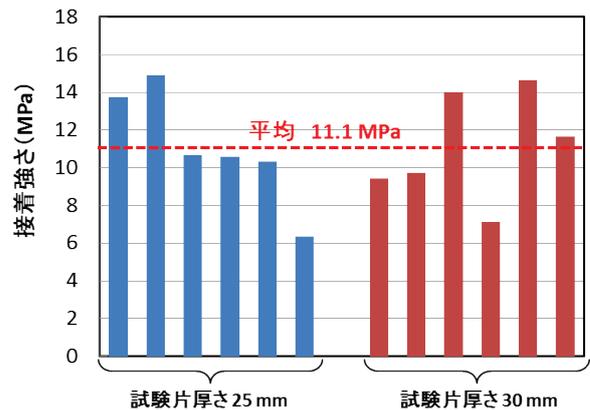


図 3-1 押抜試験における試験片厚さの影響

3. 1. 2 反力板の開孔部径の影響

ACI 355.4-11 では、押抜試験における反力板の開孔部径については、特に規定が無い。そこで、未浸せきの試験片 (製品 A) を用い、反力板の開孔部径を変えて押抜試験を実施した。その結果を図 3-2 に示す。いずれのケースにおいても、母材コンクリートには肉眼で確認できるひび割れは生じなかった。反力板の開孔部径が大きい場合、アンカーの接着強さは低くなり、開孔部径 16 mm の接着強さは平均で 11.1 MPa であるのに対し、開孔部径 17、20、23 mm ではいずれも平均で 7~8 MPa となった。開孔部径 17、20、23 mm で試験を行った場合、図 3-3 に示すように、試験片底面近傍で母材コンクリートが円錐状に破壊する「コーン状破壊」が認められた。これは、押抜せん断破壊において特徴的に見られる破壊形態である。コーン状破壊部の水平投影面積は反力板の開孔部とほぼ一致しており、開孔部が大きくなるにつれてコーン状破壊の規模も大きくなった。このことから、反力板の開孔部径が大きい場合にはコンクリートの押抜せん断破壊が支配的であり、これが図 3-2 の結果のように比較的低い荷重での破壊に繋がったものと考えられる。高アルカリ環境下における接着剤の劣化を押抜試験によって評価するためには、接着剤の強度や接着剤とコンクリートとの

接着強度を適切に評価する必要があり、そのためにはコンクリートの押抜せん断破壊の影響を極力排除する必要がある。上記の結果から、コンクリートの押抜せん断破壊の影響を排除するためには、反力板の開孔部径を小さく設定することが望ましいと言える。なお、本研究ではドリル削孔径を 14.5 mm としているが、この場合、開孔部径を 16 mm よりも小さくすると、試験時に抜け出したアンカーが開孔部内壁と干渉してしまう。したがって、本研究では反力板の開孔部径を 16 mm と設定し、以降の試験を行った。

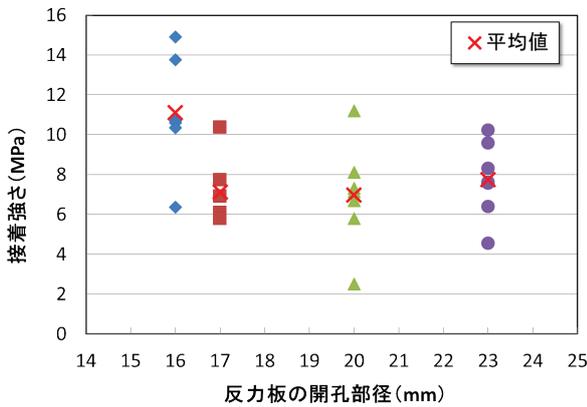


図 3-2 押抜試験における反力板の開孔部径の影響

平均値が 11.5 MPa であるのに対し、中段は 9.6 MPa、下段は 9.5 MPa となった。そこで、有意水準 5% で F 検定および t 検定を行ったところ、実験を行った範囲内では、平均値、ばらつきともに試験片採取部位による有意差は無いとの結果が得られた。

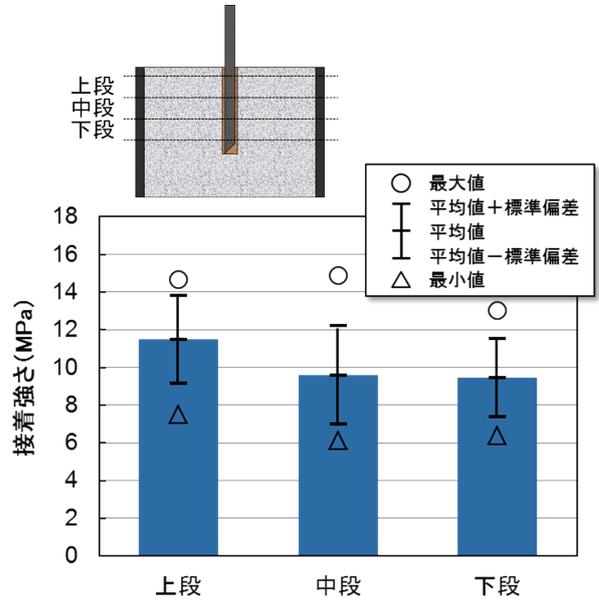


図 3-4 押抜試験における試験片採取部位の影響

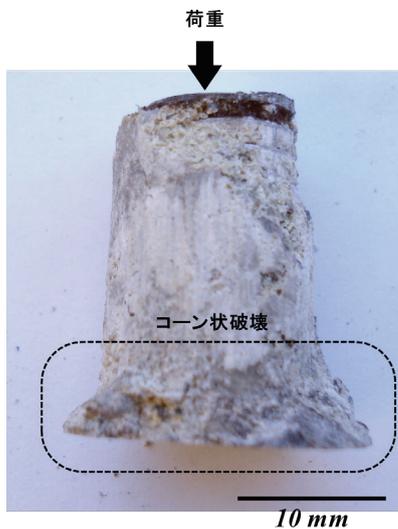


図 3-3 押抜試験後のアンカーに認められるコーン状破壊 (開孔部径 23 mm)

