

ISSN 0386-5878
土木研究所資料 第4436号

土木研究所資料

あと施工アンカーの耐荷力特性 に関する研究報告書 —金属系あと施工アンカーの 設計・施工・維持管理上の留意点—

令和5年3月

国立研究開発法人土木研究所

道路技術研究グループ トンネルチーム
先端材料資源研究センター 材料資源研究グループ

Copyright © (2023) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は、国立研究開発法人土木研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、国立研究開発法人土木研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

あと施工アンカーの耐荷力特性 に関する研究報告書 —金属系あと施工アンカーの 設計・施工・維持管理上の留意点—

道路技術研究グループ	トンネルチーム	上席研究員	日下 敦
道路技術研究グループ	トンネルチーム	主任研究員	小泉 悠
道路技術研究グループ	トンネルチーム	元 上席研究員	砂金 伸治
道路技術研究グループ	トンネルチーム	元 主任研究員	巽 義知
道路技術研究グループ	トンネルチーム	元 主任研究員	小出 孝明
先端材料資源研究センター	材料資源研究グループ	グループ長	西崎 到
先端材料資源研究センター	材料資源研究グループ	上席研究員	古賀 裕久
先端材料資源研究センター	材料資源研究グループ	上席研究員	富山 禎仁
先端材料資源研究センター	材料資源研究グループ	上席研究員	新田 弘之
先端材料資源研究センター	材料資源研究グループ	主任研究員	加藤 祐哉
先端材料資源研究センター	材料資源研究グループ	元 主任研究員	中村 英佑

要 旨：

道路トンネル内にはジェットファン等の附属物が多数設置されており、これらの多くはあと施工アンカー等の取付部材により覆工コンクリートに取り付けられている。あと施工アンカーに作用する荷重やその耐荷力特性について、現地計測や室内実験により調査研究し、本報告書を作成した。金属系あと施工アンカーを中心に基本的な耐荷力特性や、設計・施工・維持管理上の知見・留意点をとりまとめた。

キーワード：あと施工アンカー、耐荷力特性、道路トンネル、附属物、覆工コンクリート

目 次

1.	はじめに	1-1
2.	あと施工アンカーに関する既往の知見と課題	2-1
2.1	あと施工アンカーの種類	2-1
2.2	あと施工アンカーの破壊モード	2-2
2.3	設計一般	2-3
2.3.1	軸引張力を受ける場合の設計耐力	2-4
2.3.2	せん断力を受ける場合の設計耐力	2-13
2.3.3	軸引張力とせん断力を受ける場合の設計耐力	2-17
2.3.4	あと施工アンカーの構造細目	2-18
2.4	施工管理一般	2-21
2.4.1	一般的なあと施工アンカーの施工手順	2-21
2.4.2	一般的な施工管理項目	2-23
2.4.3	母材コンクリート	2-25
3.	道路トンネル用ジェットファンの取付構造及び現地計測等による作用荷重の実態	3-1
3.1	取付構造の概要	3-1
3.2	取付部材の強度計算の概要	3-2
3.3	ジェットファンの取付部材で発生する軸力の現地計測	3-3
3.3.1	現地計測の概要	3-3
3.3.2	ターンバックルに作用する荷重の計算	3-4
3.3.3	現地計測結果	3-5
3.4	斜め方向に引張られる吊り金具を支持するアンカーの軸力分担	3-13
3.4.1	斜め引張載荷試験の概要	3-13
3.4.2	実験結果	3-15
3.5	吊り用ターンバックル破断時の軸力変動及びバックアップ材の設置効果 に関する模型実験	3-16
3.5.1	模型実験の概要	3-16
3.5.2	実験方法及び実験ケース	3-16
3.5.3	実験結果	3-19
3.6	道路トンネル用ジェットファンの取付構造及び現地計測等による作用荷重 の実態に関するまとめ	3-22

4.	アンカーの基本的な耐荷力特性の確認	4-1
4.1	金属系あと施工アンカー	4-1
4.1.1	耐荷力特性の一般的な評価方法	4-1
4.1.2	載荷装置の適切な支点間隔	4-1
4.1.3	固着方法の異なる金属系アンカーの耐荷挙動	4-3
4.2	群効果	4-9
4.2.1	群配置されたアンカーのアンカーピッチの影響	4-9
4.3	へりあきの影響	4-13
4.3.1	へりあきが基準最小の場合の最大引張荷重と耐荷特性	4-13
4.4	持続載荷の影響	4-18
4.5	初期軸力の影響	4-20
4.5.1	ナット締付けによる軸力が耐荷挙動に及ぼす影響	4-20
4.5.2	初期軸力の実態に関する検討	4-23
4.6	あと施工アンカーの耐荷力特性のまとめ	4-31
5.	施工の不具合があと施工アンカーの耐荷力特性に及ぼす影響	5-1
5.1	あと施工アンカーの施工の影響	5-1
5.1.1	穿孔径の影響	5-1
5.1.2	穿孔深さの影響	5-6
5.1.3	アンカーの埋込み不足の影響	5-8
5.1.4	孔内の清掃不足の影響	5-10
5.1.5	孔内の湿潤の影響	5-11
5.2	母材コンクリートの影響	5-13
5.2.1	母材コンクリート強度の影響	5-13
5.2.2	コンクリート骨材の偏りの影響	5-14
5.3	施工の不具合があと施工アンカーの耐荷力特性に及ぼす影響に関する まとめ	5-16
6.	供用開始後の不具合があと施工アンカーの耐荷力特性に及ぼす影響	6-1
6.1	母材コンクリートの不具合がアンカーの耐荷力特性に及ぼす影響	6-1
6.1.1	ジェットファン等附属物の取付け部近傍での覆工コンクリートのひび割れの実態	6-1
6.1.2	母材コンクリートのひび割れがアンカーの耐荷力特性に及ぼす 影響	6-2

6.2	トンネルの補修・補強工がアンカーの耐荷力特性に及ぼす影響	6-5
6.2.1	ひび割れ注入工の影響	6-5
6.2.2	繊維シート接着工の影響	6-7
6.3	あと施工アンカーの供用開始後の不具合に関するまとめ	6-11
7.	あと施工アンカーの設計・施工・維持管理における留意点	7-1
7.1	設計上の留意点	7-1
7.2	施工上の留意点	7-5
7.3	維持管理上の留意点	7-7
7.4	おわりに	7-8
参考資料		
1.	接着系あと施工アンカーの特性と寿命評価	参-1
1.1	接着系あと施工アンカーの引張に対する力学特性	参-1
1.2	接着系あと施工アンカーの各種環境下での特性と寿命評価	参-2
1.2.1	アルカリ	参-2
1.2.2	持続荷重	参-23
1.2.3	熱	参-32

1. はじめに

我が国の社会資本ストックは、高度経済成長期に集中的に整備され、今後急速な老朽化の進行が懸念される。道路トンネルを例に挙げると、全国に約 1.1 万本存在するうち、建設後 50 年を経過した道路トンネルの割合は、令和 3（2021）年 3 月時点で約 23%であるものの、10 年後には 37%へと増加することが想定されている^{1.1)}。このような懸念から、例えば、国道（国管理）の維持管理等に関する検討会^{1.2)}が平成 24（2012）年 8 月より開催され、国道（国管理）の維持管理のあり方について議論が進められてきた。しかし、その矢先、同年 12 月 2 日に中央自動車道笹子トンネルにて、トンネル天井板の落下事故が発生した。同事故では、トンネル換気のために設置されていた天井板及び隔壁板等が約 140m にわたり落下し、死者 9 人、負傷者 2 人の人的被害が発生した^{1.3)}。その後、「トンネル天井板の落下事故に関する調査・検討委員会」が設置され、原因の把握と再発防止策の検討が行われ、道路構造物の設計、施工、維持管理等のあり方について提言がなされている^{1.3)}。このような事故等も契機となって、平成 25（2013）年、道路の維持・修繕に関わる道路法第 42 条が改正され、トンネル等は 5 年に 1 回の頻度を基本として点検を行うこと、健全性の診断結果を分類すること、点検及び診断と措置の結果を記録することが定められた。また、トンネルの定期点検を行うための具体的な方法等を示した要領として、平成 26（2014）年に道路トンネル定期点検要領^{1.4)}が策定され、トンネル内附属物等の状態の把握に関しては、取付状態や取付部材の異常を確認するために、近接目視やハンマー等による打音探査、触診を行うことを基本とすることが示された。また、点検上の主な着目点と留意事項のほか、異常と判定される状況や写真が例示された。なお、同要領は平成 31（2019）年に改定されている^{1.5)}。

以上のような経緯を踏まえ、国立研究開発法人土木研究所では、平成 28 年度から令和 3 年度の第 4 期中長期目標期間において、主に道路トンネル内の附属物と覆工の接合部を研究対象として、合理的な設計、施工、維持管理に貢献すべく、道路トンネルでの現地計測やあと施工アンカーの室内実験等に取り組んだ。なお、笹子トンネルの天井板の吊下げに用いられたのは接着系アンカーであり、事故後、その長期耐久性能について一定の知見の蓄積がなされるまで、トンネル天井板、ジェットファン、道路標識等の吊下げに、原則として接着系アンカーを使用しないとの留意事項が通達された^{1.6)}。よって、現在、トンネル内附属物のうち、特に重量構造物の取付けに使用されているのは主に金属系アンカーである。

本報告では、金属系アンカーを用いた実験等により得られた知見、留意点を本文内で取りまとめ、参考資料において接着系アンカーを用いた実験等の結果を示した。なお、実験では、実験設備の仕様の都合上、ジェットファンの取付けに用いられる実際のアンカーよりも、一回りサイズの小さなアンカーを使用した。本報告で示される知見については、そのような点にも留意し、既存の技術基準や指針等とあわせて活用されたい。

今後、あと施工アンカー等の取付部材の設計、施工、維持管理において、本資料が有効に活用され、道路利用者の安全・安心の向上に貢献することを期待する。

参考文献

- 1.1) 国土交通省 道路局：道路メンテナンス年報、pp.72-73、2021
- 1.2) 国土交通省：国道（国管理）の維持管理等に関する検討会、第1回（2012年8月1日）配布資料 3、2012、https://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-council/road_maintenance/index.html（2022年3月アクセス）
- 1.3) 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（平成25年6月18日）、49p.、2013
- 1.4) 国土交通省 道路局：道路トンネル定期点検要領、50p.、2014.6
- 1.5) 国土交通省 道路局：道路トンネル定期点検要領、57p.、2019.2
- 1.6) 国土交通省：接着系ボルトの使用にあたっての留意事項について（2013（平成25）年5月29日通達）、2p.、2013

2. あと施工アンカーに関する既往の知見と課題

2.1 あと施工アンカーの種類

ここでは、附属物をトンネルの覆工コンクリートなどに設置することを目的としたあと施工アンカーを取り上げる。

この目的で使用されるアンカーには、表 2-1 に示すように^{2.1) 2.2)}、コンクリート打設前にあらかじめ設置する「先付けアンカー工法」に用いるアンカー（先付けアンカー）と、コンクリート打設・硬化後にアンカーを固着する「後付け（後打ち）アンカー工法」に用いるアンカーの 2 つに大別される。

また、後付けアンカー工法は、コンクリート打設時にあらかじめアンカー設置位置に箱を設置しておき、硬化後に箱を抜いたスペースにアンカーを挿入してモルタルなどで充填して固着する「箱抜きアンカー工法」と、コンクリート硬化後に穿孔し、その孔内にアンカーを挿入して接着剤を用いたり先端部を拡張させたりして固着する「あと施工アンカー工法」に大別される。

あと施工アンカー工法に用いるアンカー（あと施工アンカー）は、アンカー固着に接着剤を用いる「接着系アンカー」と、アンカーの先端部を拡張させるなどして固着する「金属系アンカー」などに分類される。

金属系アンカーは、アンカー本体先端部を拡張させて摩擦力やコンクリートからの支圧力で固着する「金属拡張式（金属拡張アンカー）」（例：図 2-1 (a)）と、孔の先端部を拡張（アンダーカット）してアンカー本体先端部を大きく拡張させ、支圧力で固着する「金属拡底式（金属拡底アンカー）」（例：図 2-1 (b)）に分類される。「金属拡張式」には、先端部の直径が拡大しているアンカー本体に筒状のスリーブを打ち込むことで、スリーブを押し広げて拡張部を形成するスリーブ打込み式、アンカー本体中心に設置されている芯棒を打ち込むことで先端部を拡張させる芯棒打込み式など、種々の種類がある。

