

論文 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)

内藤 圭祐*1・山田 宣彦*2・井口 重信*3

要旨: 有機系接着剤を用いたあと施工アンカーの耐アルカリ性の評価手法を検討するため、ETAG で標準化されている評価試験方法を参考に、2000 時間のアルカリ溶液浸漬試験を実施した。この結果、アルカリ溶液浸漬前後で一部の製品を除き、あと施工アンカー部の付着応力度、初期剛性の低下がなかったことを確認した。また、試験方法として、押抜き試験時の試験片の拘束条件および試験片の乾湿が付着応力度、初期剛性の評価に影響すること、付着応力度が高いほど試験片の割裂破壊の発生割合が高くなることが分かった。

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を使用する際には、その性能の評価が重要であり、特に長期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、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エポキシ樹脂等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、アルカリ性環境で加水分解を生じ、物理的性状を損なう場合がある恐れがあることから、アルカリ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⁾が、日本においては、その試験方法が少ないのが現状である。

また、接着系あと施工アンカーの耐久性に関しては、ETAG²⁾や ACI³⁾で標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り、評価項目の1つである耐アルカリ性の試験方法についても同様である。

本試験では、ETAG で標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を検討することを目的とする。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、その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する(以下、スライステスト)。しかしながら、浸漬時間を2000時間とする妥当性や押し抜き試験時の試験片の拘束条件が不明確となっていることが課題である。

そこで本試験では、4種類、6製品の有機系接着剤材料を用いてスライステストを実施し、アルカリ液浸漬前後における破壊形態、付着応力度および初期剛性の変化を

評価することにより、強アルカリ環境があと施工アンカー一部の性能に与える影響を確認するとともに、浸漬時間や拘束径が試験結果に与える影響を確認した。本稿では、このうち ETAG で規定される浸漬時間(2000時間)を対象としたスライステストの結果について主に述べる。

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て、紙製のポイド管にコンクリートを流し込み、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挿入し、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、表-1に示すように、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とし、4種類(エポキシアクリレート、エポキシ、アクリル、ビニルエステル)、6製品を選定した。アンカー筋打設後、ダイヤモンドカッターにて円柱被着体を厚さ30mm程度で切断し、試験片を製作した。なお、試験片の設計基準強度は、24N/mm²とし、2000時間の暴露および浸漬試験片の押し抜き試験時のコンクリートの圧縮試験および割裂引張試験結果は、圧縮強度で平均28.2N/mm²、割裂引張強度で平均2.71N/mm²であった。

2.2 試験方法

ETAGでは、耐アルカリ性のスライステストについて、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

*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 (正会員)

*3 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使用する有機系接着剤

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 アプレポリマー	変性ビニルエステル	ポリ	変性アクリル樹脂	エポキシアクリレート チコマー	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

温 20℃±3℃，湿度 60%±5%の気候条件下で保存する。

- ・ アルカリ溶液は、水にカリウム (KOH) 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、保管期間中に pH=13.0 を下回らないようにし、pH を少なくとも毎日確認する。
- ・ 試験片は、アルカリ液に浸漬する試験片と比較用の暴露試験片をそれぞれ 10 体ずつ用意し、押抜き試験を行う。
- ・ 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。

本試験における試験片諸元を表-2 に示す。なお、表には、所定時間までの試験片保管状況および後述する押抜き試験時の試験片の乾湿の状態を示した。試験片は、浸漬開始時点での暴露試験片 (AL1-1)、2000 時間のアルカリ溶液浸漬用試験片 (AL2-2) と比較用の暴露試験片 (AL2-1) を各製品ともに 12 個ずつ用意した。AL2-3 は、押抜き試験時の試験片の拘束による影響を確認するため、飯泉ら⁴⁾の試験を参考にし、非拘束径を $d=25\text{mm}$ とした。AL2-4 では、アルカリ溶液浸漬後の試験片の乾湿による影響を確認するため、各製品ともに 2000 時間の浸漬後、試験片が湿潤の状態ですぐに押抜き試験を実施した。