3. 1. 3 試験片の採取部位の影響

12 体のコンクリート円柱から採取したスライス試験片 (製品 A) を用い押抜試験を実施した結果を、試験片の採取部位 (上段、中段、下段) によって整理した (図 3-4)。上段から採取した試験片では接着強さの

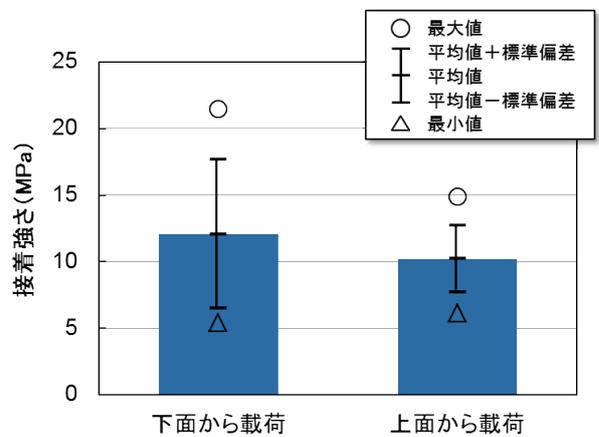


図 3-5 押抜試験における荷重方向の影響

3. 1. 4 荷重方向の影響

押抜試験において、スライス試験片の上面から荷重した場合と、試験片を上下反転させて下面から荷重した場合の結果の差異を、図 3-5 に示す。結果はそれぞれ、10 枚の試験片 (製品 A) について示している。有意水準 5% で t 検定を行ったところ、本実験の範囲内では、接着強さの平均値に荷重方向による有意差は認め

られなかった。しかしながら、試験片の下面から載荷した場合、変動係数は0.46であり、上面から載荷した場合（変動係数0.24）に比べてばらつきが著しく大きい結果となった。試験後の試験片やアンカーの外観を観察したが、載荷方向による明確な差異は認められなかった。上面から載荷した場合と、下面から載荷した場合とでばらつきに違いが生じた原因については、特定できなかった。

3. 1. 5 接着系アンカーの製品による影響

接着剤（樹脂）の種類や施工方法の異なる3種の接着系アンカーの押抜試験結果を表3-1にまとめた。製品AとBはいずれも回転・打撃型であり、接着剤の種類が異なる。接着強さの平均値は製品Bが製品Aよりも高くなっているが、これはメーカーのカタログ値（表2-1）においても同様であり、接着剤の主成分である不飽和ポリエステル樹脂とビニルエステル樹脂との性能差によるものと考えられる。一方、同種の接着剤を用いた製品Aと製品Cを比較すると、製品CはAに比べて接着強さが極端に小さく、また、ばらつきも大きい（変動係数0.51）。製品AとBの変動係数は同程度であることから、製品AとCとで結果が著しく異なったのは、施工方法の違いに起因するものであることが示唆される。

表 3-1 3種の接着系アンカーの押抜試験結果

製品種別	スライス試験片の押抜試験における接着強さ				
	最大値 (MPa)	最小値 (MPa)	平均値 (MPa)	標準偏差 (MPa)	変動係数 (-)
A	14.9	6.4	10.5	2.4	0.23
B	15.6	7.6	12.2	2.8	0.23
C	11.3	2.6	5.7	2.9	0.51

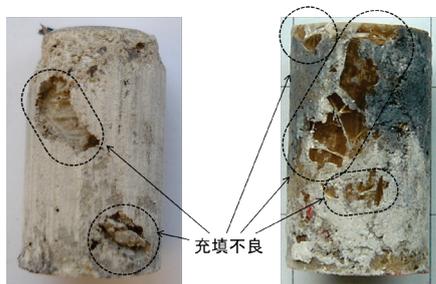


図 3-6 押抜試験後のアンカー外観

押抜試験後のアンカー外観について観察したところ、接着剤の充填不良による空隙箇所が多く見られる傾向があった（図3-6）。さらに、製品Cについては、接着

剤と硬化剤との混合不良に起因すると思われる、色相の不均一さが一部で認められた。このことから、アンカー施工時に接着剤の充填や混合が不十分な箇所があると、その周囲に応力が集中し、試験初期の比較的低い荷重で局所的な破壊が生じ、これがばらつきの要因の一つになっているものと推察される。製品AとCとでは、施工方法の違いにより接着剤の充填不良（施工不良）の頻度が異なり、これが押抜試験における結果の差異に繋がったものと考えられる。

3. 1. 6 押抜試験における破壊形態

押抜試験後の試験片（製品A）からアンカーを完全に抜き取り、外観観察を行った結果、接着剤層内で凝集破壊が生じている部分と、コンクリート/接着剤の界面破壊が生じている部分があった（図3-7）。いずれのサンプルにおいても接着剤の上側（試験片上面側）は凝集破壊しており、相対するコンクリート母材の孔内には接着剤の破片が接着したまま残留していた。一方で、接着剤の下側（試験片底面側）は、接着剤とコンクリートとの界面で破壊しており、試験片底面近傍では母材コンクリートの付着が見られた。

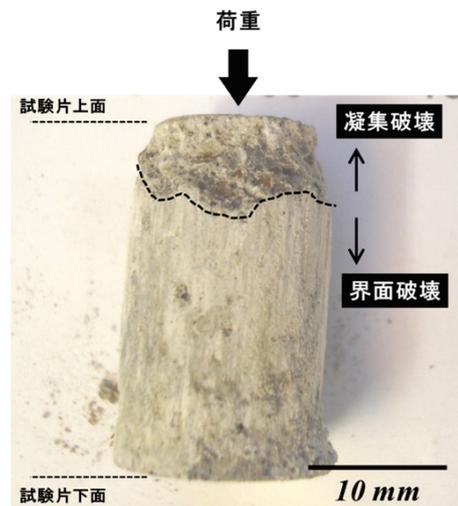


図 3-7 押抜試験後のアンカーの典型的な外観（開孔部径 16 mm）

押抜試験で得られた典型的な荷重-変位曲線（図3-8）では、最大荷重に至るまで滑らかな曲線を示す(A)のパターンと、試験初期の比較的低い荷重で極値を示す(B)のパターンが見られた。(B)を示した試験片では、試験初期の比較的低い荷重で接着剤に局所的な破壊が生じたものと推察される。押抜試験で得られ