表 2-1 アンカーの種類

アンカー工法の種類		主なアンカーの例	固着方法の分類
先付けアンカー工法		頭付きアンカー、 など	コンクリート打設前に設置
後付け（後打ち） アンカー工法	箱抜きアンカー工法	頭付きアンカー、 など	コンクリート打設前に箱を設置、 硬化後に箱を抜いてできた空間に アンカーをモルタル等で固着
	あと施工アンカー工法	接着系アンカー （有機系接着剤、 無機系接着剤）	カプセル式（図 2-14 参照）
			注入式（図 2-15 参照）
			その他
		金属系アンカー	金属拡張式（図 2-16 参照） 金属拡底式（図 2-17 参照）
		その他	

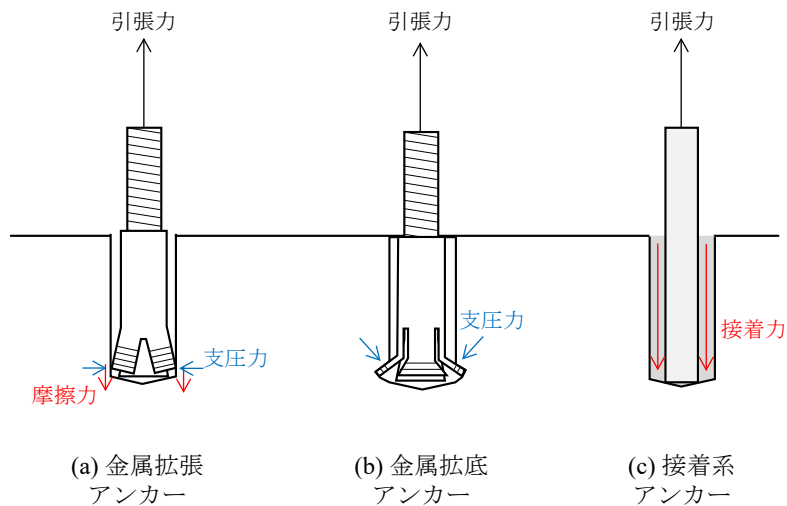


図 2-1 あと施工アンカーの固着メカニズムの例

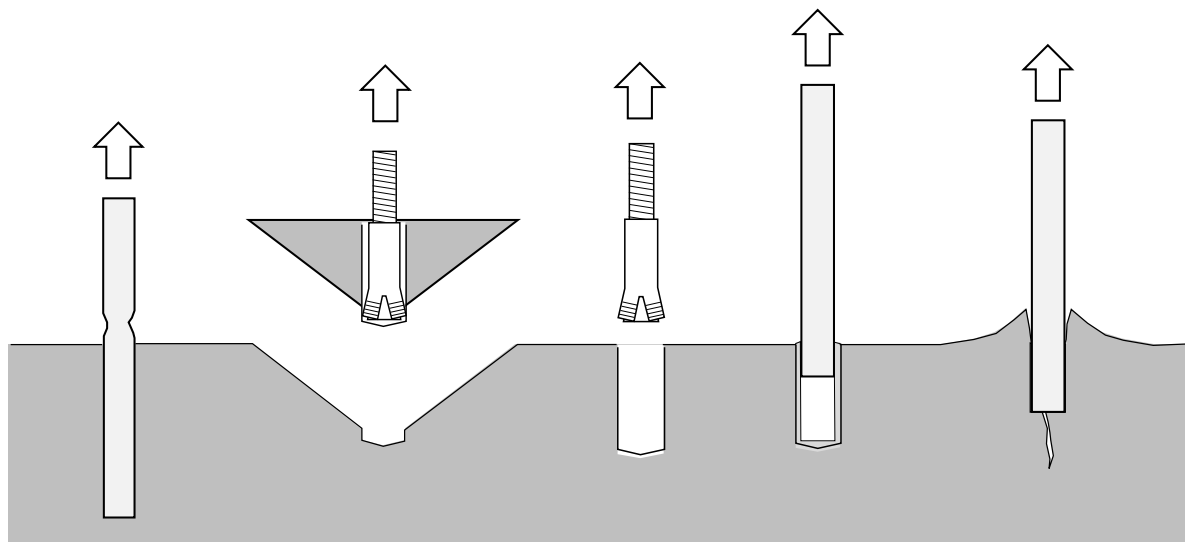
道路トンネル用ジェットファンの取付けには、金属拡張アンカー（主にスリーブ打込み式）が使用されている。そこで本研究では、スリーブ打込み式の金属拡張アンカーを主な対象として検討を行った（比較のため、その他の形式のアンカーも試験に使用している）。

一般的に、金属系アンカーにおいて、アンカー本体やスリーブなどのめねじアンカーに差し込む全ねじボルトや異形棒鋼を「接合筋」と呼び、接着系アンカーに用いる全ねじボルトや異形棒鋼を「アンカー筋」と呼んでいる。本書においても、これらの用語を用いている。

2.2 あと施工アンカーの破壊モード

アンカーに軸引張力を載荷した場合の破壊モードには、図 2-2 に示すような種類がある。(1)はアンカー自体が降伏する「鋼材降伏」、(2)はコンクリート母材がコーン状に破壊する「コーン状破壊」、(3)は引張荷重が金属系アンカー拡張部の摩擦力を上回って滑り抜ける「引抜き破壊」、(4)は接着系アンカーの「付着破壊」、(5)は母材コンクリートの「割裂破壊」で、母材コンクリート厚が小さい場合やへりあき・はしあきが小さい場合に生じやすいとされている^{2,3)}。ここでへりあきとは、アンカーに作用する力のせん断方向と直角方向の母材コンクリート端部までの最小距離のことといい、はしあきとはせん断方向の母材コンクリート端部までの最小距離のことをいう。

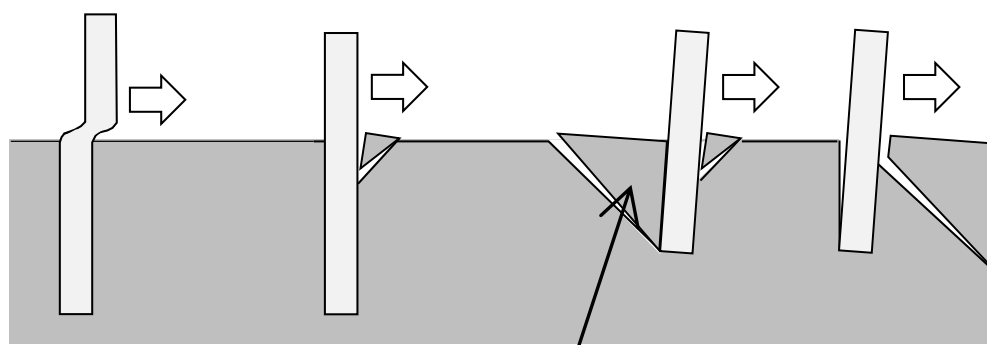
埋込み長さが十分長い場合は(1)の鋼材降伏による破断となる場合も考えられるが、ジェットファンの取付けに用いられる金属系アンカー（主にスリーブ打込み式）の場合は、(2)のコーン状破壊となる場合が多い。



(1) 鋼材降伏 (2) コーン状破壊 (3) 引抜き破壊 (4) 付着破壊 (5) 割裂破壊

図 2-2 アンカーの引張力に対する破壊モード

アンカーにせん断力を载荷した場合の破壊モードには、図 2-3 に示すような種類がある。(1)は「鋼材降伏」、(2)はアンカーに支圧されることで母材コンクリート表面付近が破壊する「支圧破壊」、(3)はコンクリートを押し上げるように破壊する「プリアウト」、(4)は端部方向の「コーン状破壊」である。(2)は埋込み長さが短い場合、(3)は母材コンクリート厚や幅が小さい場合や、はしあきが比較的小さい場合に生じやすいとされている^{2,3)}。



(1) 鋼材降伏 (2) 支圧破壊 (3) プリアウト (4) コーン状破壊

図 2-3 アンカーのせん断力に対する破壊モード

2.3 設計一般

あと施工アンカーに荷重が作用した際の設計耐力等を示している基準類には、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・維持管理指針（案）」や日本建築学会の「各種合成構造設計指針・同解説」などがある。

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・維持管理指針（案）」には【本編】

と【標準】がある。附属物を長期間（数ヶ月間を超える期間）にわたって吊り下げる箇所へあと施工アンカー工法を使用する場合は、【標準】の対象に含まれておらず、【本編】に従って検討することが必要になる^{2.4)}。ただし、【本編】^{2.5)}では、耐力等を評価するため具体的な方法についての記述は限定的である。

このような状況から、吊り下げる附属物の取付けに用いるあと施工アンカーについて設計する場合も、一般的な設計手法の例として、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・維持管理指針（案）」の【標準】や日本建築学会の「各種合成構造設計指針・同解説」の記述が参考にされていることも多いと想定され、これらに示されている手法を紹介する。

2.3.1 軸引張力を受ける場合の設計耐力

アンカーが軸引張力を受ける場合は、金属拡張アンカーの場合、アンカーの鋼材降伏、コーン状破壊、引抜き破壊、割裂破壊で破壊することが想定される。接着系アンカーの場合は、付着破壊も想定される。

アンカーの設計に用いる軸引張力に対する耐力等については、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・維持管理指針（案）」では「軸引張力に対するあと施工アンカーの設計耐力」、日本建築学会の「各種合成構造設計指針・同解説」では「許容引張力」と呼んでいる。

軸引張力に対するあと施工アンカーの設計耐力は、1) 設計降伏耐力（金属系アンカー、接着系アンカー共通）、2) 設計コンクリートコーン状破壊耐力（金属系アンカー、接着系アンカー共通）、3) 設計付着耐力（接着系アンカー）の中で最も小さい値とすることとしている^{2.6)}。金属拡張アンカーを適用する場合は、1) と2) の中で小さい値とする。

許容引張力は、1) 鋼材降伏により決まる許容引張力（金属拡張アンカー、接着系アンカー共通）、2) コーン状破壊により決まる許容引張力（金属拡張アンカー）、3) 付着力により決まる許容引張力（接着系アンカー）の中で最も小さい値とすることとしている^{2.7), 2.8)}。金属拡張アンカーを適用する場合は、1) と2) の中で小さい値とする。

（1）軸引張力に対するあと施工アンカーの設計耐力

1) 設計降伏耐力

設計降伏耐力は式(2.1)で計算される^{2.6)}。

$$T_{yd} = \frac{K_t T_y}{\gamma_b} \quad (2.1)$$

ここに、

T_{yd} : 設計降伏耐力

T_y : 降伏耐力

(金属系アンカーでは、アンカー本体と接合筋のうち小さい方を採用)

(アンカー本体の降伏耐力：素材の設計引張降伏強度×本体の最小断面積)

(接合筋の降伏耐力：素材の設計引張降伏強度×接合筋の最小断面積)

(接着系アンカーでは、アンカー筋の素材の設計引張降伏強度×最小断面積)

K_t : 使用期間の長さの影響を表す係数 (短期使用 : 1.0、長期使用 : 0.5)

γ_b : 部材係数 (一般に、1.1 としてよい)

2) 設計コンクリートコーン状破壊耐力

設計コンクリートコーン状破壊耐力は式(2.2)で計算される^{2.6)}。


$$T_{cd} = \frac{K_t \alpha A_c \sqrt{f'_{cd}}}{\gamma_b} \quad (2.2)$$

ここに、

T_{cd} : 設計コーン状破壊耐力

K_t : 使用期間の長さの影響を表す係数 (短期使用 : 1.0、長期使用 : 0.5)


α : あと施工アンカーの種類を表す係数 (金属拡張 : 0.31、接着系 : 0.23)

A_c : 母材コンクリートのコーン状破壊面の有効水平投影面積 (= $\pi l_e (l_e + D_a)$)、 2-4 参照)

l_e : 有効埋込み長さ

金属拡張アンカーの場合 : (= $l - D_a$)

接着系アンカーの場合 : 母材表面からアンカー筋先端までの長さ (= l)

