

報告 接着系あと施工アンカーの耐アルカリ性・長期持続荷重試験結果

井口 重信*1・倉岡 希樹*2

要旨：筆者らは、接着系あと施工アンカーの耐アルカリ性および長期持続荷重性に関する品質確認試験方法を欧米等の技術基準を参考に実験的に検討し施行してきた。品質確認試験の施行から4年が経過し、耐アルカリ性について7製品、長期持続荷重性について8製品の性能を確認してきた。耐アルカリ性試験については試験片の割裂破壊の影響、浸漬によるアルカリ以外の要因の影響、試験結果のばらつきなどが、長期持続荷重試験については載荷時の拘束径の影響、充填材の特性による拔出し量や長期持続荷重の差異による評価への影響などが課題として挙げられた。

キーワード：あと施工アンカー、接着系、長期持続荷重、耐アルカリ性

1. はじめに

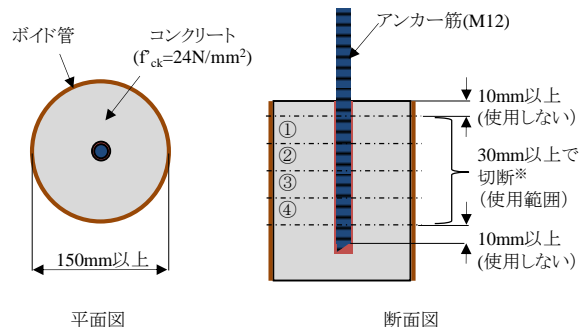
2012年12月に発生した中央自動車道笹子トンネルでの天井板崩落事象を契機に、接着系あと施工アンカーの使用が厳しく制限されている。土木学会の「コンクリートのあと施工アンカー工法の設計・施工指針(案)¹⁾」でも、有機系の充填材や長期持続荷重を受ける箇所への接着系アンカーの適用については「性能が確認されたもの」を用いることが規定されているが、その性能の確認方法は明記されていない。日本コンクリート工学会でも、耐アルカリ性に関する試験方法について提案はされているが、基準値等については示されていない、などが現状である²⁾。

鉄道構造物では、列車振動による影響から金属系の拡張アンカーではなく接着系のアンカーが用いられるケースが多い。また、施工可能時間が夜間の限られた時間の中での施工となることが多く、硬化時間の早い有機系材料のアンカーが必要になる場合もある。そのため、接着系アンカーの耐アルカリ性や長期持続荷重性について、性能の確認試験方法とその基準値の設定が求められていた。そこで、筆者らは接着系あと施工アンカーを対象に、充填材の耐アルカリ性および長期持続荷重特性に関する品質確認試験方法について欧米の基準類を参考に実験的に検討を重ねてきた^{3), 4)}。2015年より、JR東日本ではこれらの品質確認試験に関する基準を施行してきたが⁵⁾、施行から4年が経過したこれまでに、耐アルカリ性試験については7製品、長期持続荷重試験については8製品の試験結果が得られている。耐アルカリ性および長期持続荷重特性を有すると定めた判定基準をクリアする製品も増えてきたが、試験・評価方法に関する課題も見えてきた。そこで、これらの試験方法を紹介し試験結果を報告するとともに、試験方法および評価方法の課題について以下で述べる。

2. 耐アルカリ性試験

2.1 試験方法の概要

図-1に耐アルカリ性試験の試験体形状を示す。耐アルカリ性試験は、 $\phi 150\text{mm}$ 以上の円柱状の試験体を製作し、その中央にあと施工アンカーを打設した後、約30mmの厚さに切断した試験片を用いて行う。試験片はアルカリ溶液に浸漬するための10片と、同じ期間、気中で暴露しておくための10片の20片を製作する。なお、試験片は後述する載荷中の割裂ひび割れによる評価対象外となることを考慮して、必要数より多く製作しておく。製作



