接着系あと施工アンカーの 耐アルカリ性評価方法に関する検討

富山 禎仁¹・西崎 到²

¹正会員 国立研究開発法人土木研究所 材料資源研究グループ (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)
E-mail: tomiyama@pwri.go.jp

²正会員 国立研究開発法人土木研究所 材料資源研究グループ (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)
E-mail: nisizaki@pwri.go.jp

本報では、コンクリート内部の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結果を報告する。ACI 355.4-11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、アンカーのスライス試験片の押抜試験により評価した。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、その化学構造の変化を調べた。その結果、40°Cで4000時間浸せきした場合においても、接着強さの明確な低下は認められなかった。一方、接着剤の樹脂成分である不飽和ポリエステルは、アルカリ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。

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

1. はじめに

接着系あと施工アンカー（以降、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付帯施設や耐震補強などに広く用いられている。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、十分に解明されていないのが現状であり、さらなるデータの充実が必要である。

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。その一部として、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。

本報では、スライス試験片の厚さや押抜試験における反力板の開孔部径等を変えて実験を行い、破壊形態や最大押抜荷重に及ぼす試験条件の影響について検討した結果と、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、接着剤の樹脂成分の化学構造変化から、KOH水溶液による接着剤の劣化挙動について検討した結果について報告する。

2. 実験方法

(1) 試験片

a) 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」の製品を用いた。このカプセルは、ドリル孔に挿入し回転・打撃を与えて施工する「回転・打撃型」である。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を実験に供した。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-1に示す。

b) 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194 mm、高さ150 mmの硬質塩化ビニル厚肉管（管厚11 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℃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。

c) 試験片作製方法

製造メーカーが指定する方法により、母材コンクリートに接着系アンカーを施工した。材齢約15週の母材コンクリート上面中央に直径14.5 mm、深さ100 mm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、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・打撃を与えて施工した。

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-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。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

図-1 二軸傾斜計を用いたボルトの傾きの計測方法

図-2 60個の供試体におけるボルトの傾きの分布

表-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）

外径 (mm)	長さ (mm)	容量 (mL)	アンカー筋	ドリル径 (mm)	削孔長 (mm)	最大引張 強度(kN)	付着強さ ^{※2} N/mm ²
13	100	10	M12 ^{※1}	14.5	100	57.4	14.3

※1: SUS304 全ねじボルト 先端斜め45° カット

※2: 有効付着長（削孔長－カット部長）により算出

表-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%

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 3/16±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-3に示す。

(2) 薬液浸せき

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-4に示す。

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。

(3) 押抜試験

押抜試験の概略図を図-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-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

図-4 浸せき試験時の試験片設置状況

図-5 押抜試験の概略図

(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 $800\sim 4000\text{ cm}^{-1}$ 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 $10\text{ }\mu\text{m}$ 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

(1) 押抜試験における試験片厚さの影響

未浸せきの試験片を用い、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-6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。

(2) 押抜試験における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-7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 $7\sim 8\text{ MPa}$ となった。開孔部径 17 、 20 、 23 mm で試験を行った場合、図-8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

図-6 押抜試験における試験片厚さの影響

図-7 押抜試験における反力板の開孔部径の影響

図-8 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 ）

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拔せん断破壊が支配的であり、これが図-7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る。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。

(3) 押抜試験における破壊形態

押抜試験後の試験片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-9)。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-9 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-10)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部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-11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。

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

図-10 押抜試験における典型的な荷重-変位曲線

図-11 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

図-12 押抜試験後のアンカー外観の比較

見られる傾向があった(図-12)。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ものと思われる。

(4) KOH浸せきにおける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-13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。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-10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であると考えられる。

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-14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

図-13 最大押抜荷重の経時変化(40°C, pH13.2 KOH水溶液浸せき)

図-14 各環境条件下で浸せき(暴露)後のアンカー接着強さ

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であると考えられる。

(5) KOH浸せきにおける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-15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-15で示したスペクトルの変化から、40℃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⁾。

- 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-16)。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。
- 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の指標となる。(1580 cm⁻¹／1730 cm⁻¹比が大きいほど加水分解が進んでいることとなる。)

赤外吸収スペクトルの解析結果を図-17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℃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℃浸せきよりも40℃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℃、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℃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)との関係をプロットしたグラフを図-18に示す。これによると、本実験からは吸光度比の大小と押

図-15 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)

図-16 赤外吸収スペクトルにおけるピーク高さの求め方

図-17 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)

図-18 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)

図-19 ATR法の概略

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20～30%）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-12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。

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。

(6) 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、樹脂の加水分解の程度をさらに詳細に分析した。

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

図-20 ATR法による接着剤断面分析方法の概略

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-19）。図-17で分析に供したものと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-20に示した。

図-21 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

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-21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-17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-17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。

4. まとめ

本報では、コンクリート内部の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結果について報告した。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。すなわち、接着系アンカーの接着強さを指標として、アンカーの劣化を評価するためには、スライス試験片の厚さを大

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したりするなど、ばらつきを低減するための試験条件や試験方法の改良が必要であると思われる。

今後、より長時間の浸せき試験を行うとともに、異なる樹脂系での試験や分析データを取得し、アルカリ環境下での接着系アンカーの劣化メカニズムや、ばらつきの少ない試験評価方法について、さらに詳細に検討していきたい。

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, 塩川二朗, 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.

(2015. 12. 4 受付)

EXPERIMENTAL STUDY ON ALKALI RESISTANCE OF POST-INSTALLED ADHESIVE ANCHOR

Tomonori TOMIYAMA and Itaru NISHIZAKI

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.