ただし、先端部にカットのあるアンカー筋は、その部分を
除いた距離 ( 2-5 参照)

l : アンカーの埋込み長さ

D_a : 金属拡張アンカーの場合 : アンカー本体の直径

金属拡張アンカーの場合 : アンカー拡張後の直径

接着系アンカーの場合 : アンカー筋の直径 (呼び径)

f'_{cd} : 母材コンクリートの設計圧縮強度 (= f'_{ck}/γ_c)

f'_{ck} : 母材コンクリートの設計基準強度

γ_c : コンクリートの材料係数 (一般に、1.3 としてよい)

γ_b : 部材係数 (一般に、1.6 としてよい)

コーン状破壊の場合の有効水平投影面積 A_c の求め方は、図2-4に示すとおりである。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・維持管理指針（案）」では、有効埋込み長さ l_e の部分から、母材コンクリートが角度45°のコーン状に破壊することを想定している。

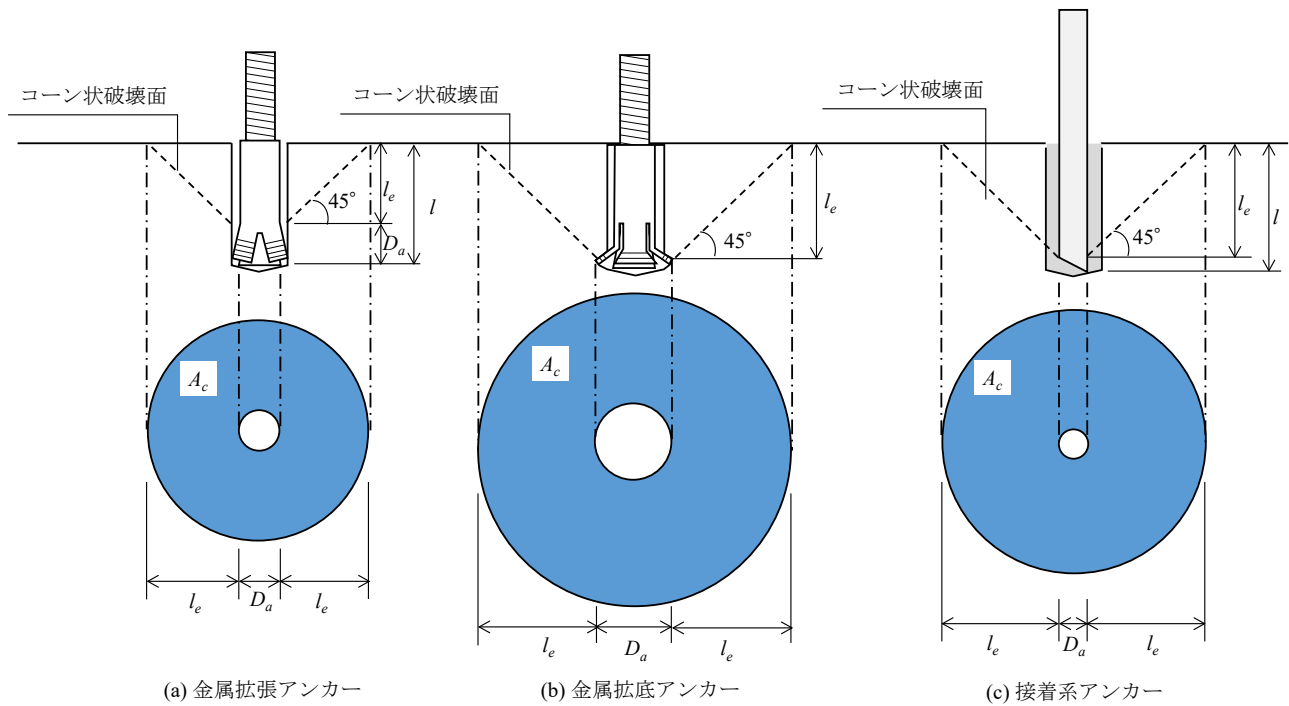


図2-4 有効水平投影面積 A_c の求め方

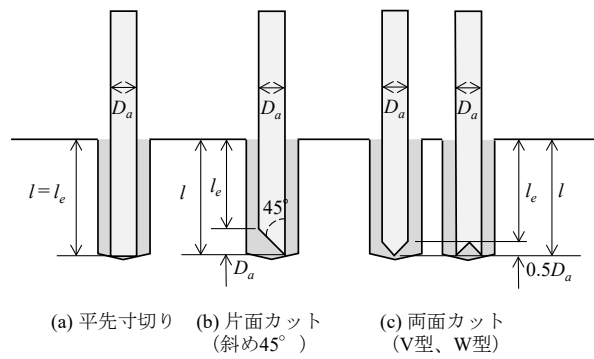


図2-5 接着系アンカーの有効埋込み長さ l_e の求め方

3) 設計付着耐力

接着系アンカーの設計付着耐力は式(2.3)で計算される^{2.6)}。

$$T_{bd} = \frac{K_t \pi D_a l_e \tau_{ad}}{\gamma_b} \quad (2.3)$$

ここに、

T_{bd} : 設計付着耐力

K_t : 使用期間の長さの影響を表す係数 (短期使用 : 1.0、長期使用 : 0.5)

D_a : アンカー筋の呼び径

l_e : アンカー筋の有効埋込み長さ

(母材表面からアンカー筋先端までの長さ、ただし、先端部に角度のあるアンカー筋は、その部分を除いた距離)

τ_{ad} : 接着系アンカーの設計付着強度

$$\text{参考値 : } \left(= 10 \sqrt{\frac{f'_{cd}}{21}} \right)$$

f'_{cd} : 母材コンクリートの設計圧縮強度 ($= f'_{ck}/\gamma_c$)

f'_{ck} : 母材コンクリートの設計基準強度

γ_c : コンクリートの材料係数 (一般に、1.3 としてよい)

γ_b : 部材係数 (一般に、1.6 としてよい)

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・維持管理指針 (案)」では、直径が D_a 、深さが有効埋込み長さ l_e の円筒表面積に作用する付着力を想定している。

(2) 軸引張力に対するあと施工アンカーの許容引張力

1) 鋼材降伏により決まる許容引張力

鋼材降伏により決まる許容引張力は式(2.4)で計算される^{2.7), 2.8)}。

$$p_{a1} = \phi_1 \cdot s \cdot \sigma_{pa} \cdot s_c \cdot a \quad (2.4)$$

ここに、

p_{a1} : 鋼材降伏により決まる許容引張力

ϕ_1 : 低減係数 (短期荷重用 : 1.0、長期荷重用 : 2/3)

$s \cdot \sigma_{pa}$: 金属拡張アンカーの場合 : アンカーボルトの降伏点強度 (材質が明確でない場合は SS400 の規格降伏点強度を用いる。)

接着系アンカーの場合 : アンカー筋の規格降伏点強度、ただし、アンカー筋の降伏を保証する場合の上限引張力を算定する場合は、1.25 倍以上とする。

$sc a$: 金属系拡張アンカーの場合：アンカー本体各部の最小断面積、または接合筋の断面積で危険断面における値（ねじ切り部が危険断面の場合はねじ部有効断面積）

接着系アンカーの場合：アンカー筋の断面積で、軸部断面積とねじ部有効断面積のうち小さい方

2) コーン状破壊により決まる許容引張力

コーン状破壊により決まる許容引張力は式(2.5)で計算される^{2.8)}。

$$p_{a2} = \phi_2 \cdot \alpha_c \cdot c \cdot \sigma_t \cdot A_c \quad (2.5)$$

ここに、


p_{a2} : コーン状破壊により決まる許容引張力

ϕ_2 : 低減係数（短期荷重用：2/3、長期荷重用：1/3）

α_c : 施工のばらつきを考慮した低減係数（=0.75）

$c \cdot \sigma_t$: コーン状破壊に対するコンクリートの割裂強度（ $=0.31\sqrt{f'_{ck}}$ ）

f'_{ck} : コンクリートの設計基準強度

A_c : コーン状破壊面の有効水平投影面積（ $=\pi l_{ce}(l_{ce} + D_a)$ 、 2-6 参照）

l_{ce} : 強度算定用埋込み長さ（ 2-6 参照）


$l < 4D_a$ の場合： $l_{ce} = l$

$l \geq 4D_a$ の場合： $l_{ce} = 4D_a$

l : アンカーの埋込み長さ

（金属拡張式アンカーでは母材コンクリート表面から拡張部先端までの距離）

D_a : アンカー本体の直径

コーン状破壊の場合の有効水平投影面積 A_c の求め方は、 2-6 に示すとおりである。日本建築学会の「各種合成構造設計指針・同解説」では、強度算定用埋込み長さ l_{ce} の部分から、母材コンクリートが角度 45° のコーン状に破壊することを想定している。なお、 l_{ce} は、埋込み長さ l が $4D_a$ 未満の場合は l 、 $4D_a$ 以上の場合は $4D_a$ と、埋込み長さによって、 l か $4D_a$ のどちらかをとることとしている。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・維持管理指針（案）」の場合とは、有効埋込み長さ l_e ではなく、 l_{ce} を用いている点が異なる。

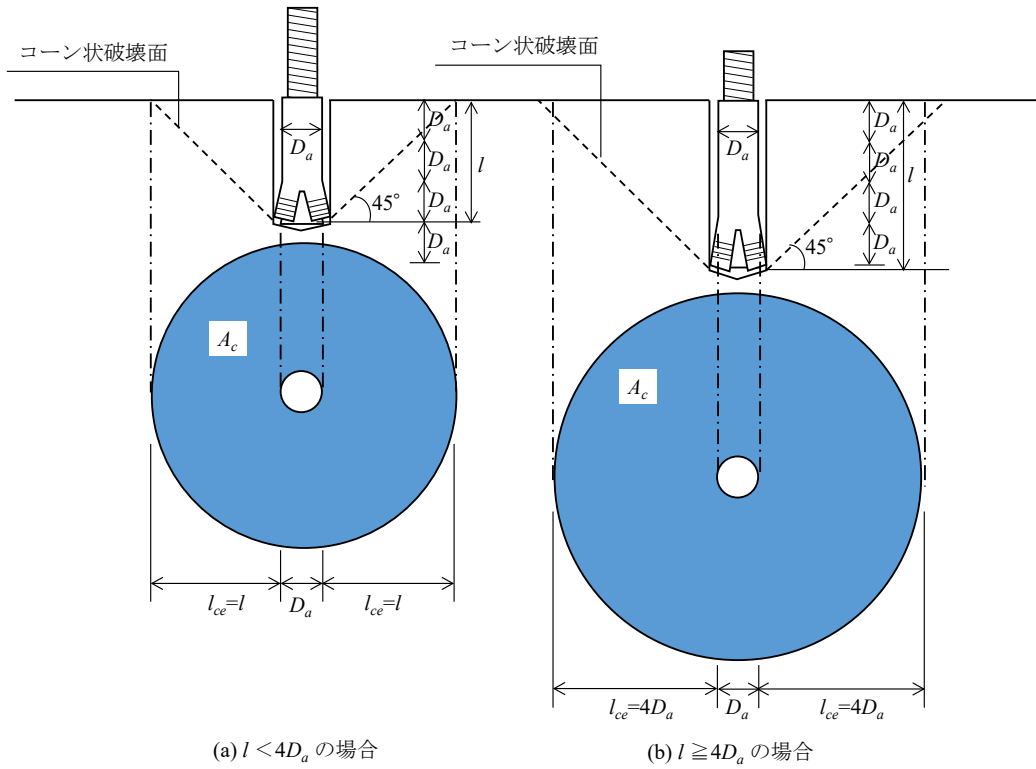


図 2-6 有効水平投影面積 A_c の求め方

3) 付着力により決まる許容引張力

接着系アンカーの付着力により決まる許容引張力は式(2.6)で計算される^{2.7)}。

$$p_{a3} = \phi_3 \cdot \tau_a \cdot \pi \cdot D_a \cdot l_{ce} \quad (2.6)$$

ここに、

- p_{a3} : 接着系アンカーの付着力により決まる許容引張力
- ϕ_3 : 低減係数 (短期荷重用 : 2/3、長期荷重用 : 1/3)
- D_a : アンカー筋の径
- l_{ce} : 強度算定用埋込み長さ ($= l_e - 2D_a$)
- l_e : 有効埋込み長さ (図 2-7 参照)
- τ_a : へりあきやアンカーピッチ (アンカー設置間隔) を考慮した接着系アンカーの引張力に対する付着強度 ($= \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \tau_{bavg}$)
- τ_{bavg} : 接着系アンカーの基本平均付着強度 (表 2-2 参照)