※切断後、ポイド管を撤去後にアルカリ溶液中に浸漬させる

図-1 試験体形状



図-2 アルカリ溶液浸漬・気中暴露状況図

*1 東日本旅客鉄道(株) 建設工事部 (正会員)

*2 東日本旅客鉄道(株) 東京工事事務所 (正会員)

した試験片は、図-2に示すような設備等で pH13.2 に調整した水酸化カリウム溶液中に 2000 時間浸漬する。アルカリ溶液に浸漬した試験片と恒温恒湿で養生した試験片の試験条件を揃えるため、浸漬後は、試験片重量が変わらなくなるまで気中で乾燥させてから荷重試験を実施する。比較用の暴露試験片はアルカリ溶液に浸漬する試験片と同一の温湿度の気中に暴露し、アルカリ溶液に浸漬した試験片と同時期に荷重試験を実施する。荷重試験は、図-3 に示すような試験装置で試験片中央部のアンカー筋部分を押し抜いて実施する。試験片上側の荷重板に取り付けた押し込み棒はアンカー筋径よりも小さい径のものとし、試験片下側の支圧板の孔径はあと施工アンカー削孔径 D より大きくかつ $D+3\text{mm}$ 以下の径とし、アンカー筋と充填材の界面、あるいは充填材とコンクリートの界面での破壊が生じるように配慮する。また、荷重中に試験片に割裂ひび割れが生じないように試験片周囲を拘束できる治具で固定した状態で荷重する。なお、拘束治具の拘束に用いるトルクレンチのトルクは一定とし拘束力は一定となるようにした。図-4 に試験片の損傷状況の例を示す。試験結果の評価に用いるのは図-4 の左側のようにアンカー筋部分のみで抜け出した試験片とし、試験片に割裂ひび割れが生じたものは評価対象とはしない。荷重試験中は、荷重荷重と変位（押し込み量）を適時計測し、最大付着応力度 τ 、および最大荷重の 1/3 での初期剛性 k を求める。付着応力度 τ は荷重値を試験片の削孔径の周面積で除して算出し、初期剛性 k は付着応力度と単位長さ当りの抜け出し量の関係から算出する。初期剛性 k の算出方法を図-5 に示す。

2.2 試験結果の評価方法

試験結果の評価は最大付着応力度 τ と、初期剛性 k の 2 項目で行う。どちらも、アルカリ溶液に浸漬した 10 枚の平均値 τ および k と、アルカリ溶液に浸漬せず気中に暴露していたものの平均値 τ' および k' の 90% で比較して判定する (式(1)、式(2))。

$$\tau \geq 0.9\tau' \quad (1)$$

$$k \geq 0.9k' \quad (2)$$

ここに、 τ 、 k : アルカリ溶液浸漬試験片 10 枚の最大付着応力度、初期剛性の平均値(N/mm^2)、 τ' 、 k' : 暴露試験片 10 枚の最大付着応力度、初期剛性の平均値(N/mm^2)、である。

判定基準を暴露試験片の試験結果の 90%としたのは、試験方法によるばらつきを考慮したものであり、便宜的に定めたものである。

2.3 試験結果

これまでに試験結果の得られている充填材 7 製品の諸元および試験結果を表-1 に示す。なお、A~I の試験結果については既報⁹⁾で報告済みのもので、C-2 が追加さ

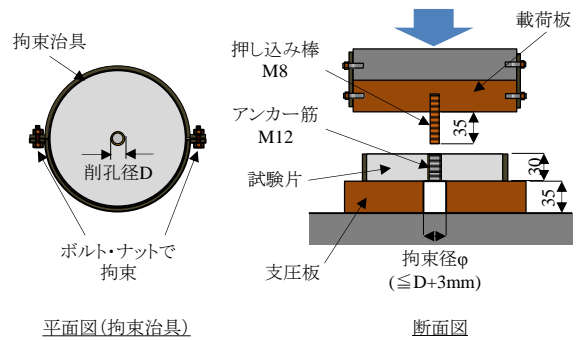


図-3 試験装置 (耐アルカリ性試験)