(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、暴露試験片ともに温度は 20℃±3℃，湿度は 60%±5%の環境で保管した。アルカリ液に浸漬した試験片 (AL2-2) は、浸漬後から押抜き試験までの乾燥期間を 1 週間とした。

(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、試験状況を写真-1 に示す。試験機には、押抜き用の鋼棒 (SNB7) を取り付け、試験片の非拘束径は、AL2-3 を除き $d=17\text{mm}$ 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、万能試験機のストローク変位により測定した。

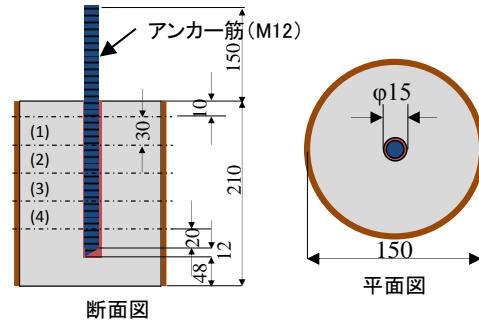


図-1 試験片製作概要図

表-2 試験片諸元

	試験片の保管	押抜き時の試験片乾湿	時間 (hr)	非拘束径 (mm)	試験片数 (個)					
					A	B	C	D	E	F
AL1-1	暴露	乾燥	0	17	12	12	12	12	12	12
AL2-1	暴露	乾燥	2,000		12	12	12	12	12	12
AL2-2	浸漬	乾燥	2,000		12	12	12	12	12	12
AL2-3	暴露	乾燥	2,000	25	1	1	1	1	1	1
AL2-4	浸漬	湿潤	2,000	17	2	2	2	2	2	2

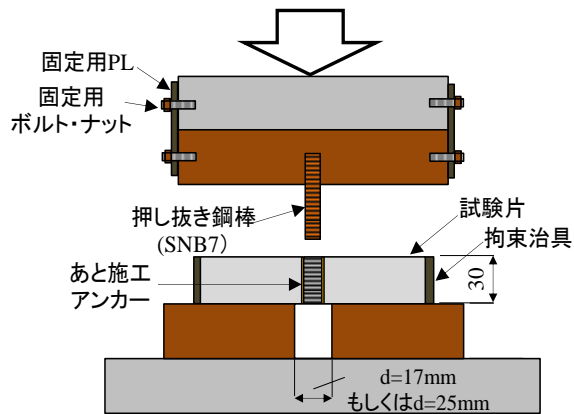


図-2 押抜き試験装置概要図

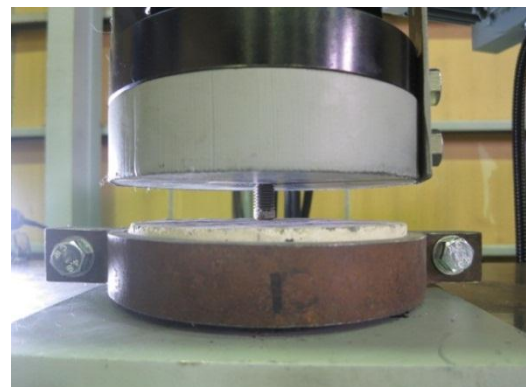


写真-1 押抜き試験状況

3. 試験結果

3.1 破壊性状

押抜き試験による試験片の破壊形態を写真-2及び写真-3に示す。試験片の破壊形態は、押抜きにより割裂がない試験片(写真-2(a))と割裂が生じた試験片(写真-2(b))が確認された。また、写真-3に示すように、押抜かれた接着剤およびアンカー筋を確認したところ、接着剤とアンカー筋の境界で破壊が生じているもの(以降、付着(凝集)破壊(写真-3(a))と接着剤とコンクリートの境界で破壊が生じているもの(以降、付着(接着)破壊(写真-3(b))と付着(接着)破壊と付着(凝集)破壊が混合したもの(以降、付着(接着凝集)破壊(写真-3(c))があった。AL1-1, AL2-1, AL2-2の接着剤およびアンカー筋の破壊形態の割合を表-3に示す。ここでは、割裂の有無によらず、試験片全数を評価の対象としている。アルカリ液浸漬前後のAL2-1, AL2-2の破壊形態を比較した結果、A, D, E, Fの製品では、破壊形態の割合に変化は見られなかった。Bは、浸漬前よりも付着(接着)破壊の割合が多くなり、Cは、付着(接着)破壊の割合に変化はなかったが、付着(凝集)破壊が確認された。一方、非拘束径を $d=25\text{mm}$ に拡大したAL2-3の場合には、全ての試験体において、写真-3(d)に示すように表層付近にコーン状の破壊が確認された。