α_n : へりあきやアンカーピッチによる付着強度の低減係数

$$= 0.5 \left(\frac{c_n}{l_e} \right) + 0.5, \quad (n = 1, 2, 3)$$

ただし、 $\left(\frac{c_n}{l_e} \right) \geq 1.0$ の場合 : $\left(\frac{c_n}{l_e} \right) = 1.0$

$$l_e \geq 10D_a \text{ の場合 : } l_e = 10D_a$$

c_n : へりあき寸法、または、アンカーピッチ a の1/2で $c_n = a_n/2$ ($n = 1, 2, 3$)

(最も小さい寸法となる3面までを設計で考慮する、図2-8参照)

日本建築学会の「各種合成構造設計指針・同解説」の場合、直径が D_a 、深さが l_{ce} ($l_e - 2D_a$) の円筒表面積に作用する付着力を想定している。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・維持管理指針(案)」の場合とは、有効埋込み長さ l_e ではなく、 $2D_a$ 短い l_{ce} を用いている点が異なる。

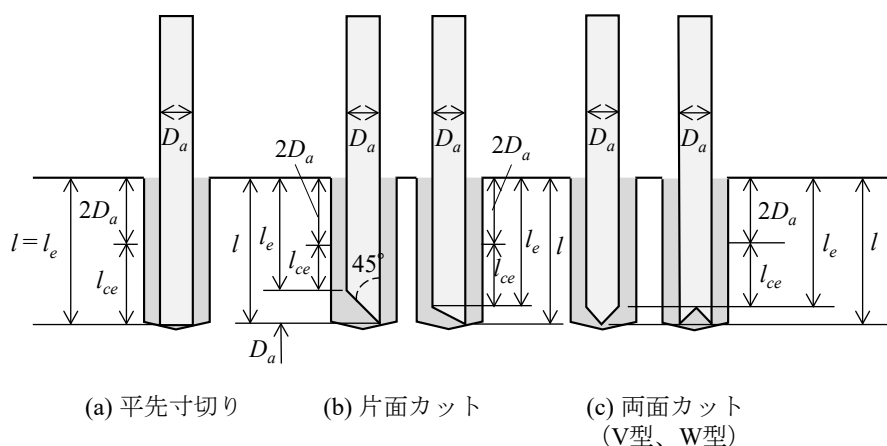


図2-7 接着系アンカーの有効埋込み長さ l_e の求め方

表2-2 接着系アンカーの基本平均付着強度 τ_{bavg}

	カプセル式		注入式
	有機系接着剤	無機系接着剤	有機系接着剤
普通コンクリート	$10\sqrt{f'_{ck}/21}$	$5\sqrt{f'_{ck}/21}$	$7\sqrt{f'_{ck}/21}$

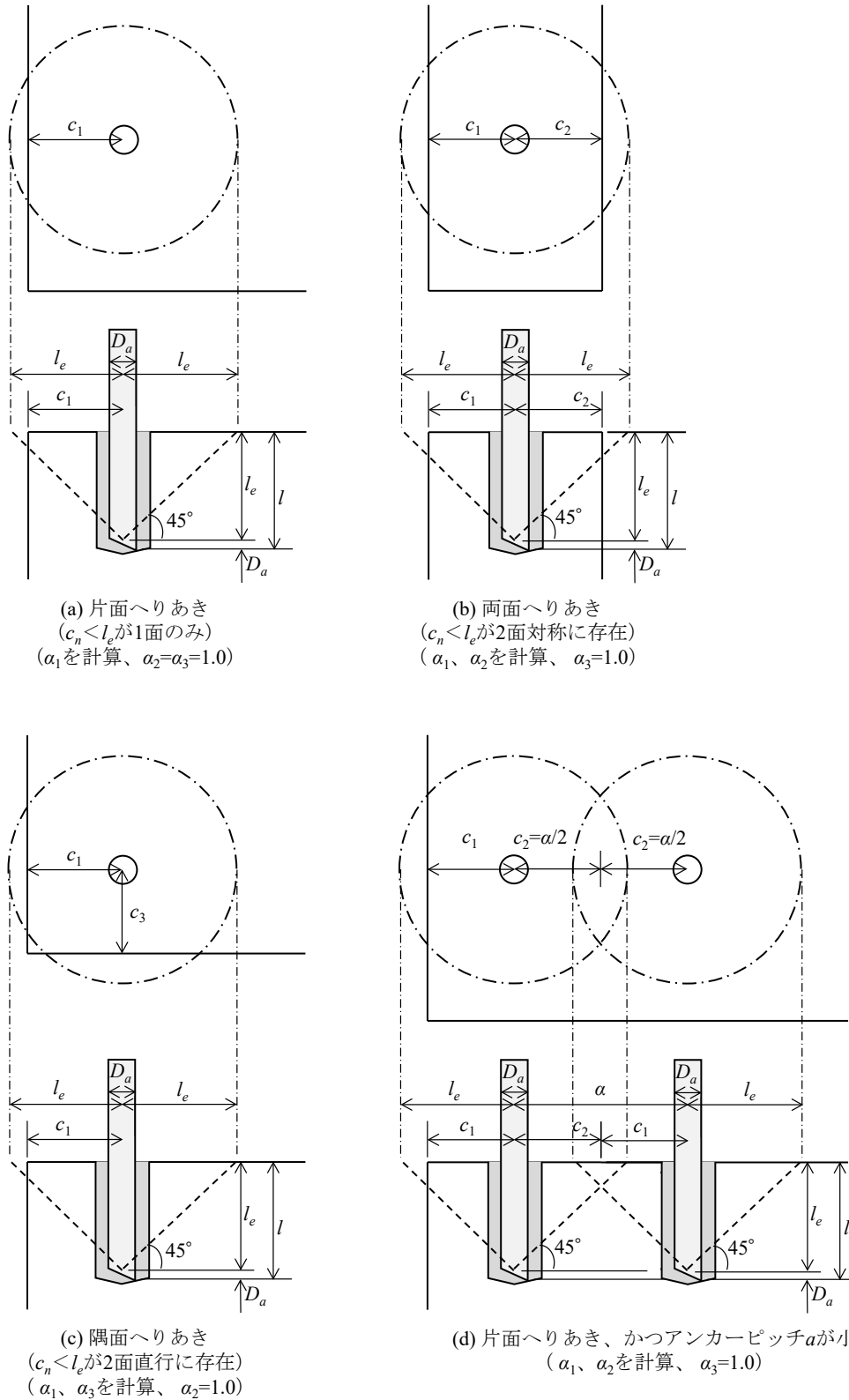


図 2-8 接着系アンカーのへりあき面とへりあき寸法

(3) 群配置の影響

ジェットファンは吊り金具・アンカーを介して覆工コンクリートに設置されるが、通常、写真 2-1 に示すように複数のアンカーが用いられる（群配置）。特に、隣接するアンカーピッチが小さく、図 2-9 に示すように各アンカーの角度 45°コーンが重なるような場合の有効水平投影面積 A_c の求め方は、図 2-9 に示すとおり、重複部分を累加しないように求めている^{2.9), 2.10)}。群配置の影響に対する土木学会の「コンクリートのあと施工アンカー工法の設計・施工・維持管理指針（案）」と日本建築学会の「各種合成構造設計指針・同解説」の考え方は同じである。

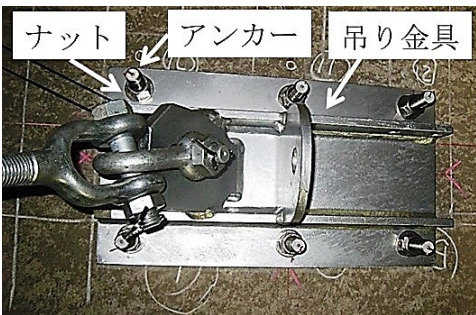


写真 2-1 アンカー設置部の例

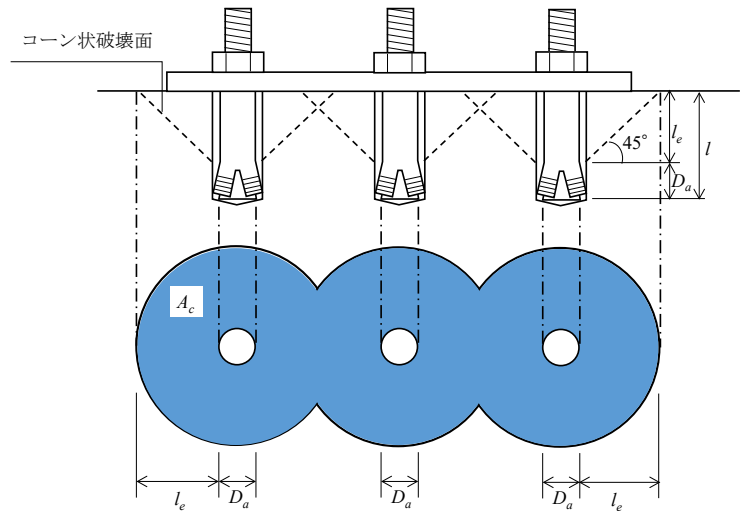


図 2-9 群配置の場合の有効水平投影面積 A_c の求め方
(土木学会の例)

(4) へりあき・はしあきの影響

へりあき・はしあきが小さく、図 2-10(b)に示すように、角度 45°のコーンが母材コンクリート内に収まらない場合の有効水平投影面積 A_c の求め方は、母材コンクリート内に収まる部分のみを求めることとしている^{2.11), 2.12)}。へりあき・はしあきの影響に対する土木学会の「コンクリートのあと施工アンカー工法の設計・施工・維持管理指針（案）」と日本建築学会の「各種合成構造設計指針・同解説」の考え方は同じである。

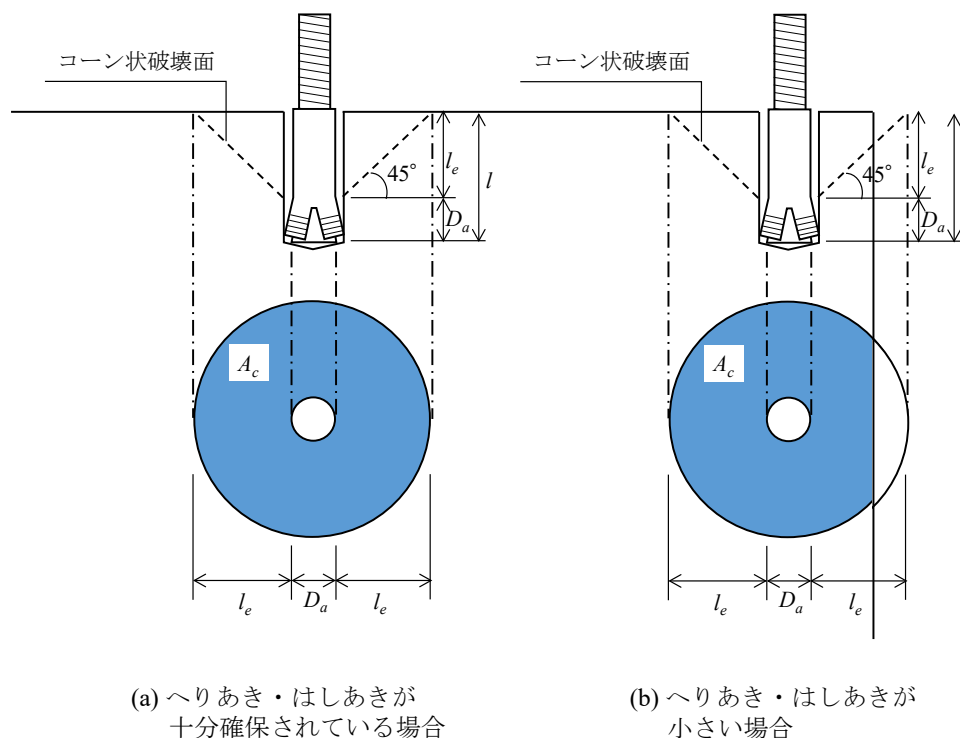


図 2-10 へりあき・はしあきが小さい場合の有効水平投影面積 A_c の求め方（土木学会の例）

2.3.2 せん断力を受ける場合の設計耐力

アンカーがせん断力を受ける場合は、図 2-3 に示すような、アンカーの鋼材降伏によるせん断破壊、支圧破壊、母材コンクリート端部付近ではコーン状破壊、埋込み長さが小さい場合はプライアウトで破壊することが想定される。