た全ての荷重－変位曲線を (A) (B) のパターンに分類し、最大荷重の区分毎に該当する試験片数をカウントした結果を図 3-9 に示す。最大荷重が小さくなるにつれて (B) のパターンの荷重－変位曲線を示すものの割合が大きくなり、逆に最大荷重が 11 kN を超えたものについては全て (A) のパターンの荷重－変位曲線となった。

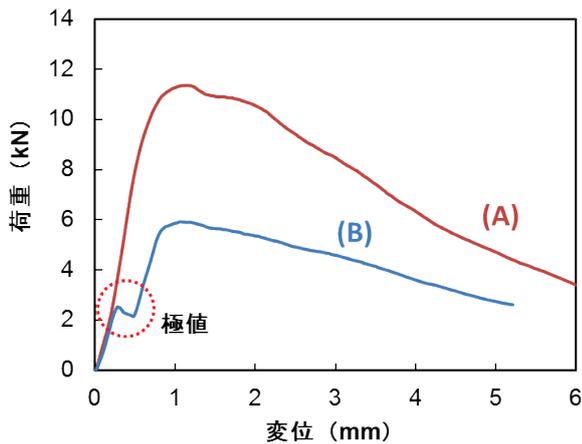


図 3-8 押抜試験における典型的な荷重－変位曲線

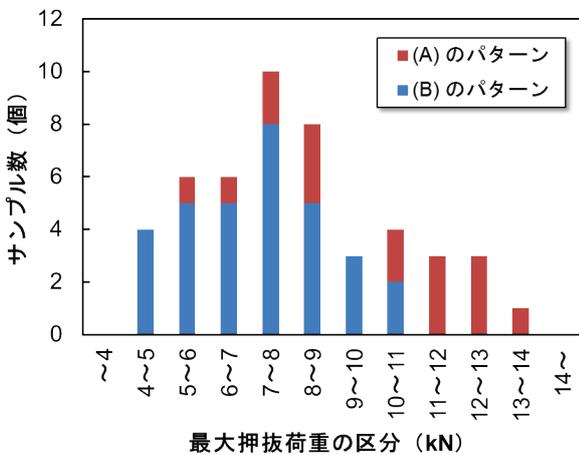


図 3-9 押抜試験における最大荷重と荷重－変位曲線のパターンとの関係

押抜試験後のアンカー外観について荷重－変位曲線のパターンに留意して観察したところ、(B) のパターンの荷重－変位曲線を示したサンプルでは (A) のパターンのものに比べて、接着剤の充填不良による空隙箇所が多く見られる傾向があった (図 3-10)。このことから、施工時に接着剤の充填が不十分な箇所があると、その周囲に応力が集中し、試験初期の比較的低い

荷重で局部的な破壊が生じ、これが (B) のパターンの挙動に繋がったものと推察される。(B) のパターンを示したサンプルで全体的に最大押抜荷重が小さい傾向となったのは、試験初期に生じる局部破壊が影響していると思われる。

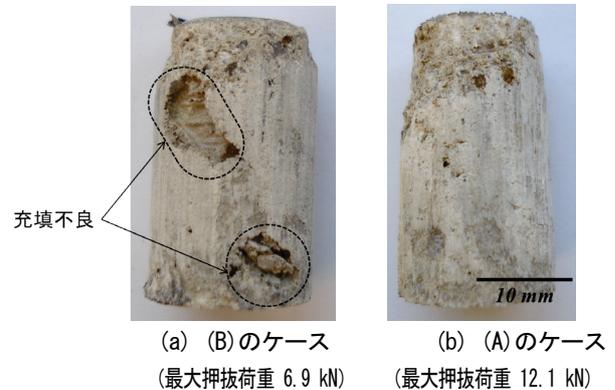


図 3-10 押抜試験後のアンカー外観の比較

3. 2 KOH 浸せきによる接着系アンカーの変化の挙動

3. 2. 1 接着系アンカーの力学的変化

40°C の KOH 水溶液に浸せきした時の、アンカーの最大押抜荷重の経時変化を図 3-11 に示す。いずれの浸せき時間についても、10 枚の試験片のデータすべてをプロットした。

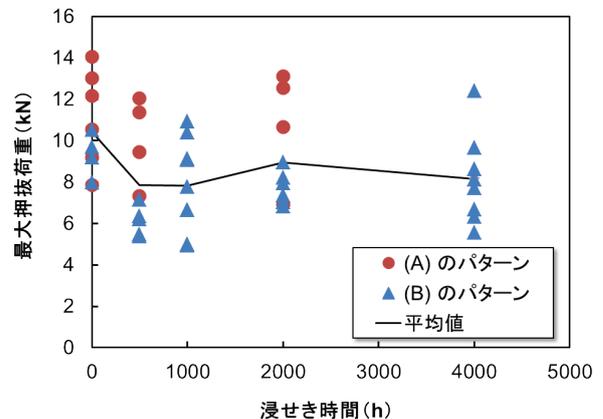


図 3-11 最大押抜荷重の経時変化(40°C, pH13.2 KOH 水溶液浸せき)

いずれのケースにおいても、母材コンクリートには肉眼で確認できるひび割れは生じなかった。浸せきの有無にかかわらずデータのばらつきは大きく、いずれの浸せき時間においても変動係数は 20～30% となった。荷重－変位曲線のパターンは、1000 時間および 4000

時間浸せき後においていずれのサンプルとも図 3-8 における(B) になったが、その他は (A) と (B) とが混在しており、浸せきによる破壊モードの変化に明確な傾向は認められなかった。各浸せき時間における接着強さの平均値を比較したところ、浸せき初期にわずかな低下が見られた後は、4000 時間浸せき後においても明確な強度低下は認められなかった。これは、20°C で浸せきした場合においても同様の挙動であった。浸せき初期の強度低下は、浸せき 0 時間（未浸せき）の試験片が乾燥状態で試験されるのに対し、浸せき後の試験片は湿潤状態で試験されているためであり、両者の物理的な状態の違いにより生じたものと考えられる。