3.2 荷重-変位関係

図-3にAL1-1, AL2-1, AL2-2の荷重-変位曲線の一例を示す。荷重-変位曲線では、最大荷重付近に達するまで直線的に推移する場合と最大荷重に達する直前に変位が大きくなる場合があった。最大荷重にばらつきはあるものの、いずれのパラメータ、製品においても荷重-変位曲線の傾向は同様であった。また、図-4に同じ製品の割裂の有無における荷重-変位曲線の一例を示す。試験片が割裂した場合の荷重-変位曲線の傾向も割裂がない場合と同様であり、最大荷重が極端に低下する傾向は見られなかった。試験片の割裂発生時点を確認するた

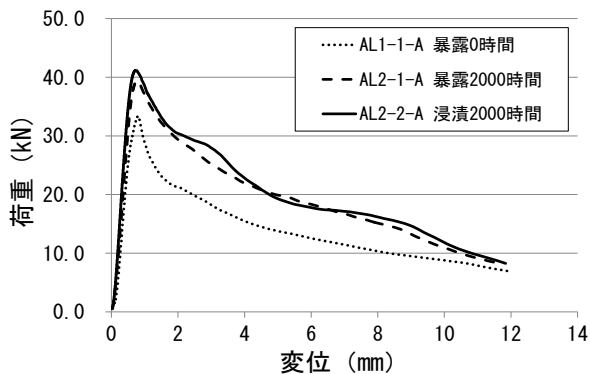
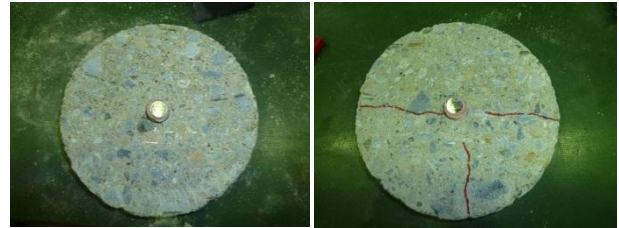


図-3 荷重-変位曲線の一例(パラメータ比較)

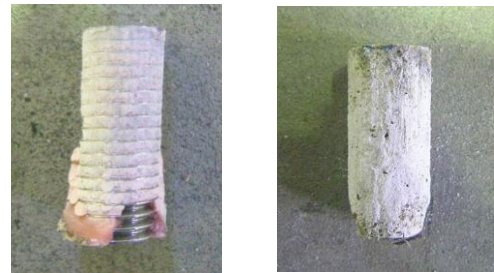
表-3 接着剤の破壊形態

		AL1-1		AL2-1			AL2-2	
		接着破壊	接着・凝集破壊	接着破壊	接着・凝集破壊	凝集破壊	接着破壊	接着・凝集破壊
割合(%)	A	0.0	100.0	25.0	75.0	0.0	25.0	75.0
	B	25.0	75.0	16.7	83.3	0.0	41.7	58.3
	C	41.7	58.3	41.7	50.0	8.3	41.7	58.3
	D	66.7	33.3	83.3	16.7	0.0	83.3	16.7
	E	25.0	75.0	50.0	50.0	0.0	50.0	50.0
	F	0.0	100.0	0.0	100.0	0.0	0.0	100.0