アンカーの設計に用いるせん断力に対する耐力等については、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・維持管理指針（案）」では「せん断力に対するあと施工アンカーの設計耐力」、日本建築学会の「各種合成構造設計指針・同解説」では「許容せん断力」と呼んでいる。

土木学会では、せん断力に対するあと施工アンカーの設計耐力は、1) 設計降伏耐力、2) 設計支圧破壊耐力の中で小さい値とすることとしている^{2.12)}。また、はしあきが小さい場合は、3) 設計コンクリートコーン状破壊耐力を確認するのが良いとしている^{2.13)}。

日本建築学会では、許容せん断力は、1) アンカーのせん断強度により決まる許容せん断力、2) 支圧強度により決まる許容せん断力、3) コーン状破壊により決まる許容せん断力の中で最も小さい値とすることとしている^{2.14)}。また、プライアウトについては、せん断設計において規定している最小埋込み長さを確保すれば、プライアウトが生じないと判断している^{2.3)}。

(1) せん断力に対するあと施工アンカーの設計耐力

1) 設計降伏耐力

設計降伏耐力は式(2.7)で計算される^{2.12)}。

$$V_{yd} = \frac{K_t V_y}{\gamma_b} \quad (2.7)$$

ここに、

V_{yd} : せん断力に対する設計降伏耐力

V_y : 降伏耐力

(金属拡張アンカー：アンカー本体と接合筋のうち小さい方を採用)

(アンカー本体の降伏耐力：

本体の設計降伏強度×接合面での本体の最小断面積/ $\sqrt{3}$)

(接合筋の降伏耐力：素材の設計降伏強度×接合面での接合筋の最小断面積/ $\sqrt{3}$)

(接着系アンカー：アンカー筋の素材の設計降伏強度×接合面での最小断面積/ $\sqrt{3}$)

K_t : 使用期間の長さの影響を表す係数 (短期使用：1.0、長期使用：0.5)

γ_b : 部材係数 (一般に、1.1 としてよい)

2) 設計支圧破壊耐力

設計支圧破壊耐力は式(2.8)で計算される^{2.12)}。

$$V_{cd} = \frac{K_t C a_s \sqrt{E_c f'_{cd}}}{\gamma_b} \quad (2.8)$$

ここに、

V_{cd} : せん断力に対する設計支圧破壊耐力

K_t : 使用期間の長さの影響を表す係数 (短期使用：1.0、長期使用：0.5)

C : あと施工アンカーの種類を表す係数 (金属拡張：0.3、接着系：0.4)

E_c : 母材コンクリートのヤング係数

f'_{cd} : 母材コンクリートの設計圧縮強度 (= f'_{ck}/γ_c)

f'_{ck} : 母材コンクリートの設計基準強度

γ_c : コンクリートの材料係数 (一般に、1.3 としてよい)

a_s : 接合面でのアンカーアンカー本体の最小面積

γ_b : 部材係数 (一般に、1.6 としてよい)

3) 設計コンクリートコーン状破壊耐力

はしあき近傍のあと施工アンカーにせん断力が作用する場合は、設計降伏耐力、設計支圧破壊耐力に加えて、図 2-11 に示すように有効投影面積 A_{qc} を求めて式(2.9)の設計コンクリートコーン状破壊耐力を考慮する必要がある^{2.12), 2.13)}。

$$T_{cd} = \frac{K_t \alpha A_{qc} \sqrt{f'_{cd}}}{\gamma_b} \quad (2.9)$$

ここに、

- T_{cd} : 設計コーン状破壊耐力
- K_t : 使用期間の長さの影響を表す係数 (短期使用 : 1.0、長期使用 : 0.5)
- α : あと施工アンカーの種類を表す係数 (金属拡張 : 0.31、接着系 : 0.23)
- A_{qc} : 母材コンクリートのコーン状破壊面の有効投影面積 (= $0.5\pi c^2$ 、図 2-11 参照)
- c : はしあき
- f'_{cd} : 母材コンクリートの設計圧縮強度 (= f'_{ck}/γ_c)
- f'_{ck} : 母材コンクリートの設計基準強度
- γ_c : コンクリートの材料係数 (一般に、1.3 としてよい)
- γ_b : 部材係数 (一般に、1.6 としてよい)

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・維持管理指針 (案)」の場合、アンカー設置位置の母材コンクリート表面から、母材コンクリートが角度 45° のコーン状に破壊することを想定している。

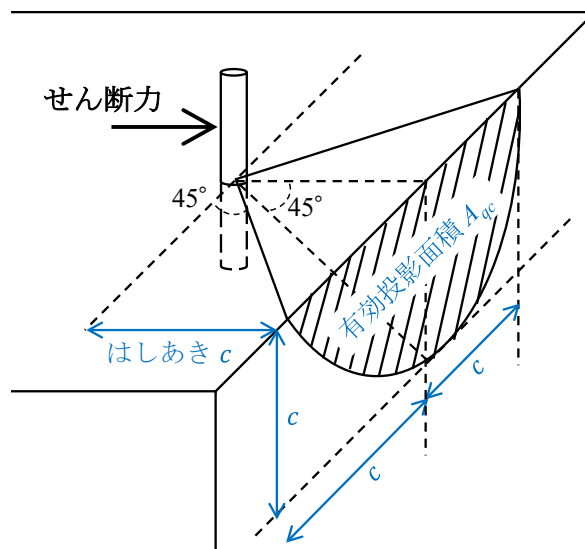


図 2-11 はしあき近傍のあと施工アンカーにせん断力に対する有効投影面積 A_{qc} の求め方

(2) せん断力に対するあと施工アンカーの許容せん断力

1) せん断強度により決まる許容せん断力

せん断強度により決まる許容せん断力は式(2.10)で計算される^{2.14)}。

$$q_{a1} = \phi_1 \cdot s \cdot \sigma_{qa} \cdot s_c \cdot a \quad (2.10)$$

ここに、

- q_{a1} : せん断強度により決まる許容せん断力
- ϕ_1 : 低減係数 (短期荷重用 : 1.0、長期荷重用 : 2/3)
- $s \cdot \sigma_{qa}$: アンカーのせん断強度 (= $0.7 \cdot s \cdot \sigma_y$)
- $s \cdot \sigma_y$: アンカーの規格降伏点強度 (材質が明確でない場合は SS400 の規格降伏点強度を用いる。)
- $s_c \cdot a$: 金属系拡張アンカーの場合 : 母材コンクリート表面におけるアンカーの断面積
接着系アンカーの場合 : アンカー筋の断面積で、軸部断面積とねじ部有効断面積のうち小さい方

2) 支圧強度により決まる許容せん断力

支圧強度により決まる許容せん断力は式(2.11)で計算される^{2.14)}。

$$q_{a2} = \phi_2 \cdot \alpha_c \cdot c \cdot \sigma_{qa} \cdot s_c \cdot a \quad (2.11)$$

ここに、

- q_{a2} : 支圧強度により決まる許容せん断力
- ϕ_2 : 低減係数 (短期荷重用 : 2/3、長期荷重用 : 1/3)
- α_c : 施工のばらつきを考慮した低減係数
金属拡張アンカーの場合 : (=0.75)
接着系アンカーの場合 : (=1)
- $c \cdot \sigma_{qa}$: コンクリートの支圧強度 (= $0.7 \sqrt{f'_{ck} \cdot E_c}$)
- f'_{ck} : コンクリートの設計基準強度
- E_c : コンクリートのヤング係数
- $s_c \cdot a$: 金属系拡張アンカーの場合 : 母材コンクリート表面におけるアンカーの断面積
接着系アンカーの場合 : アンカー筋の断面積で、軸部断面積とねじ部有効断面積のうち小さい方

3) コーン状破壊により決まる許容せん断力

コーン状破壊により決まる許容せん断力は式(2.12)で計算される^{2.14)}。

$$q_{a3} = \phi_2 \cdot \alpha_c \cdot c \cdot \sigma_t \cdot A_{qc} \quad (2.12)$$

ここに、

- q_{a3} : コーン状破壊により決まる許容せん断力
- ϕ_2 : 低減係数 (短期荷重用 : 2/3、長期荷重用 : 1/3)
- α_c : 施工のばらつきを考慮した低減係数 (=0.75)
- $c \cdot \sigma_t$: コーン状破壊に対するコンクリートの割裂強度 ($=0.31\sqrt{f'_{ck}}$)
- f'_{ck} : コンクリートの設計基準強度
- A_{qc} : せん断力方向の側面におけるコーン状破壊面の有効投影面積 (= $0.5\pi c^2$ 、図 2-11 参照)
- c : はしあきの寸法

日本建築学会の「各種合成構造設計指針・同解説」の有効投影面積の考え方は、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・維持管理指針 (案)」と同じである。

また、群配置されたアンカーにおいて、特に、隣接するアンカーの距離がはしあきの2倍より小さい場合は、図 2-12 に示すとおり有効投影面積が重複するため、重複部分を累加しないように有効投影面積 A_{qc} を求めるとしている^{2.9)}。群配置の影響に対する土木学会の「コンクリートのあと施工アンカー工法の設計・施工・維持管理指針 (案)」と日本建築学会の「各種合成構造設計指針・同解説」の考え方は同じである。

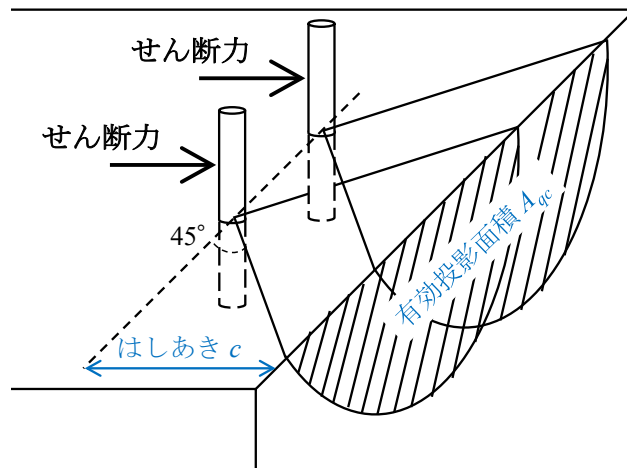


図 2-12 せん断力に対する群配置の場合の有効投影面積 A_{qc} の求め方

2.3.3 軸引張力とせん断力を受ける場合の設計耐力

換気用ジェットファンを覆工コンクリートに設置したアンカーに吊り金具を介して取り付ける場合、

写真 2-2 の事例ではアンカーには軸引張力とせん断力が同時に作用している。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・維持管理指針（案）」では、軸引張力とせん断力が同時に作用している場合の安全性は、式(2.13)を満足していることを確認することで行うとしている^{2.15)}。

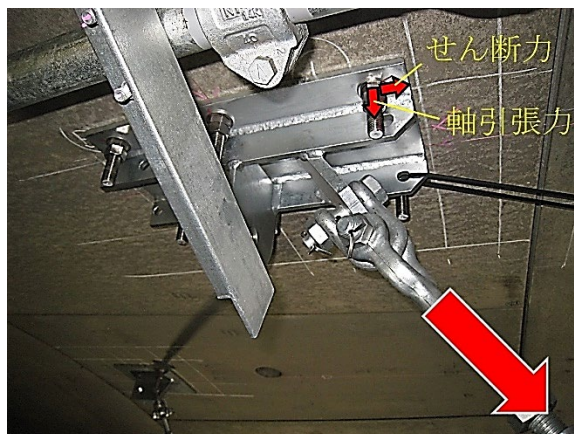


写真 2-2 アンカーに作用する軸引張力とせん断力

$$\gamma_i = \left[\left(\frac{T_D}{T_{ud}} \right) + \left(\frac{V_D}{V_{ud}} \right) \right] \leq 1.0 \quad (2.13)$$