各環境条件下で所定の時間浸せき（暴露）後、押抜試験によりアンカー接着強さを求めた結果を図 3-12 に整理した。20°C、60%RH の気中に 2000 時間暴露した試験片では最も接着強さが大きく、平均で 8.6 MPa となった。一方で、KOH 水溶液に浸せきした場合には、20°C、2000 時間で平均 6.5 MPa、40°C、4000 時間で 7.0 MPa となり、環境液の温度や浸せき時間による差異は明確ではなかった。気中暴露の試験片でアンカー接着強さがやや高かったのは、前述のとおり、押抜試験時における試験片の物理的な状態の差異によるものと考えられる。

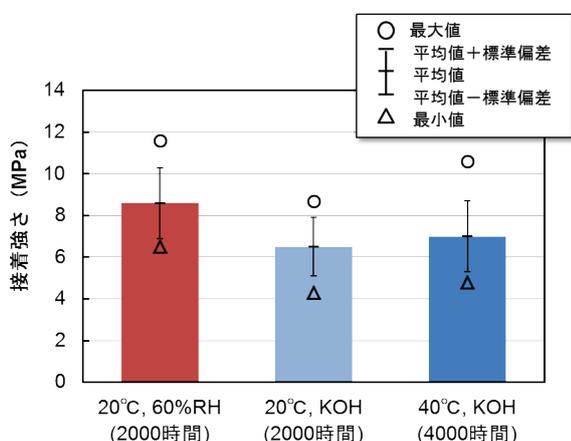


図 3-12 各環境条件下で浸せき（暴露）後のアンカー接着強さ

3. 2. 2 接着系アンカーの化学的变化

KOH 水溶液浸せきによる接着剤の劣化の有無を調べるため、押抜試験後の接着剤破断面表面近傍の樹脂について、赤外顕微鏡による化学構造分析を行った。図 3-13 は 20°C、60%RH の気中または 40°C の KOH 水

溶液中で 2000 時間経過後の、接着剤表面の赤外吸収スペクトルを示している。いずれのスペクトルにおいても 1730 cm^{-1} 付近に、エステル結合の強い吸収ピークが認められる。これは、不飽和ポリエステル樹脂のスペクトルの特徴の一つである。40°C に浸せきした接着剤のスペクトルでは、1730 cm^{-1} 付近の吸収がやや弱まり、1580 cm^{-1} 付近に新たな吸収ピークの出現の兆候が認められた。既往の研究などから、不飽和ポリエステル樹脂に含まれるエステル結合がアルカリ存在下で加水分解しカルボン酸塩を生じた場合に、同様の赤外吸収スペクトルの変化を示すことが明らかとなっている⁵⁾⁶⁾。すなわち、図 3-13 で示したスペクトルの変化から、40°C の KOH 水溶液に浸せきしたことにより、接着剤表面近傍の樹脂が加水分解を生じていることが示唆された。既往の知見⁵⁾⁶⁾などから、加水分解が進行するほど 1580 cm^{-1} 付近のピークは強くなり、逆に 1730 cm^{-1} 付近の吸収は弱まるものと考えられるため、これらの 2 つの吸収ピークの比を指標として利用し、浸せきによる加水分解の程度を評価することにした。方法は以下のとおりである⁷⁾。

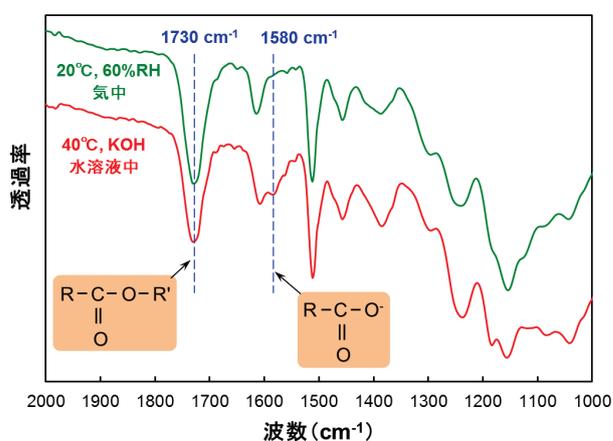


図 3-13 接着剤表面の典型的な赤外吸収スペクトル (2000 時間経過後)

- スペクトルを吸光度に換算して解析する。
- 1580 cm^{-1} 付近および 1730 cm^{-1} 付近の吸収ピークそれぞれについて、ベースラインからピークトップまでの高さを求める。ベースラインは各吸収ピークの高波数側/低波数側の 2 点のピーク立ち上がり部を結ぶ直線とする (図 3-14)。なお、1580 cm^{-1} 付近に明確な吸収ピークを持たない試料については、1580 cm^{-1} における吸光度とベースラインとの差をピーク高さとする。

c) 上記で求められる 1580 cm^{-1} 付近/ 1730 cm^{-1} 付近の吸収ピーク高さの比が当該スペクトルの加水分解度合いの指標となる。 $(1580\text{ cm}^{-1}/1730\text{ cm}^{-1}$ 比が大きいほど加水分解が進んでいることとなる。)