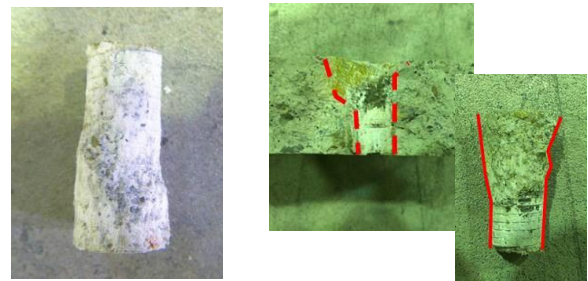


(a) 割裂破壊無し (b) 割裂破壊有り

写真-2 押し抜き後の試験体



(a) 付着(凝集)破壊 (b) 付着(接着)破壊



(c) 付着(接着・凝集)破壊 (d) コーン破壊

写真-3 破壊形態

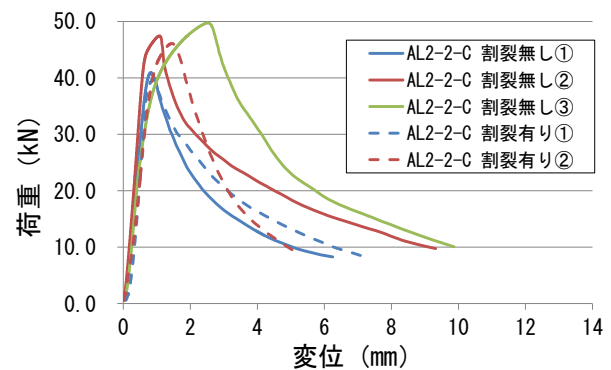


図-4 荷重-変位曲線の一例(割裂の有無)

め、一部の試験片において荷重を一旦停止しながら押抜き試験を実施した結果、最大荷重点以降に割裂が生じている試験片が確認された。

図-5にAL2-1の最大荷重の平均値とAL2-3の最大荷重の比較を示す。割裂破壊した試験片は、評価の対象外としている。非拘束径をd=25mmとしたAL2-3の最大荷重は、Eの試験片を除き、d=17mmとしたAL2-1の最大荷重の平均値と比べて低い結果となった。

3.3 最大付着応力度

AL1-1, AL2-1, AL2-2の各試験片の付着応力度の最大値, 最小値, 平均値を図-6に示す。付着応力度は、荷重値を各試験片の穿孔径の周面積で除して算出した。押抜かれた試験片の長さ及び穿孔径は、試験片ごとにノギスにより計測し、それらの値から周面積を算出した。割裂破壊が生じた試験片は、評価の対象外としている。各試験片の付着応力度の変動係数と評価対象個数(割裂が無かった試験片)の割合を表-4に示す。変動係数の平均では、Dが最も高い0.2となった。評価対象個数の割合は、AL1-1-C, AL2-2-C, AL2-2-Fで50%以下となった。

図-7にAL2-2, AL2-4の付着応力度の平均値の比較を示す。押抜き時の試験片の乾燥, 湿潤状態による付着応力度の比較では、A, Fの試験片は湿潤状態の付着応力度が乾燥状態の付着応力度よりも低く、B, C, D, Eの試験片では湿潤状態が乾燥状態よりも高い結果となった。

3.4 初期剛性

押抜き試験時のあと施工アンカー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応力-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求めた。初期剛性は、上限値を最大付着応力度の1/3とし、下限値は、各試験片ともに2.0N/mm²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-8に各試験片の初期剛性の最大値, 最小値, 平均値, 表-5に初期剛性の変動係数を示す。ここでも割裂した試験片は評価の対象外とした。初期剛性の変動係数