ここに、

- T_D : 設計軸引張力
- V_D : 設計せん断力
- T_{ud} : 設計軸引張耐力
- V_{ud} : 設計せん断耐力
- γ_i : 影響度係数（詳細は文献 2.13)参照)

2.3.4 あと施工アンカーの構造細目

(1) アンカーピッチ

あと施工アンカーのアンカーピッチについては、各機関において、表 2-3 に示すとおりに定められている。

表 2-3 あと施工アンカーのアンカーピッチ

	土木学会	日本建築学会	日本建築あと施工 アンカー協会 (参考図)
金属拡張アンカー	アンカーボルトの呼び 径の 5 倍以上 ^{2.16)}	梁の材軸方向の間隔： アンカーボルト定着部 外径の 7.5 倍以上かつ 600mm 以下 ^{2.17)} 梁の材軸の直角方向の間 隔： アンカーボルト定着部 外径の 5 倍以上 ^{2.17)}	梁の材軸方向の間隔： アンカーボルトの径の 7.5 倍以上かつ 300mm 以下 ^{2.19), 2.20), 2.21)} 梁の材軸の直角方向の間 隔： アンカーボルトの径の 5.5 倍以上 ^{2.19), 2.20), 2.21)}
接着系アンカー		アンカー筋径の 20 倍以上 ^{2.18)}	

(2) へりあき・はしあき寸法

あと施工アンカーのへりあき・はしあき寸法については、各機関において、表 2-4 に示すとおりに定められている。

表 2-4 あと施工アンカーのへりあき・はしあき寸法

	土木学会	日本建築学会	日本建築あと施工 アンカー協会 (参考図)
金属拡張アンカー	へりあき寸法： アンカーボルトの呼 び径の 3 倍以上 ^{2.16)} はしあき寸法： アンカーボルトの呼 び径の 3 倍以上 ^{2.16)}	へりあき寸法： 40mm 以上 ^{2.17)} はしあき寸法： 100mm 以上 ^{2.17)}	へりあき寸法： アンカーボルトの径の 2.5 倍以上 ^{2.19), 2.20), 2.21)} はしあき寸法： アンカーボルトの径の 5 倍以上 ^{2.19), 2.20), 2.21)}
接着系アンカー		へりあき寸法： アンカー筋径の 10 倍以 上 ^{2.18)} はしあき寸法： アンカー筋径の 3 倍以 上 ^{2.22)}	

(3) 母材残り厚さ (コンクリートかぶり)

あと施工アンカーの母材残り厚さ (コンクリートかぶり厚さ) については、各機関において、表 2-5 に示すとおりに定められている。

表 2-5 あと施工アンカーの母材残り厚さ (コンクリートかぶり厚さ)

	土木学会	日本建築学会	日本建築あと施工アンカー協会 (参考図)
金属拡張アンカー	母材残り厚さ：30mm 以上 ^{2.16)}	コンクリートかぶり厚 さ：あらゆる方向につい て 30mm 以上 ^{2.17)}	—
接着系アンカー		—	

(4) 埋込み長さ

あと施工アンカーの埋込み長さについては、各機関において、表 2-6 に示すとおりに定められている。

表 2-6 あと施工アンカーの埋込み長さ

	土木学会	日本建築学会	日本建築あと施工アンカー協会 (参考図)
金属拡張アンカー	30mm 以上 ^{2.4)}	有効埋込長さ： 非構造用：アンカー固 着部径の 3 倍以上 ^{2.17)} 構造用：アンカー固着 部径の 5 倍以上 ^{2.17)}	—
接着系アンカー	アンカー筋の呼び径の 7 倍以上 ^{2.4)}	有効埋込長さ： アンカー筋径の 7 倍以 上 ^{2.23)}	

2.4 施工管理一般

2.4.1 一般的なあと施工アンカーの施工手順

あと施工アンカーの一般的な施工手順は、図 2-13 に示すとおりである。特に、表 2-1 に示す接着系あと施工アンカー（カプセル式）は図 2-14 に、接着系あと施工アンカー（注入式）は図 2-15 に、金属系あと施工アンカー（金属拡張式）の一例としてスリーブ打込み式のものについては図 2-16 に、金属系あと施工アンカー（金属拡張底式）の一例として自穿孔型のものについては図 2-17 に、それぞれの施工手順を図示した（製品によっては、図示したものと異なる手順で施工するものもある）。

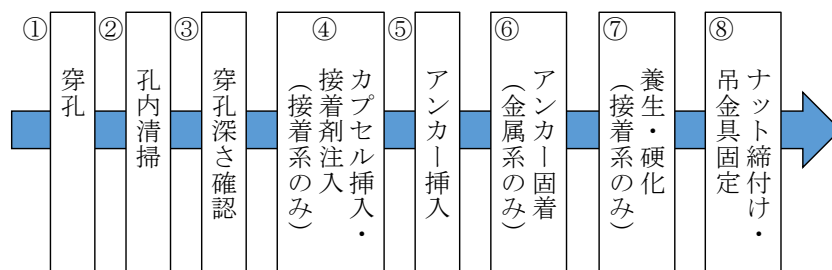


図 2-13 あと施工アンカーの一般的な施工手順の一例

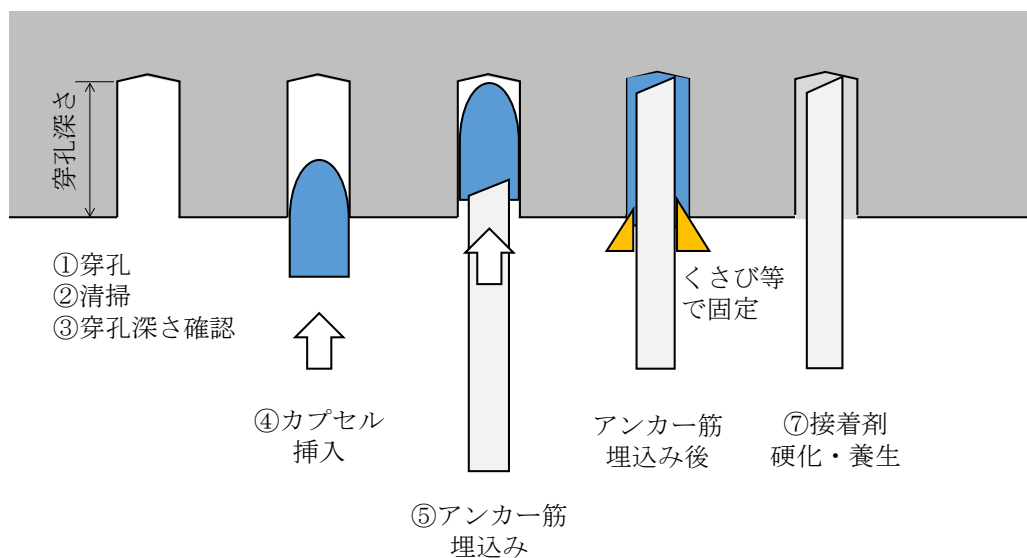


図 2-14 接着系あと施工アンカー（カプセル式）の施工手順の例

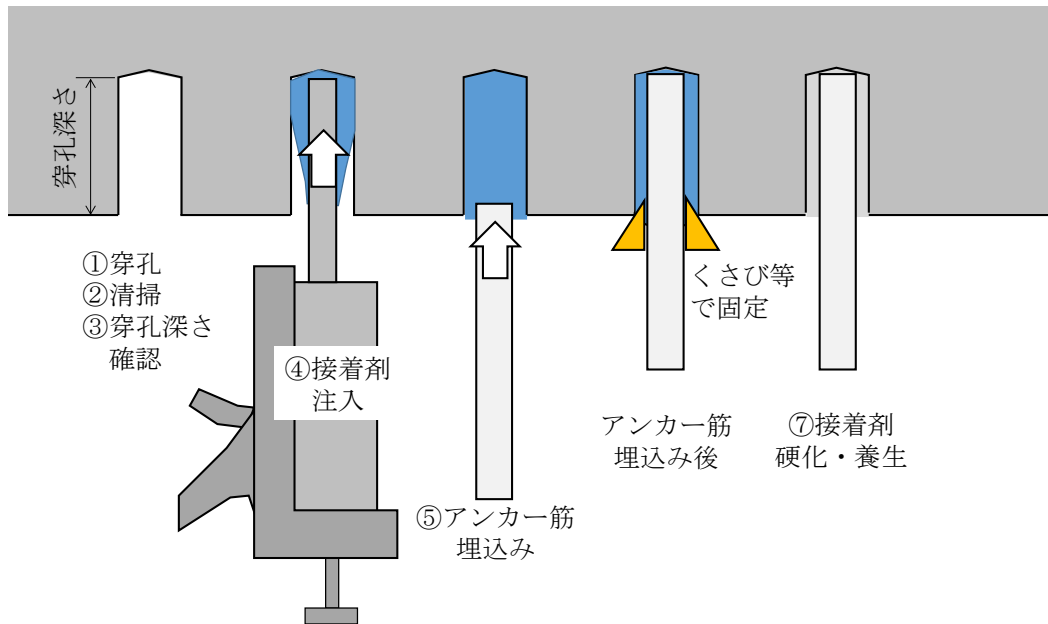
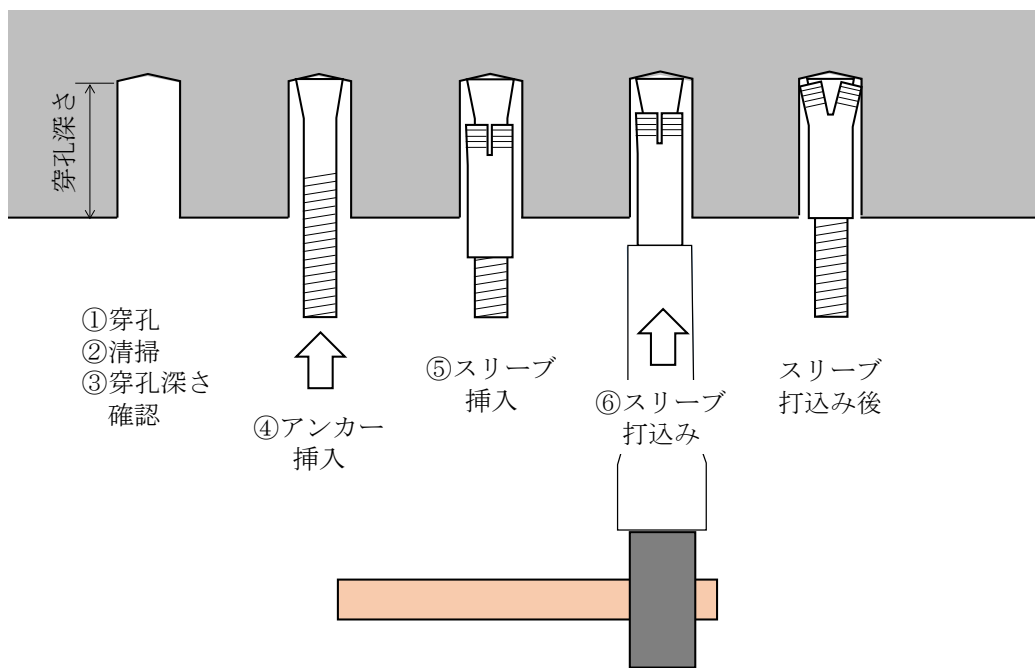