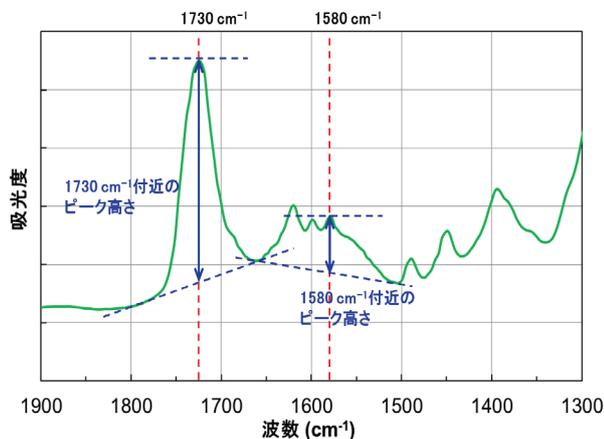


図 3-14 赤外吸収スペクトルにおけるピーク高さの求め方

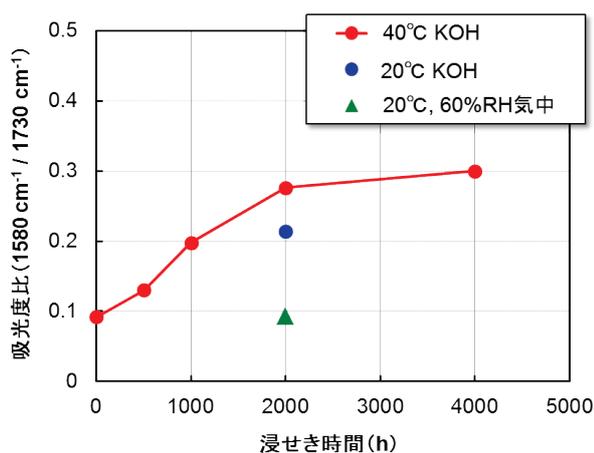


図 3-15 赤外吸収スペクトルにおける吸光度比の経時変化 (1580 cm^{-1} 付近 / 1730 cm^{-1} 付近)

赤外吸収スペクトルの解析結果を図 3-15 に示す。それぞれのデータは、押抜試験後における接着剤表面の任意の 3 か所から試料を採取してスペクトル測定を行い、解析して得られた結果の平均値を示している。 40°C の KOH 水溶液に浸せきした場合の吸光度比 (1580 cm^{-1} 付近 / 1730 cm^{-1}) の経時変化に着目すると、浸せき時間の増加に伴い、吸光度比も増加していることがわかる。すなわち、浸せき時間の増加に伴って、樹脂の加水分解の程度が進行する傾向にあることが明らかとなった。 2000 時間経過時点の吸光度比について比較すると、 20°C 浸せきよりも 40°C 浸せきの方が大きいこと

から、環境液の温度が高い方がより促進的に加水分解が進行しているものと考えられる。 20°C 、 $60\%RH$ 気中に暴露した試験片については、 2000 時間後においても初期とほぼ同程度の吸光度であることから、加水分解は生じていないものと推察される。 40°C の KOH 水溶液では 4000 時間まで浸せきを継続したが、この時点においても吸光度比は上昇傾向にあると考えられることから、引き続き浸せきを継続し、さらに長期のデータを取得していきたい。

試料ごとに、押抜試験で得られたアンカーの接着強さと、赤外吸収スペクトルにおける吸光度比 (1580 cm^{-1} 付近 / 1730 cm^{-1}) との関係プロットしたグラフを図 3-16 に示す。これによると、本実験からは吸光度比の大小と押抜試験による接着強さとの間には、明確な相関が認められなかった。その理由の一つとして、押抜試験における結果のばらつきの大きさ (変動係数 $20\sim 30\%$) が挙げられる。すなわち、接着系アンカーの接着強さをアルカリによる劣化の指標として用いるためには、ばらつきを低減するための試験条件・方法の改良が必要であると思われる。押抜試験結果にばらつきが生じる要因としては、図 3-10 で示したような接着剤の充填不良や、アンカーと母材コンクリートとの接着面に位置するコンクリートの粗骨材の影響等が考えられる。これらの要因による接着特性への影響は、接着剤の充填不良部の大きさや、コンクリートの骨材粒径に対して、アンカーと母材コンクリートとの接着面積を十分大きくすることにより、低減させることが可能であると推察される。すなわち、スライス試験片の厚さをより大きく設定したり、アンカーを打設したままスライスせずに試験に供したりするなど、試験条件・方法を改良することが望ましいと考えられる。

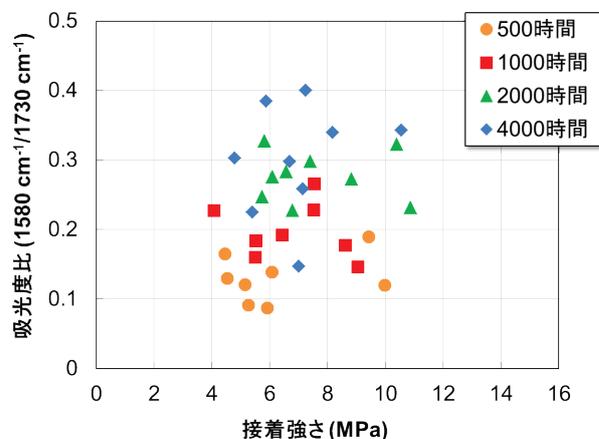


図 3-16 吸光度比とアンカーの接着強さとの相関 (40°C 、KOH 水溶液浸せき)

一方で、本実験では浸せき時間が短く、接着剤の力学性能に影響が及ぶほど樹脂の加水分解が進んでいないことも考えられることから、今後、さらに長期の浸せきを行い、アンカーの劣化挙動について引き続きデータを収集したい。

3. 2. 3 接着剤断面の劣化分布

赤外線分光分析は、接着剤表面の任意の複数箇所から試料を採取して行ったが、試料採取箇所による吸光度比、すなわち樹脂の加水分解程度の違いは明確ではなかった。そこで、ATR（減衰全反射）法による接着剤断面の赤外線分光分析を行い、接着剤の深さ方向について、樹脂の加水分解程度をさらに詳細に分析した。