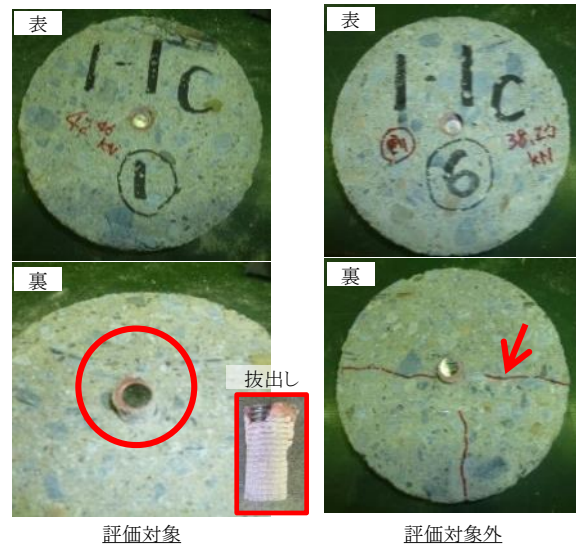


図-4 試験片の損傷状況例

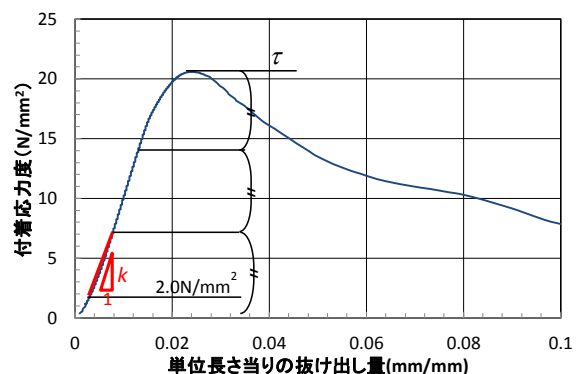


図-5 初期剛性 k の算出例

れた試験結果である。最大付着応力度では τ/τ' が 1.0 を上回るのは C のみで、D は 0.80 となり 90% の判定基準を下回る結果となった。初期剛性については 7 製品とも 90% の判定基準は上回ったが、 k/k' が 1.0 を上回るものは 3 製品であった。

2.4 耐アルカリ性試験の課題

(1) 割裂試験片の取り扱い

耐アルカリ性試験は、充填材の耐アルカリ性に着目し

表-1 材料諸元および試験結果（耐アルカリ性試験）

製品種別	あと施工アンカー諸元			試験結果							
	充填材の種類	充填材の主成分	充填方式	アルカリ浸漬		試験片数 (割裂なし/ 全数)	気中暴露		試験片数 (割裂なし/ 全数)	τ/τ'	k/k'
				最大付着 応力度 τ (N/mm ²)	初期剛性 k (N/mm ²)		最大付着 応力度 τ' (N/mm ²)	初期剛性 k' (N/mm ²)			
A	エポキシアクリレート	エポキシアクリレートプレポリマー	カプセル	25.3	1431	12/12	25.4	1328	10/12	1.00	1.08
B	ビニルエステル	変性ビニルエステル	カプセル	20.2	1260	11/12	21.4	1118	12/12	0.94	1.13
C	エポキシ	ビスフェノールA型エポキシ樹脂	注入	32.6	1290	3/12	31.6	1392	10/12	1.03	0.93
D	アクリル	変性アクリル樹脂	注入	17.8	1027	10/12	22.3	1094	8/12	0.80	0.94
H	エポキシアクリレート	エポキシアクリレートオリゴマー	カプセル	18.6	1046	12/12	19.1	954	12/12	0.97	1.10
I	エポキシ	ビスフェノールA型エポキシ樹脂	注入	28.3	1098	5/12	28.8	1136	9/12	0.98	0.97
C-2	エポキシ	ビスフェノールA型エポキシ樹脂	注入	32.8	706	10/12	33.4	755	10/10	0.98	0.93