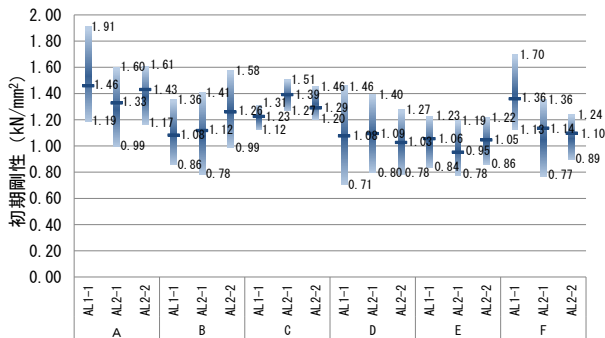


図-8 各試験片の初期剛性

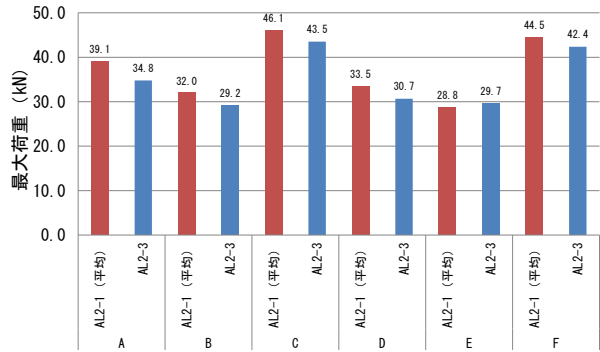


図-5 非拘束径の違いによる最大荷重の比較

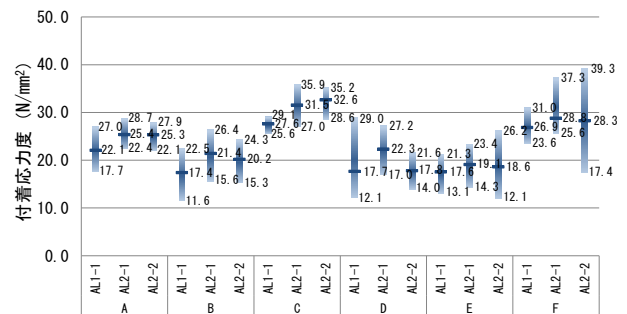


図-6 各試験片の付着応力度

表-4 付着応力度の変動係数および評価対象個数の割合

		A	B	C	D	E	F	
変動係数	AL1-1	0.12	0.17	0.05	0.29	0.15	0.10	
	AL2-1	0.06	0.15	0.09	0.17	0.16	0.12	
	AL2-2	0.07	0.16	0.09	0.16	0.20	0.25	
	平均	0.08	0.16	0.07	0.20	0.17	0.16	
評価対象個数	AL1-1	個数	9	12	4	11	10	7
	AL1-1	割合(%)	75.0	100.0	33.3	91.7	83.3	58.3
	AL2-1	個数	10	12	10	8	12	9
	AL2-1	割合(%)	83.3	100.0	83.3	66.7	100.0	75.0
	AL2-2	個数	12	11	3	10	12	5
	AL2-2	割合(%)	100.0	91.7	25.0	83.3	100.0	41.7

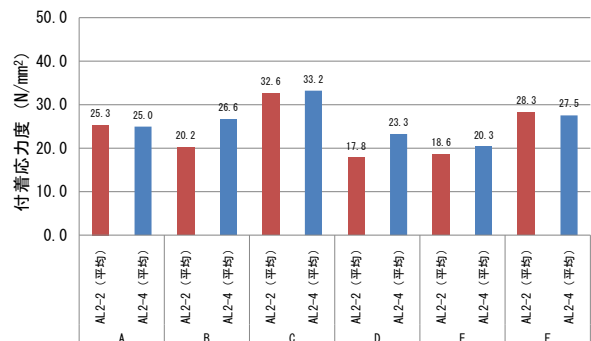


図-7 試験片の乾湿による付着応力度の比較

表-5 初期剛性の変動係数

		A	B	C	D	E	F
変動係数	AL1-1	0.14	0.14	0.05	0.25	0.11	0.12
	AL2-1	0.13	0.16	0.06	0.17	0.13	0.17
	AL2-2	0.10	0.12	0.09	0.17	0.10	0.11
	平均	0.13	0.14	0.07	0.20	0.11	0.13