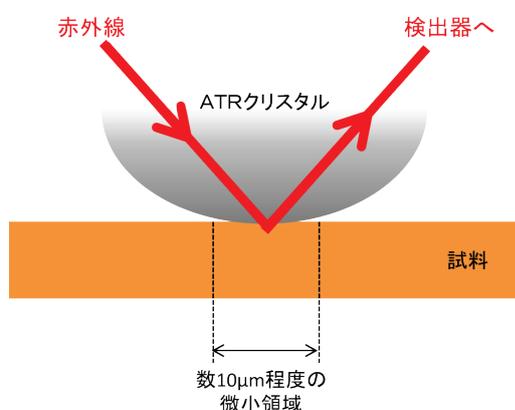


図 3-17 ATR 法の概略

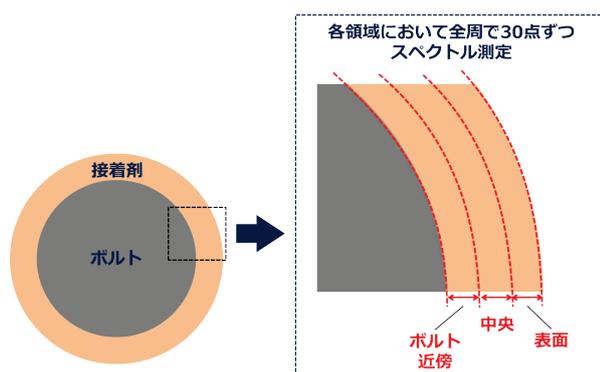


図 3-18 ATR 法による接着剤断面分析方法の概略

ATR 法は、先の尖ったゲルマニウム等の ATR クリスタルと試料とを密着させ、赤外線をクリスタル/試料界面で全反射させたときの反射スペクトルを測定する方法であり、数 10 μm の微小領域を非破壊で直接分析することができる（図 3-17）。図 3-15 で分析に供し

たものとは異なるアンカー試料を任意に抽出し、ボルトごと専用の樹脂で包埋した後、精密切断機を用いてボルトの中心軸に対しほぼ垂直な平面が得られるようにボルトごとスライスし、分析試料を作製した。試料の分析面は精密切断機で切断したまま研磨はせず、純水で軽く洗浄した後に分析に供した。接着剤表面から接着剤/ボルト界面まで、接着剤の深さ方向に 3 つ（接着剤表面、中央、ボルト近傍）の領域に区切り、領域ごとにそれぞれ 30 か所の測定点を顕微 ATR 法で測定した。測定点は接着剤断面を光学顕微鏡で観察し、樹脂と思われる部分から選定した。このとき、それぞれの測定点は、接着剤表面の領域では接着剤表面から数 10~400 μm 程度の範囲、中央の領域では接着剤表面から 400~800 μm 程度の範囲、ボルト近傍の領域ではボルトから数 10~400 μm 程度の範囲となるよう設定した。顕微 ATR 法による接着剤断面の赤外線分光分析方法の概略について、図 3-18 に示した。

20°C、60%RH 気中暴露あるいは 40°C、KOH 水溶液浸せき 2000 時間後の接着剤断面について、顕微 ATR 法により赤外線分光分析を行った結果を図 3-19 に示す。気中暴露の場合、深さ方向での吸光度比の変化はほとんど無く、いずれの領域においても 0.1~0.2 程度となっている。一方、40°C の KOH 水溶液に浸せきした試料については、ボルト近傍の領域では気中暴露とほぼ同じ吸光度比を示したが、表面に近づくにつれて吸光度比の分布は大きくなり、中央では 0.1~0.4 程度、表面では 0.1~0.5 程度となった。表面領域における吸光度比の値は図 3-15 で得られた値と若干異なっているが、これは分析に供したアンカー試料が互いに異なっていること、測定箇所における接着剤表面からの深さが異なる（図 3-15 の場合は接着剤表面から数 10 μm 程度までをサンプルとして用いている）こと、同じ深さで測定した場合においても測定箇所によって値にばらつきが生じること、などが理由として考えられる。

接着剤断面の吸光度比の分布から、気中暴露の接着剤においては、樹脂の加水分解はほとんど生じていないものと考えられる。これと同程度の吸光度比を示す箇所が、KOH 水溶液浸せき後の接着剤表面や中央部にも含まれることから、いずれの領域においても樹脂の加水分解が進行している箇所と、そうでない箇所とが混在した状態となっているものと思われる。吸光度比は接着剤表面の方が中央よりも相対的に大きいことから、この浸せき試験においては、加水分解による接着剤の劣化は接着剤表面から内部へと徐々に進行しているものと推察される。

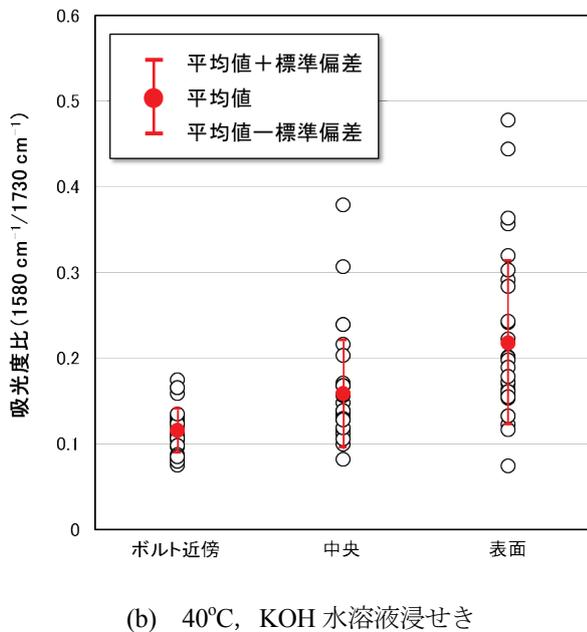
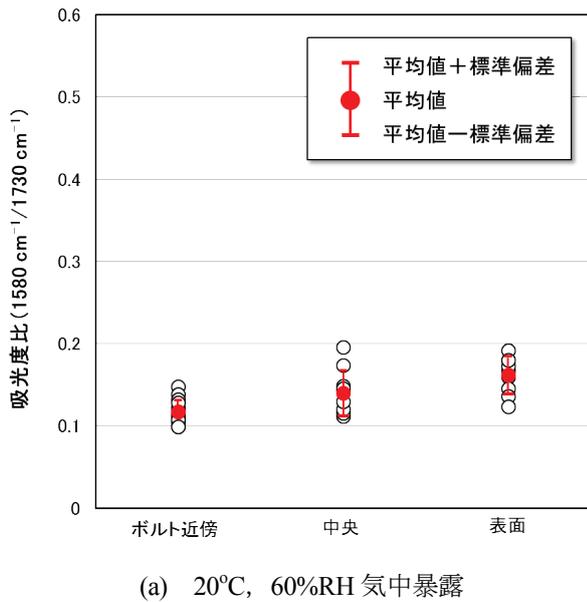