たものであることから、割裂破壊が生じたものについては試験対象から除外していた。しかし、図-6 に示すように、最大付着応力度が大きいほど、割裂試験片が多くなる傾向があった。最大付着応力度が 30N/mm²程度となると、割裂試験片が 50%程度以上となるものもあるため、試験片を多く製作する必要があり効率が良くない。また、割裂する試験片の数を予想して試験体を製作することは難しいため、試験片数が不足する場合には、試験自体がやり直しとなる。一方で、図-3 で示すような試験片を拘束する治具を用いて載荷を行うことで、割裂した試験片を考慮した場合でも、既往の検討⁹⁾から試験結果に与える影響が少ないと思われるため、今後は、適切な方法で載荷試験を行うことを前提に、割裂ひび割れが生じた試験片についても評価対象としていきたいと考えている。

(2) 最大付着応力度の低下

最大付着応力度の結果では、7 製品中 6 製品が τ/τ' が 1.0 を下回り、アルカリ溶液に浸漬することで最大付着応力度が低下した。充填材がアルカリにより影響を受けたためとも考えられるが、その他の要因として、①浸漬試験片は水中で暴露されるのに対し、暴露試験片は気中で暴露されるため、水や乾燥の影響に差異がある。②2000 時間経過後の載荷試験時においても、浸漬試験片は引き上げ後数日で試験を実施するため水の影響が残っている、などがある。いずれも、水や乾燥によるコンクリートへの影響を排除することが、本試験の精度を向上させるためには必要だと思われる。

(3) 試験精度

各製品の最大付着応力度の標準偏差を図-7 に示す。製品 I などでは標準偏差が 5.15N/mm²となることから、本試験方法は、ばらつきが大きい試験であることが分かる。試験片の製作方法や載荷試験方法などの細部を規定する等の対策も考えられるが、抜本的な解決策については検討の余地があると考える。

3. 長期持続荷重試験

3.1 試験方法の概要

長期持続荷重試験に用いる試験体形状を図-8 に示す。

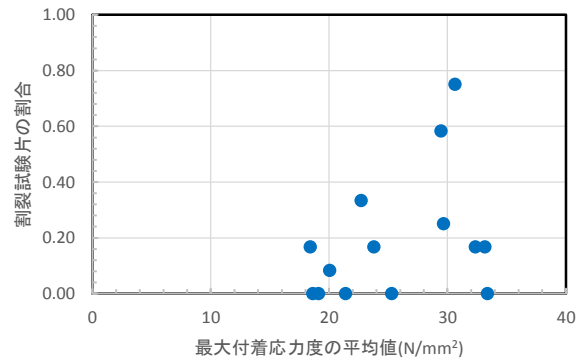


図-6 最大付着応力度と割裂試験片の割合の関係

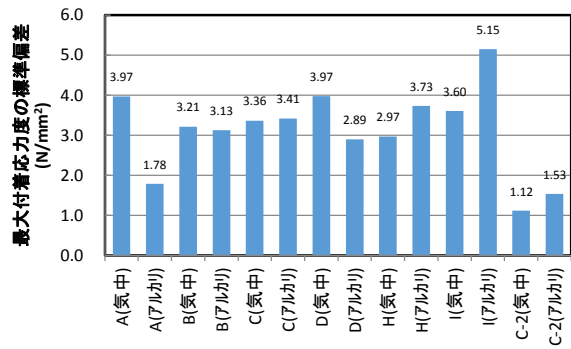


図-7 最大付着応力度の標準偏差

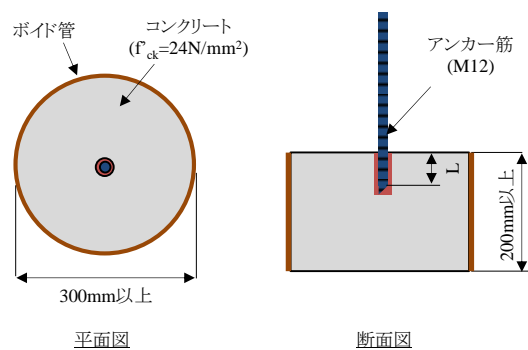


図-8 試験体の形状（長期持続荷重試験）

直径 $\phi=300\text{mm}$ 以上の紙製ボイド管にコンクリートを打設し、硬化後に試験体中央にあと施工アンカーを打設する。アンカー筋の強度および定着長は、引張試験時にア