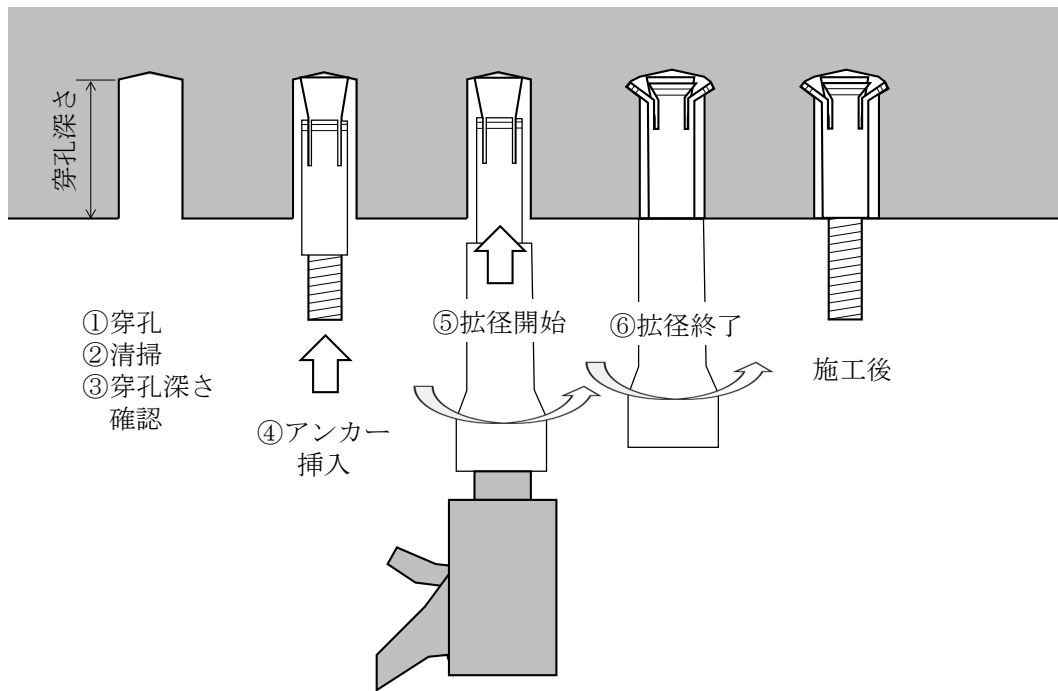
図 2-15 接着系あと施工アンカー（注入式）の施工手順の例



※スリーブ打込み式の一例

※他の方法で拡張させる方式のものもある

図 2-16 金属系あと施工アンカー（金属拡張式）の施工手順の例



※自穿孔型の一例

※二段階削孔により孔の先端部を拡径させる方式のものもある

図 2-17 金属系あと施工アンカー（金属拡底式）の施工手順の例

2.4.2 一般的な施工管理項目

図 2-14～図 2-17 に示した施工手順について、一般的な施工管理項目を表 2-7 に示す。その他、ここで触れていない詳細事項については、文献(2.24)、(2.25)、(2.26)などに示されている。

表 2-7 一般的な施工管理項目

施工手順	施工管理項目・留意点
①穿孔	<ul style="list-style-type: none"> ・穿孔位置は、母材コンクリートにひび割れや豆板などの異常がない健全な場所を選定 ・穿孔に用いるドリルの刃には、予定する穿孔深さとなるよう、あらかじめマーキングを実施 ・穿孔深さは、ドリルの刃先（ビット）の三角形の部分を除いた位置から測定（写真 2-3 参照）
②孔内清掃	<ul style="list-style-type: none"> ・切削粉を吸塵やブラシかけにより除去
③穿孔深さの確認	<ul style="list-style-type: none"> ・孔の先端部の三角形の部分を除いた長さを測定して確認（図 2-14～図 2-17 参照） ・アンカーを一旦挿入し、施工面の位置にマーキングを実施
④カプセル挿入（接着系）	<ul style="list-style-type: none"> ・有効期限や挿入方向を確認 ・吸水の必要なカプセルは、浸水時間を確認
④接着剤注入（接着系）	<ul style="list-style-type: none"> ・注入用ノズルを孔底まで挿入し（図 2-15 参照）、ノズルを抜きながら一定の速度で接着剤を吐出し、気泡が残らないように注入
⑤アンカー挿入	<ul style="list-style-type: none"> ・接着系（カプセル式）では、アンカーを回転、回転打撃、打込みするなどしながら（種類により異なる）、マーキング位置まで埋込み ・接着系（注入式）では、気泡を巻き込まないように低速で回転させながら、マーキング位置まで埋込み（接着剤が溢れ出る） ・金属系では、アンカーを所定の位置まで挿入
⑥アンカー固着（金属系）	<ul style="list-style-type: none"> ・専用工具等を用いて、種類ごとに定められた方法によって、先端部を拡張・拡底 ・金属拡張型では、本体を打撃、スリーブを打撃、本体の芯棒を打撃、所定のトルクで締付けするなどして（種類により異なる）、先端部を拡張 ・金属拡底型では、所定のトルクで回転させ、スリーブ先端が回転しながら拡張することで孔の先端部が拡径し、固着（図 2-17 参照）
⑦硬化・養生（接着系）	<ul style="list-style-type: none"> ・上向き施工の場合、アンカーの脱落を防止するため、接着剤が硬化し所定の養生が終了するまで、くさび等を用いてアンカーを固定
⑧ナット締付け・吊り金具	<ul style="list-style-type: none"> ・アンカー設置後、ワッシャ、ナットを用いて吊り金具を取付け ・ナットは所定のトルクで締付け ・供用中のナット弛みを確認できるよう、合いマークを施工（図 2-18 参照） ・所定のトルクで締付けて先端部を拡張させる種類の金属拡張型では、⑤と⑧を同時に実施



写真 2-3 ドリルの刃に施す穿孔深さのマーキングの例

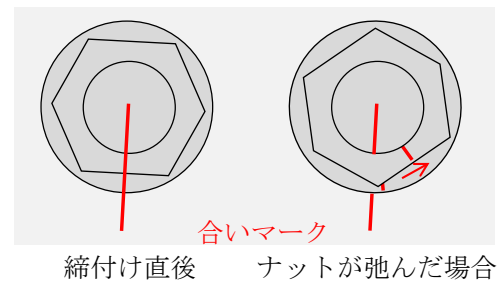


図 2-18 合いマークの例

2.4.3 母材コンクリート

接着系、金属系によらず、あと施工アンカーを設置する母材コンクリートに求められる条件（設計基準強度）は、各基準類で表 2-8 に示す値の範囲を示している^{2.4), 2.27), 2.28), 2.29), 2.30)}。特に、金属系あと施工アンカー（金属拡張型）では、高強度コンクリートの場合は拡張部が拡張しにくくなり、打込み不足となり得ることが報告されている^{2.4), 2.29), 2.30)}。

表 2-8 母材コンクリートに求められる条件

母材コンクリート	使用骨材		設計基準強度 (N/mm ²)		
	粗骨材	細骨材	土木学会	日本建築学会	日本建築あと施工アンカー協会
普通コンクリート	砂利、碎石	砂、砕砂	18 以上 ただし 36 超は要確認	18~30	18~36 (実強度 16~40 程度)

参考文献

- 2.1) 公益社団法人土木学会：コンクリートのあと施工アンカー工法の設計・施工・維持管理指針（案）、コンクリートライブラリー160、p.1、2022.1
- 2.2) 一般社団法人日本建築学会：各種合成構造設計指針・同解説、2010年改訂版、p.31、2010.11
- 2.3) 一般社団法人日本建築学会：各種合成構造設計指針・同解説、2010年改訂版、pp.232~233、2010.11
- 2.4) 公益社団法人土木学会：コンクリートのあと施工アンカー工法の設計・施工・維持管理指針（案）、コンクリートライブラリー160、pp.44~47、2022.1
- 2.5) 公益社団法人土木学会：コンクリートのあと施工アンカー工法の設計・施工・維持管理指針（案）、コンクリートライブラリー160、pp.1~41、2022.1
- 2.6) 公益社団法人土木学会：コンクリートのあと施工アンカー工法の設計・施工・維持管理指針（案）、コンクリートライブラリー160、pp.63~66、2022.1
- 2.7) 一般社団法人日本建築学会：各種合成構造設計指針・同解説、2010年改訂版、pp.252~254、2010.11
- 2.8) 一般社団法人日本建築学会：各種合成構造設計指針・同解説、2010年改訂版、pp.321~322、2010.11
- 2.9) 公益社団法人土木学会：コンクリートのあと施工アンカー工法の設計・施工・維持管理指針（案）、

- コンクリートライブラリー160、pp.70～71、2022.1
- 2.10) 一般社団法人日本建築学会：各種合成構造設計指針・同解説、2010年改訂版、pp.229～230、2010.11
- 2.11) 公益社団法人土木学会：コンクリートのあと施工アンカー工法の設計・施工・維持管理指針(案)、コンクリートライブラリー160、pp.69～70、2022.1
- 2.12) 公益社団法人土木学会：コンクリートのあと施工アンカー工法の設計・施工・維持管理指針(案)、コンクリートライブラリー160、pp.63～68、2022.1
- 2.13) 公益社団法人土木学会：コンクリートのあと施工アンカー工法の設計・施工・維持管理指針(案)、コンクリートライブラリー160、pp.69～70、2022.1
- 2.14) 一般社団法人日本建築学会：各種合成構造設計指針・同解説、2010年改訂版、pp.323～324、2010.11
- 2.15) 公益社団法人土木学会：コンクリートのあと施工アンカー工法の設計・施工・維持管理指針(案)、コンクリートライブラリー160、p.68、2022.1
- 2.16) 公益社団法人土木学会：コンクリートのあと施工アンカー工法の設計・施工・維持管理指針(案)、コンクリートライブラリー160、p.72、2022.1
- 2.17) 一般社団法人日本建築学会：各種合成構造設計指針・同解説、2010年改訂版、pp.327～328、2010.11
- 2.18) 一般社団法人日本建築学会：各種合成構造設計指針・同解説、2010年改訂版、pp.261～264、2010.11
- 2.19) 一般社団法人日本建築あと施工アンカー協会：あと施工アンカー施工指針(案)、【金属系】、p.9、2019.10
- 2.20) 一般社団法人日本建築あと施工アンカー協会：あと施工アンカー施工指針(案)、【接着系/注入方式/カートリッジ型】-ミキシングノズル式(有機系)-、p.9、2019.10
- 2.21) 一般社団法人日本建築あと施工アンカー協会：あと施工アンカー施工指針(案)、【接着系/カプセル方式】、p.9、2019.10
- 2.22) 一般社団法人日本建築学会：各種合成構造設計指針・同解説、2010年改訂版、p.255、2010.11
- 2.23) 一般社団法人日本建築学会：各種合成構造設計指針・同解説、2010年改訂版、pp.267～269、2010.11
- 2.24) 一般社団法人日本建築あと施工アンカー協会：あと施工アンカー施工指針(案)、【接着系/カプセル方式】、2019.10
- 2.25) 一般社団法人日本建築あと施工アンカー協会：あと施工アンカー施工指針(案)、【接着系/注入方式/カートリッジ型】-ミキシングノズル式(有機系)-、2019.10
- 2.26) 一般社団法人日本建築あと施工アンカー協会：あと施工アンカー施工指針(案)、【金属系】、2019.10
- 2.27) 一般社団法人日本建築あと施工アンカー協会：あと施工アンカー施工指針(案)、【接着系/カプセル方式】、pp.17～18、2019.10
- 2.28) 一般社団法人日本建築あと施工アンカー協会：あと施工アンカー施工指針(案)、【接着系/注入方式/カートリッジ型】-ミキシングノズル式(有機系)-、p.17、2019.10
- 2.29) 一般社団法人日本建築あと施工アンカー協会：あと施工アンカー施工指針(案)、【金属系】、p.16、2019.10
- 2.30) 一般社団法人日本建築学会：各種合成構造設計指針・同解説、2010年改訂版、p.321、2010.11

3. 道路トンネル用ジェットファンの取付構造及び現地計測等による作用荷重の実態

3.1 取付構造の概要

道路トンネル用ジェットファンの設置方法には吊下げ式と固定式とがあり、海外では固定式も実施されているが、国内では図3-1に示す吊下げ式が一般的である^{3.1)}。吊下げ式の場合、吊り金具及び方向安定金具は複数のアンカーによって覆工に固定され、ターンバックルを介してジェットファンと接続される。吊り金具に接続されるターンバックルはジェットファン本体の重量を支持し、方向安定金具に接続されるターンバックルはジェットファン運転時等に本体が揺動することのないよう安定化させるものである。なお、これらに加え、取付部材（吊り金具、ターンバックル、アンカー等の総称）の破断・脱落に伴うジェットファンの落下といった不測の事態に備え、バックアップ材が設置される事例も、近年、