の平均値では、最大付着応力度の変動係数の平均値と同様に D の製品が最も高い結果となった。

4. 考察

4.1 試験片の耐アルカリ性の評価

表-6 に、AL2-1、AL2-2 の付着応力度および初期剛性の平均と AL2-1 に対する AL2-2 の残存強度比、初期剛性比を示す。残存強度比は、D の製品を除き 0.94~1.03 であり、D は 0.8 と低くなっている。また、各試験片の初期剛性比は、0.93~1.13 であった。あと施工アンカー部の破壊形態および残存強度比、初期剛性比の結果から、A、C、E、F の製品は、アルカリ液浸漬前後で大きな変化がなかったことから、アルカリ耐久性を有していると推定される。また、B の製品は、表-3 に示すように、破壊形態に変化はあるものの、付着応力度、初期剛性は大きく変化していない。D の製品は、残存強度比は他の製品に比べて低い結果となったが、表-6 に示す付着応力度、初期剛性の変動係数の平均値がいずれの製品よりも最も高いこと、浸漬前後で破壊形態、初期剛性には大きな変化がなかったから、残存強度比の低下は、アルカリ液の影響ではなく、ばらつきの影響と推定される。

4.2 耐アルカリ性試験方法の評価

(1) 試験片の拘束の影響

押抜き時の試験片の拘束による影響を確認するため、非拘束径を $d=17\text{mm}$ と $d=25\text{mm}$ により押抜き試験を実施した結果、 $d=17\text{mm}$ の場合の破壊形態は、全て付着破壊となり、一方で $d=25\text{mm}$ におけるあと施工アンカー部の破壊形態は、全てコーン状の破壊であった。非拘束径が $d=25\text{mm}$ の場合は、あと施工アンカー部の付着破壊に加え、コーン破壊の影響を考慮する必要があるため、付着応力度として評価することは困難である。このことから、非拘束径を $d=17\text{mm}$ とすることにより、精度よく付着応力度が評価できると考えられる。

(2) 試験片の割裂破壊に与える影響

図-10 に AL1-1、AL2-1、AL2-2 における試験片の割裂破壊の割合と最大付着応力度の平均との関係を示す。また、線形近似による近似曲線を示す。平均付着応力度が高いほど試験片の割裂破壊の割合が高くなる傾向が確認された。試験片の割裂破壊が発生する要因としては、付着応力度が高い接着剤による影響があること、製作した試験片が必ずしも水平とまらない場合があり押抜き時に試験片が曲げの影響を受けたことなどが考えられる。割裂破壊の発生割合が高くなると試験結果の精度に影響を与えることから、付着応力度が高い接着剤によりスライステストを実施する場合には、今回の試験片寸法よりも面積や厚さを拡大することやコンクリート強度を高めることにより、割裂破壊の発生割合を低減することが可

表-6 残存強度比と初期剛性比

		A	B	C	D	E	F
最大付着 応力度平均 (N/mm^2)	AL2-1	25.4	21.4	31.6	22.3	19.1	28.8
	AL2-2	25.3	20.2	32.6	17.8	18.6	28.3
	静的引抜 試験	21.1	20.4	28.0	17.1		
残存強度比 (AL2-2/AL2-1)		1.00	0.94	1.03	0.80	0.97	0.98
初期剛性 平均 (kN/mm^2)	AL2-1	1.33	1.12	1.39	1.09	0.95	1.14
	AL2-2	1.43	1.26	1.29	1.03	1.05	1.10
初期剛性比 (AL2-2/AL2-1)		1.08	1.13	0.93	0.94	1.10	0.97