アンカー筋が破断せず、アンカー筋定着部で破壊するように選定する。試験体は、準備試験用、長期荷重試験用、基準試験用に各3体製作する。長期荷重試験は図-9に示すような装置で、90日間一定荷重を荷重し続ける。この際、試験体下面に設置する支圧板の径は定着長Lの4倍以上とし、引張試験時の支圧板径と同一にする。なお、試験環境については、20℃60%の恒温恒湿状態で実施したものと、温湿度が制御されていない室内環境で実施した場合（最大38.7℃89.1%～最小-1.3℃16.3%）のものを事前に比較しており、温湿度変化の影響が確認できなかったため、温湿度が制御されていない室内環境で実施した。

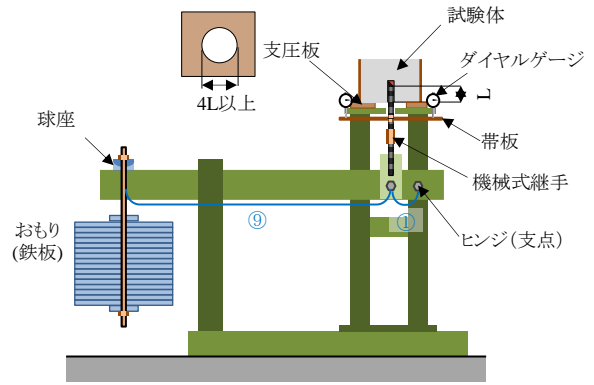


図-9 長期荷重試験装置の例

長期持続荷重試験の流れを図-10に示す。はじめに、長期持続荷重 N_{sust} を決める準備試験を実施する。準備試験で得られた最大荷重の55%を長期持続荷重 N_{sust} とし、長期荷重試験用の試験体に90日間荷重する。荷重中は抜け出し量を計測し続ける。同時に、基準試験となる試験体についても同一温湿度下で90日間暴露しておく。長期荷重試験、基準試験ともに90日間が経過した後に引張試験を実施し最大荷重および抜け出し量を計測する。長期持続荷重 N_{sust} については、EOTA³⁾等の海外の基準を参考に準備試験で得られた最大荷重の55%とした。

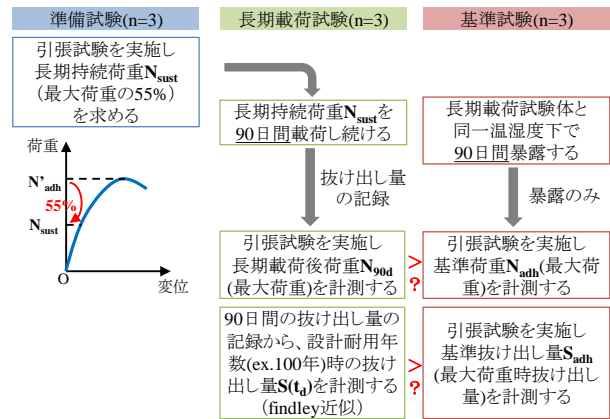


図-10 長期持続荷重試験の流れ

3.2 試験結果の評価方法

試験結果の評価は最大荷重 N と抜け出し量 S の2項目で行う。最大荷重 N は、長期荷重試験を90日間終了後の引張試験から得られた長期荷重後荷重 N_{90d} と、90日間暴露した試験体の引張試験から得られた基準荷重 N_{adh} を比較し、式(3)により可否を判定する。