図 3-19 2000 時間浸せき（暴露）後における接着剤断面の吸光度比の分布

3. 3 引抜試験によるアンカーの接着特性の評価

3. 3. 1 概要

接着剤の充填不良が引抜試験における結果のばらつきの一因であるならば、アンカーと母材コンクリートとの接着面積を十分大きくすることにより、その影響を低減できるものと考えられる。そこで、アンカー（製品 A）を打設した円柱供試体をスライスせずに試験に供することとし、引抜試験による接着系アンカーの挙動を調べた。引抜試験は図 3-20 に示す通り、万能試験

機の治具に供試体を反力板を介してボルト・ナットで固定して行った。試験速度は引抜試験と同様、1 mm/min.とした。

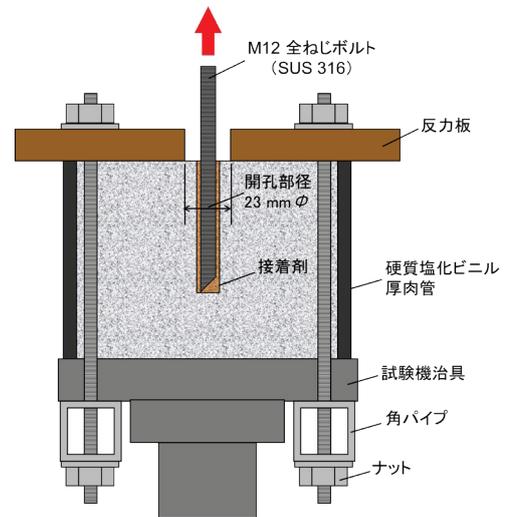


図 3-20 円柱供試体による引抜試験の概略図

3. 3. 2 反力板の開孔部径の影響と破壊形態

引抜試験と同様に反力板の開孔部径を変えて引抜試験を行ったところ、開孔部径が 16、17、20 mm ではボルトの破断により、23 mm ではアンカーの付着切れにより試験が終了した。開孔部径 20 および 23 mm の場合の荷重-変位曲線の一例を図 3-21 に示す。

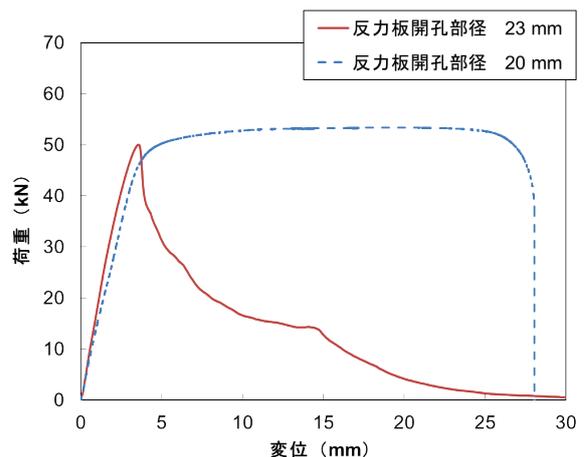


図 3-21 引抜試験における荷重-変位曲線の一例

本研究で用いた M12 ボルト（SUS304）の公称引張破断荷重は約 49.7 kN であり、アンカーの最大引張荷重 57.4 kN よりも小さい。開孔部径が 20 mm 以下の場合にはアンカーに対する反力板の拘束力が大きく、ア

ンカーが付着切れを起こすことなく、ボルトの降伏・破断に至るものと考えられる。その一方で、開孔部径を 23 mm よりも大きくすると、コンクリート母材のコーン状破壊が生じ、アンカーの接着強さを適正に評価することができない。そのため、以降の実験では反力板の開孔部径を 23 mm に設定して行った。開孔部径 23 mm の反力板を用いた場合、引抜試験時にコンクリート母材にひび割れが生じた (図 3-22)。これは、押抜試験の際には見られなかった現象である。

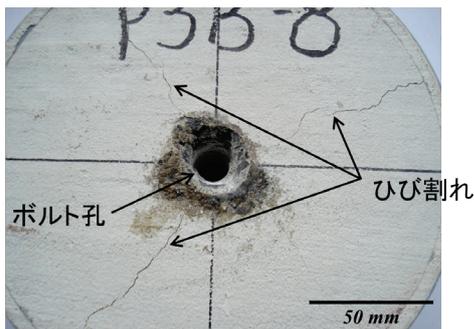


図 3-22 引抜試験後の供試体外観

3. 3. 3 供試体の作製精度と強度への影響

図 2-2 でボルトの傾きを求めた 60 個の円柱供試体のうち、任意の 10 個について引抜試験を行い、アンカーの接着強さとボルトの傾きとの関係を調べた (図 3-23)。その結果、引抜試験により得られたアンカー接着剤の接着強さは、ボルトの傾きによらず概ね一定範囲内の値をとることが明らかとなった。

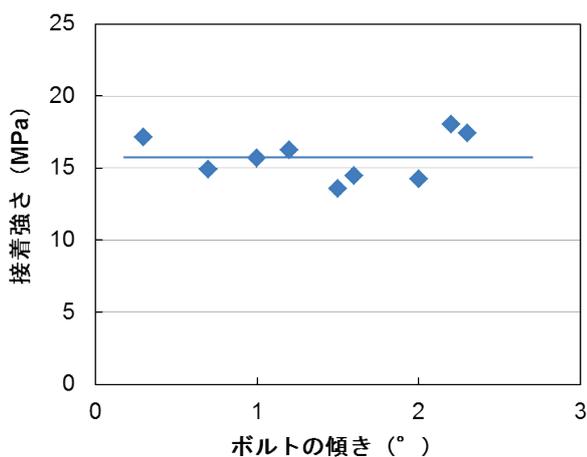


図 3-23 ボルトの傾きと接着強さとの関係

3. 3. 4 押抜試験との比較

図 3-23 で示した引抜試験による接着強さと、比較の

ため、同じく 10 体の供試体 (25 mm 厚のスライス試験片 30 枚) について押抜試験を行い得られた接着強さについて、図 3-24 に示した。引抜試験によるアンカー接着強さの平均値は 15.8 MPa であり、押抜試験で得られた値のおよそ 1.5 倍となっており、カタログ値 (表 2-1) により近い。また、押抜試験における変動係数が 0.25 であるのに対し、引抜試験では 0.09 であり、ばらつきが大幅に低減された。この結果から、よりばらつきの少なく、実際の使用条件に近い試験方法として、円柱供試体を用いた引抜試験を応用する手法が提案できると考えられる。