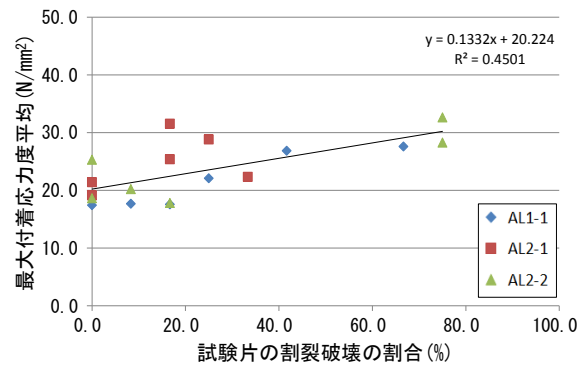


図-10 最大付着応力度平均と割裂破壊の割合

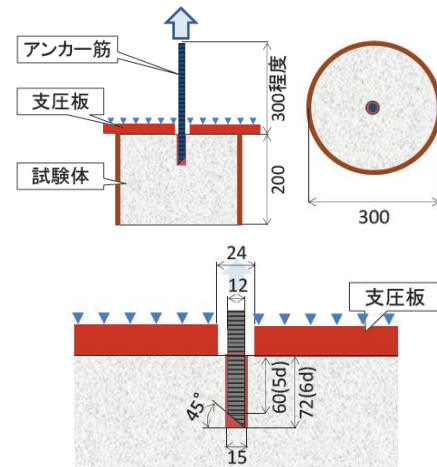


図-11 静的引抜き試験概要⁵⁾と载荷方法

能になると考えられる。

(3) 押抜きによる付着応力度の評価

あと施工アンカーは押抜きにより使用する事例は少ないことから、押抜き試験による付着応力度の評価を検討するため、ETAG に基づき実施した静的引抜き試験⁵⁾の最大付着応力度の結果と今回の試験結果を比較した(表-6)。静的引抜き試験は、図-11 に示す試験体を製作し、载荷は鋼材引張試験用万能試験機を用いて行い、試験機下側の载荷梁を固定し、上側の载荷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、 $d=24\text{mm}$ としている。また、静的引抜き試験の最大付着応力度の平均は、A~D の製品でそれぞれ

れ4体ずつの平均であり、いずれの試験体においても破壊形態は、付着破壊となった。押抜き試験と静的引抜き試験の最大付着応力度の平均を比較した結果、押抜き試験による最大付着応力度（AL2-1）は、静的引抜き試験による最大付着応力度の4～30%ほど大きく、図-12に示したように相関があることから、押抜き試験による付着応力度でも評価は可能であると考えられる。

(4) アルカリ液浸漬試験片の乾湿による影響

あと施工アンカー部の付着応力度、初期剛性を評価するためには、アルカリ液に浸漬した試験片と暴露試験片は同条件で押抜き試験を実施する必要があると思われる。そのため、押抜き試験時の浸漬試験片の乾湿による影響を確認した。図-7の結果から、試験片の乾湿は付着応力度、初期剛性の評価に影響を与えると推定されることから、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。

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, C, E, Fの製品は、アルカリ溶液浸漬前後であと施工アンカー部の破壊形態の変化および付着応力度、初期剛性の低下は見られなかった。
- (2) Bの製品は、付着応力度の低下、Dの製品は、破壊形態の変化が確認されたが、一定のアルカリ耐久性は有していると推定される。
- (3) 押抜き時の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、初期剛性の評価精度は向上すると思われる。
- (4) あと施工アンカー部の付着応力度が高くなるほど試験片の割裂破壊の割合が高くなる。
- (5) 押抜き試験時の試験片の乾湿が、付着応力度および

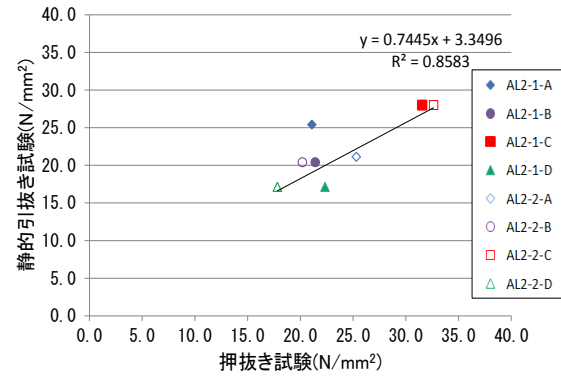


図-12 押抜き試験と静的引抜き試験の最大付着応力度平均の比較

初期剛性の評価に影響を及ぼす製品がある。

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) EOTA: GUIDELINE FOR EUROPEAN TECHNICAL APPROVAL OF METAL ANCHORS FOR USE IN CONCRETE BONDED ANCHORS, ETAG001 Part five, Apr.2013
- 3) American Concrete Institute: Qualification of Post-Installed Adhesive Anchors in Concrete and Commentary, 355.4-11, 2011
- 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, 2014.9
- 5) 井口重信, 水野光一郎, 門真太郎：接着系あと施工アンカーの静的引抜き試験, 土木学会第69回年次学術講演概要集, V-180, pp.359-360, 2014.