$$N_{90d} \geq N_{adh} \quad (3)$$

ここに、 N_{90d} ：長期荷重後荷重、 N_{adh} ：基準荷重

抜け出し量 S は、90日間の長期荷重試験中に記録した抜け出し量の記録から、設計耐用年数 t_d 後の抜け出し量を求めて評価する。評価の方法は、まず、時刻 t における抜け出し量 S から長期荷重荷重 N_{90d} 荷重直後の抜け出し量を引いて求めた抜け出し量の増分 $\delta S(t)$ と時刻 t の関係を式(4)に示す形で回帰分析により求める。

$$\delta S(t) = a \cdot t^b \quad (4)$$

ここに、 $\delta S(t)$ ：時刻 t における抜け出し量 S から長期荷重荷重 N_{90d} 荷重直後の抜け出し量を引いて求めた抜け出し量の増分、 a 、 b ：長期荷重試験結果を回帰分析して求められる定数（図-11）

一般に、長期持続荷重を受けて破壊する際には、直前にクリープ変形が急激に増大するが、今回回帰分析は、クリープ変形が増大する前までの試験結果で行い、破壊直前の短時間の挙動については近似の対象とはしなかった。

次に、設計耐用年数 t_d 後の抜け出し量を式(5)により求め、基準試験における最大荷重時の抜け出し量 S_{adh} と比較し、

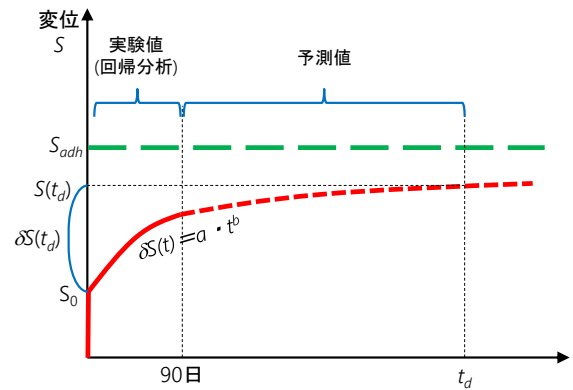


図-11 抜け出し量の予測

式(6)により可否を判定する。

$$S(t_d) = S_0 + \delta S(t_d) \quad (5)$$

$$S(t_d) \leq S_{adh} \quad (6)$$

ここに、 $S(t_d)$ ：設計耐用年数 t_d 時の抜け出し量、 S_0 ：基準試験における長期持続荷重荷重時の抜け出し量、 $\delta S(t_d)$ ：設計耐用年数 t_d 時の抜け出し量の増分の予測値、 S_{adh} ：基準試験における最大荷重時の抜け出し量

3.3 試験結果

これまでに長期持続荷重試験の結果が得られている 8

表-2 材料諸元および試験結果（長期持続荷重試験）

製品 種別	あと施工アンカー諸元		試験結果							記事
	充填材の種類	充填方式	長期載荷荷重 N _{sust} (kN)	耐力(kN)			拔出し量(mm)			
				長期 N _{90d}	基準 N _{adh}	N _{90d} / N _{adh}	長期 S(100y)	基準 S _{adh}	S(100y)/ S _{adh}	
A	有機	エポキシアクリレート	22.8	43.7	47.1	0.93	2.61	3.02	0.86	懸垂式
B		ビニルエステル	25.2	60.2	54.4	1.11	3.54	3.56	0.99	懸垂式
C		エポキシ	29.5	54.9	62.3	0.88	2.16	2.28	0.95	懸垂式
D		アクリル	22.4	45.9	43.2	1.06	2.43	2.48	0.98	懸垂式
E	無機	カプセル	16.1	35.5	27.0	1.31	1.27	1.35	0.94	懸垂式
J		注入	26.9	61.6	58.9	1.05	0.67	0.81	0.83	バネ式
K-1		カプセル	17.7	65.3	33.2	1.97	0.29	1.06	0.27	懸垂式
K-2		カプセル	23.0	66.6	42.3	1.57	0.23	0.88	0.26	懸垂式