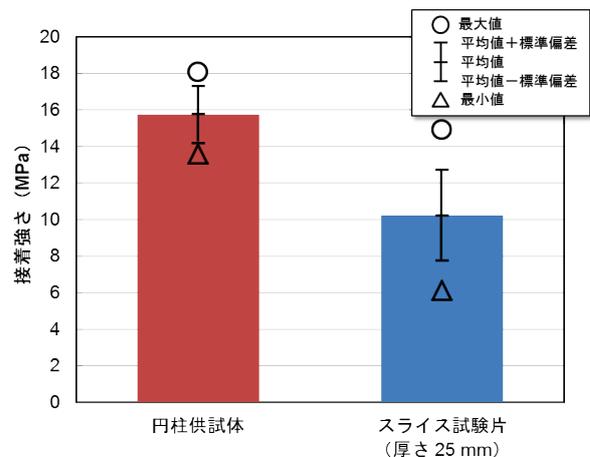


図 3-24 引抜試験 (円柱供試体) と押抜試験 (スライス試験片) との比較

4. まとめ

本研究では、コンクリート内部を模した高アルカリ環境下における接着系あと施工アンカーの劣化挙動と、その試験評価方法について検討した。ACI 355.4-11 の試験方法を参考に、水酸化カリウム水溶液への浸せきによる接着剤の力学特性の変化を、アンカーの押抜試験によって評価した。また、浸せき前後のアンカー接着剤について赤外線分光分析を行い、接着剤の化学構造の変化を調べた。

実験の結果、40°C で 4000 時間浸せきした場合においても、アンカーの接着強さの明確な低下は認められなかった。一方で、接着剤の樹脂成分である不飽和ポリエステルは、水酸化カリウム水溶液による加水分解が進行しつつあることが明らかとなった。加水分解の程度は環境液の温度が高い方が大きく、また、浸せき時間が長くなるにつれ、接着剤表面から内部へ徐々に進行する挙動を示した。

加水分解反応の進行程度の指標となる、赤外吸収スペクトルの吸光度比の大小は、押抜試験による接着強さと明確な相関が認められなかった。この理由の一つとして、押抜試験における結果のばらつきの大きさが挙げられる。押抜試験結果にばらつきが生じる要因としては、接着剤の充填不良や、アンカーと母材コンクリートとの接着面に位置する母材コンクリートの粗骨材の影響等が考えられる。これらの要因による接着特性への影響を低減させるためには、アンカーと母材コンクリートとの接着面積を十分大きくすることが望ましいと考えられる。

アンカーをコンクリート円柱に打設し、スライスせずにいった引抜試験では、スライス試験片を用いた押抜試験に比べてデータのばらつきが小さい結果となった。この結果から、よりばらつきの少なく、実際の使用条件に近い試験方法として、円柱供試体を用いた引抜試験を応用する手法が提案できると考えられる。

参考文献

- 1) ACI 355.4-11: Qualification of Post-Installed Adhesive Anchors in Concrete and Commentary, 2011.
- 2) 日本建築あと施工アンカー協会：あと施工アンカー技術資料 第7版, 66 p., 2009.
- 3) 強化プラスチック協会：だれでも使える FRP - FRP 入門 -, pp. 42-55, 2002.
- 4) 泉 美治, 小川政彌, 加藤俊二, 塩川二郎, 芝 哲夫: 機器分析のてびき 第2版, pp. 1-23, 化学同人, 1996.
- 5) Chin, J. W., Aouadi, K., Haight, M. R., Hughes, W. L. and Nguyen, T.: Effects of water, salt solution and simulated concrete pore solution on the properties of composite matrix resins used in civil engineering applications, Polymer Composites, Vol. 22, Issue 2, pp. 282-298, 2001.
- 6) 富山禎仁, 久保内昌敏, 仙北谷英貴, 津田 健: 高分子系材料の腐食検知をめざした赤外線透過ファイバセンサの特性評価, 強化プラスチック, Vol. 49, No. 6, pp. 258-264, 2003.
- 7) トンネル天井板の落下事故に関する調査・検討委員会: 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, pp. 29-30, 2013.

A STUDY ON THE IMPROVEMENT IN RELIABILITY OF POST-INSTALLED ANCHOR

Budget: Grants for operating expenses

Research Period: FY2014-2015

Research Team: Materials and Resources Research Group

Author: Nishizaki, I. and Tomiyama, T.

Abstract: The aim of this study was to elucidate the degradation mechanism of post-installed adhesive anchor in alkaline solution and to establish a method for evaluating its alkali resistance properties. We investigated the mechanical properties of the adhesive anchor in potassium hydroxide (KOH) solution with reference to ACI 355.4-11 standard. Changes in chemical structure of the adhesive in the alkaline solution were analyzed with infrared (IR) spectroscopy. The results indicated no significant deterioration in the bond strength of the adhesive after 4000 hours of immersion in KOH solution at 40°C. However, unsaturated polyester resin, a component of the adhesive anchor, showed hydrolysis in KOH solution. The hydrolysis reaction was found to accelerate with increasing temperature of the alkaline solution and progress from the surface to inside with increasing time of immersion.

Key Words: post-installed adhesive anchor, durability, immersion test, alkaline fluid, punch test