製品の材料諸元および試験結果を表-2に示す⁷⁾。なお、製品Jのみが長期載荷試験をバネ式の試験装置にて行っており、そのほかは図-9に示すような懸垂式の試験装置で荷重を実施した結果である。耐力の評価では、90日載荷後の長期載荷後荷重 N_{90d}が、90日間気中で保管しておいた試験体の最大荷重（基準荷重）N_{adh}を上回ったものが6製品となった。拔出し量の評価では、8製品とも100年後の拔出し量の推定値 S(100y)が、基準試験における最大荷重時の拔出し量 S_{adh}を下回った。

3.4 長期持続荷重試験の課題

(1) 拘束径の影響

図-12に長期持続荷重載荷後と、荷重によりひび割れが生じ人力で取り除けるようになった部分を除去した後の状況を示す。同じ条件で実施した場合でも、コーン破壊部分の大きさが異なり、試験結果のばらつきが大きい結果となった。これまで、長期に持続荷重がかかるようなあと施工アンカーへの実際の加力状況は、アンカー筋周囲を拘束したような状況ではないことがほとんどであると想定されたため、長期持続載荷ならびに最大荷重を求める場合の載荷試験時においても、拘束径を定着長 Lの4倍とした方法としてきた（図-13(左)）。しかし、長期持続荷重載荷後の残存耐力確認後の破壊形態が異なり、そのため後述する拔出し量の評価時の精度に影響を与えることなどを勘案すると、あと施工アンカー部付近を拘束した載荷方法とすることで、充填材付近で破壊形態が決まる方法に変更することも検討していきたい（図-13(右)）。

(2) 拔出し量の大小による精度に与える影響

図-14に有機系材料の製品Bおよび無機系材料の製品Eの長期載荷試験中の拔出し量の増分 $\delta S(t)$ の推移を示す。90日時点において、製品Bは0.24mmに対し、製品Eは0.08mmと値が小さい。そのため、回帰式による近似の精度も製品Bに比べて製品Eのほうが劣る結果となった。表-2より、製品A~Dの有機系の材料については拔出し量の基準値 S_{adh}が2.28~3.56mmであるのに対

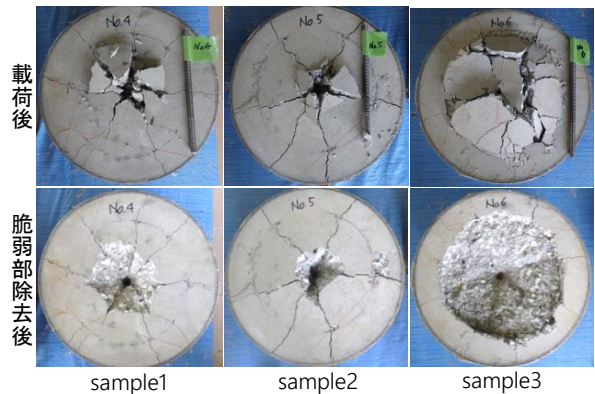


図-12 耐力確認後の破壊形態（製品J）

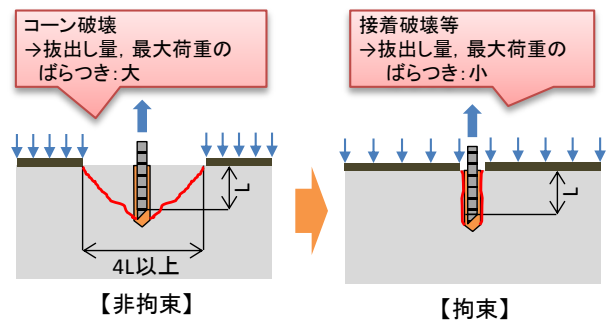


図-13 載荷方法の変更（案）

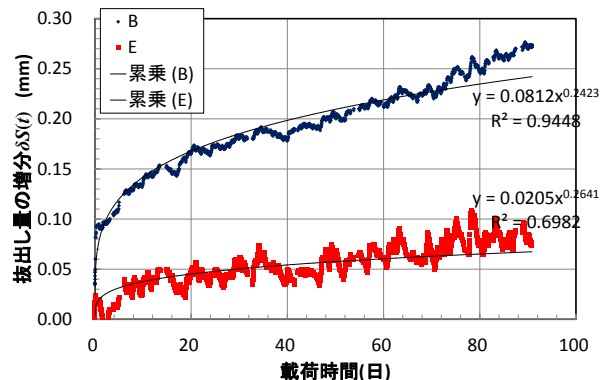


図-14 長期載荷試験中の拔出し量の増分 $\delta S(t)$

し、無機系の材料については 0.81~1.35mm と小さい。このことから、拔出し量の絶対値が小さい無機系材料のほうが試験の精度の影響を受けやすいことが分かる。(1)の拘束径の変更に伴う精度の向上も見込まれるため、今後も引き続き検討したいと考えている。

(3) 長期持続荷重の大小による影響

図-14 に長期持続荷重 N_{sust} と、90 日間の長期載荷後荷重 N_{90d} と基準荷重 N_{adh} との比 N_{90d}/N_{adh} との関係を示す。図-14 より、長期持続荷重 N_{sust} が大きいほど N_{90d}/N_{adh} の値が小さくなる傾向にあることが分かる。現在、日本においては、接着系あと施工アンカーの付着強度に関する設計式は充填材種別によらず一定値を使う場合が多く、充填材ごとに付着強度を評価した設計を行うことは少ないと思われる。そのため、多くの充填材の試験結果を安全側で評価した付着強度の設計式⁸⁾が用いられることが多い。これにより、付着強度の大きい充填材を用いる場合でも本来の性能よりも小さい範囲でしか使えないルールとなっている。今後は、前述のような結果を考慮し、充填材の性能に応じた付着強度の設計なども考えられると思われる。

4. まとめ

これまで実施してきた接着系あと施工アンカーの耐アルカリ性および長期持続荷重試験の試験を通じ、以下のような知見と課題が得られた。

- (1)耐アルカリ性試験において発生する割裂試験片の取り扱いについては、試験時に適切な治具を用いて拘束することで、評価対象としても影響が少ないと思われる。また、評価可能試験片数が増えることにより評価精度が向上するものと思われる。
- (2)アルカリ溶液に浸漬することで、アルカリ以外の浸漬した影響も発生すると思われるので、評価時には十分乾燥して載荷試験を実施する等の配慮が必要である。
- (3)本方法によると、最大で標準偏差が $5N/mm^2$ 以上となり、評価の精度を向上させるには、詳細な試験法の規格化なども考えられるが、抜本的な解決策についても検討していく必要があると思われる。

(4)長期持続荷重試験については、充填材の影響のみを評価するのであれば、拘束径を小さくした載荷状態の試験が良いと思われる。

(5)無機系材料などの拔出し量が少ない充填材の場合には、計測精度に十分配慮する必要がある。

(6)長期持続荷重が大きい充填材については、評価が厳しくなる傾向が見られた。設計の最大付着強度を充填材ごとに設定できるような方法にするなど、設計面での工夫も考えられる。

謝辞

本試験ならびに試験結果の取りまとめに際しては、あと施工アンカーメーカー各位には多大なるご協力を頂いた。記して謝辞としたい。

参考文献

- 1) 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), 材料, 土木学会, コンクリートライブラリー141号, 20014.3
- 2) あと施工アンカーの耐アルカリ性試験方法に関する研究委員会報告書, 日本コンクリート工学会, 2016
- 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) 東日本旅客鉄道(株): 土木工事標準仕様書, 2018.6
- 6) 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, 2015
- 7) 高山充直, 大野貴信, 井口重信, 松田芳範: 接着系アンカーのクリープ特性に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, 2016
- 8) 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