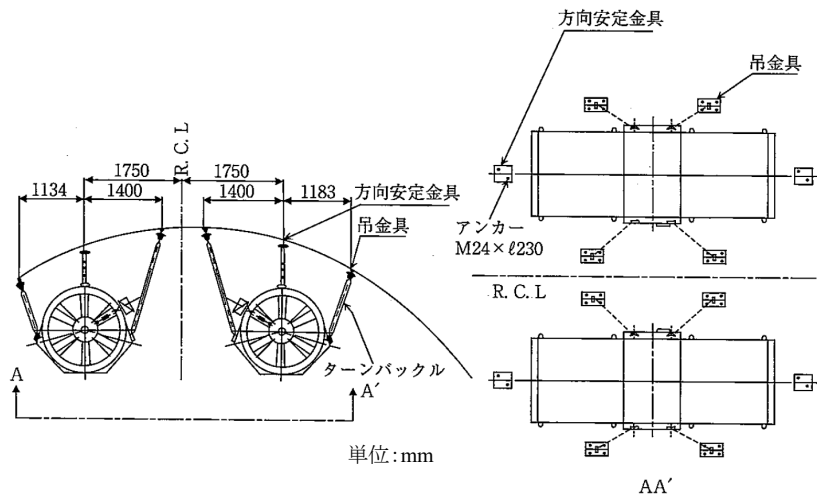


図3-1 ジェットファンの取付構造の例（1250型ジェットファン）^{3.1)}

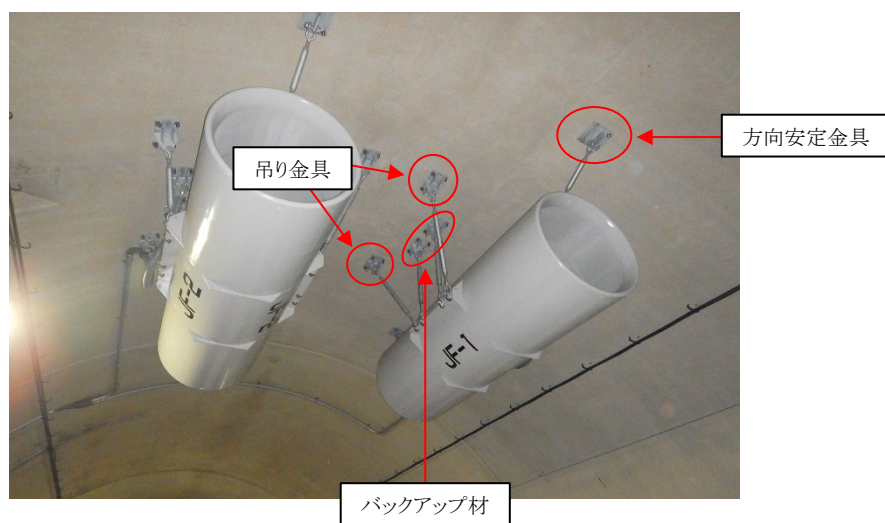


写真3-1 ジェットファンの設置状況の例（バックアップ材付）

増加傾向にある。トンネルの供用前に、ジェットファンの据付けにあわせてバックアップ材が設置された事例を写真 3-1 に示す。

アンカーに関しては、機械工事共通仕様書（案）^{3.2)} のジェットファン設備に関する節内において、ステンレス製の金属拡張アンカーにより吊り金具を設置することが記載されている。また、高速道路株式会社 3 社が発刊する機械電気通信設備標準設計図集^{3.3)} において、ジェットファン設備の取付構造に関し、吊り金具、方向安定金具、ターンバックル、アンカー等の取付部材の図面が示されており、ボルト径 M24 の金属拡張アンカー（スリーブ打込み式、スリーブ長 140mm）が図示されている。あと施工アンカーの設計・施工指針（案）^{3.4)} の【標準編】で対象とされるボルト径の範囲は M8～M24 であり、トンネル内のジェットファンの吊下げにおいて、一般的に、ボルト径及びスリーブ長が最大級となる金属拡張アンカー（スリーブ打込み式）が用いられていると言える。

3.2 取付部材の強度計算の概要

道路トンネル技術基準（換気編）・同解説^{3.1)} において、取付部材の設計にあたり「吊り金具を含めアンカーの強度はファン本体の静荷重の 15 倍以上をとることが望ましい」とされている。ただし、ジェットファンの取付部材の設計に関する要領や指針等はない。実務での強度計算例を複数例調査したところ、ジェットファン本体の重量が作用荷重となる吊下げ用取付部材と、ジェットファン運転時の推力が作用荷重となる方向安定用取付部材のそれぞれで、表 3-1 に例示するように、取付部材の各種部品単位での強度が作用荷重の 15 倍以上となることの確認が行われていた。

表 3-1 ジェットファンの取付部材の強度計算における確認項目の例

取付部材	確認項目
ターンバックル	シャックルボルトの引張強度
	シャックルピンの強度
	パイプ部の引張強度
吊り金具 方向安定金具	アイプレートの引張強度・せん断強度 (ターンバックルのピンを通す穴付近を対象に算定)
	溶接部の強度
	取付金具の強度
アンカーボルト	<ul style="list-style-type: none"> ・鋼材の降伏により決まる許容引張力 ・母材コンクリートのコーン状破壊により決まる許容引張力

3.3 ジェットファンの取付部材で発生する軸力の現地計測

3.3.1 現地計測の概要

3.1 及び 3.2 において、ジェットファンの取付構造や取付部材の強度計算の概要について示した。これら現行の設計の妥当性を評価するため、取付部材で発生する軸力の現地計測を行った^{3.5)}。本計測試験では、供用前の道路トンネルにおいて、ジェットファンが据え付けられる前にターンバックルにひずみゲージを設置し、ジェットファンの据付け前後や起動・停止時、大型車両通行時、地震発生時のターンバックルの軸力とその変動傾向を計測した。対象トンネルは、延長約 1.7km の 2 車線の国道トンネルで、山岳工法 (NATM) により建設された。設置されたジェットファンの諸元を表 3-2 に示す。図 3-2 に示すように、吊り金具に接続するターンバックル 4 本 (TB2、TB3、TB5、TB6、以降で吊り用ターンバックルと称する) と方向安定金具に接続するターンバックル 2 本 (TB1、TB4、以降で方向安定用ターンバックルと称する) を対象に、平成 30 (2018) 年 2 月より計測を開始した。計測状況を写真 3-2 に示す。

表 3-2 設置されたジェットファンの諸元

型名	口径 (mm)	全長 (mm)	噴流速度 (m/s)	風量 (m ³ /s)	概算質量 (kg)
1250 型	1,250	4,250	35	43	2,000

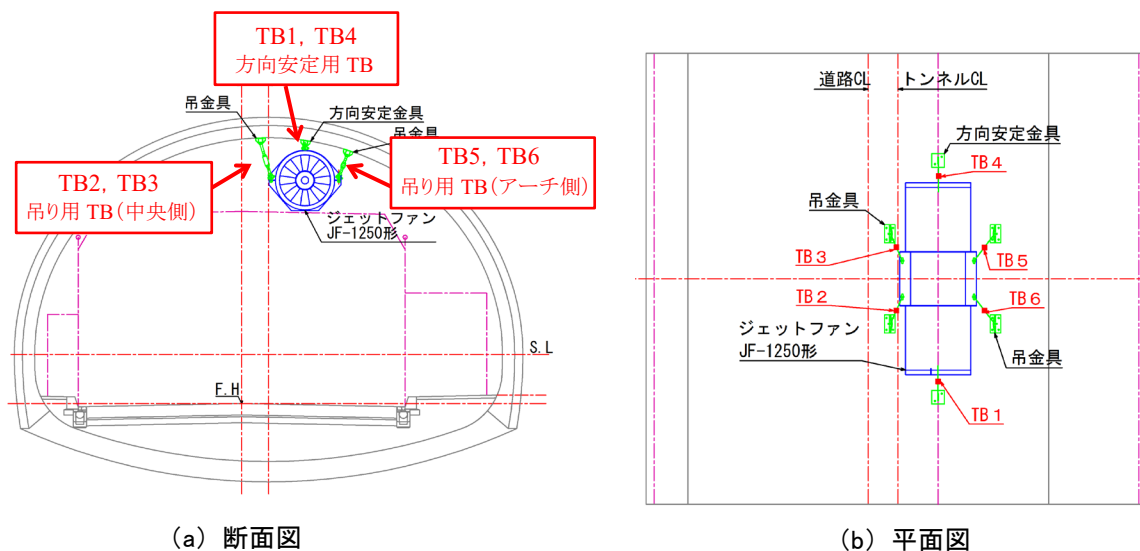


図 3-2 計測対象としたターンバックル TB1～TB6 の位置関係



(a) ジェットファン全景



(b) TB 3 の計測状況

写真 3-2 ターンバックルの軸力計測状況

3.3.2 ターンバックルに作用する荷重の計算

(1) 吊り用ターンバックルに作用する荷重

吊り用ターンバックルに作用する荷重は、設置されるジェットファン本体の荷重および吊り角度 α 、 β 、 γ (図 3-3 参照) から、次式により計算される。

$$TB_{2,3} = W/4 \times \sqrt{1 + \tan^2\alpha + \tan^2\gamma} \times 9.8 = 2,000/4 \times \sqrt{1 + \tan^2 14^\circ + \tan^2 33^\circ} \times 9.8 = 5,969N \quad (3.1)$$

$$TB_{5,6} = W/4 \times \sqrt{1 + \tan^2\beta + \tan^2\gamma} \times 9.8 = 2,000/4 \times \sqrt{1 + \tan^2 14^\circ + \tan^2 45^\circ} \times 9.8 = 7,037N \quad (3.2)$$

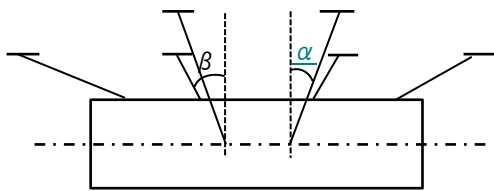
ここに、W：ジェットファンの質量 2,000 kg

α ：TB2、TB3 の吊り角度 (側面図における投影角) 33°

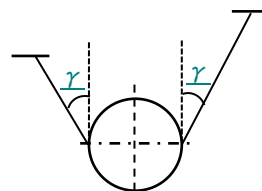
β ：TB5、TB6 の吊り角度 (側面図における投影角) 45°

γ ：吊り用ターンバックルの吊り角度 (正面図における投影角) 14°

吊り用 TB (中央側) の TB2 及び TB3 に作用する荷重は 5.97kN (引張)、吊り用 TB (アーチ側) の TB5 及び TB6 に作用する荷重は 7.04kN (引張) と計算された。



(a) 側面図における投影角



(b) 正面図における投影角

図 3-3 吊り用ターンバックルの吊り角度 α 、 β 、 γ

(2) 方向安定用ターンバックルに作用する荷重

方向安定用ターンバックルにはジェットファン運転時の推力に起因する荷重が作用する。

$$P = V^2 \times A = V^2 \times \frac{\pi \times D^2}{4} \quad (3.3)$$

ここに、 ρ : 空気密度 1.2 kg/m³

V : 風量 35 m/s

D : ジェットファンの外径 1.65m

これらを式 (3.3) に代入することで、 $P=1.2 \times 35^2 \times 2.14=3.15$ kN

方向安定用ターンバックルは、水平方向との角度 $\delta=39^\circ$ で設置されるため、

$$TB_{1,4} = P \times \frac{1}{\cos\delta} = 3.15 \times 1 / \cos 39^\circ = 4.05 \text{ kN}$$

方向安定用ターンバックル TB1 及び TB4 に作用する荷重は 4.05kN (圧縮または引張) と計算された。

3.3.3 現地計測結果

(1) ジェットファン据付け時の発生軸力

6本のターンバックル TB1～TB6 について、無負荷の状態からジェットファンを据え付けた際の軸力変動の計測値を図 3-4 に示す。同図には、前節で計算した作用荷重の計算値を併記した。吊り用ターンバックル (中央側) の TB2 及び TB3 では、計測値が計算値を下回り、TB2 で 17%、TB3 で 27% 小さかった。これに対し、吊り用ターンバックル (アーチ側) では、計測値が計算値を上回り、TB5 で 52%、TB6 で 35% 大きかった。また、吊り用ターンバックルに比較するとわずかではあるものの、方向安定用ターンバックルでも TB1 で 0.38kN、TB4 で 0.39kN の引張軸力が計測された。

以上、ジェットファン据付け時のターンバックルの軸力計測の結果、最大で 5 割程度、計算値と計測

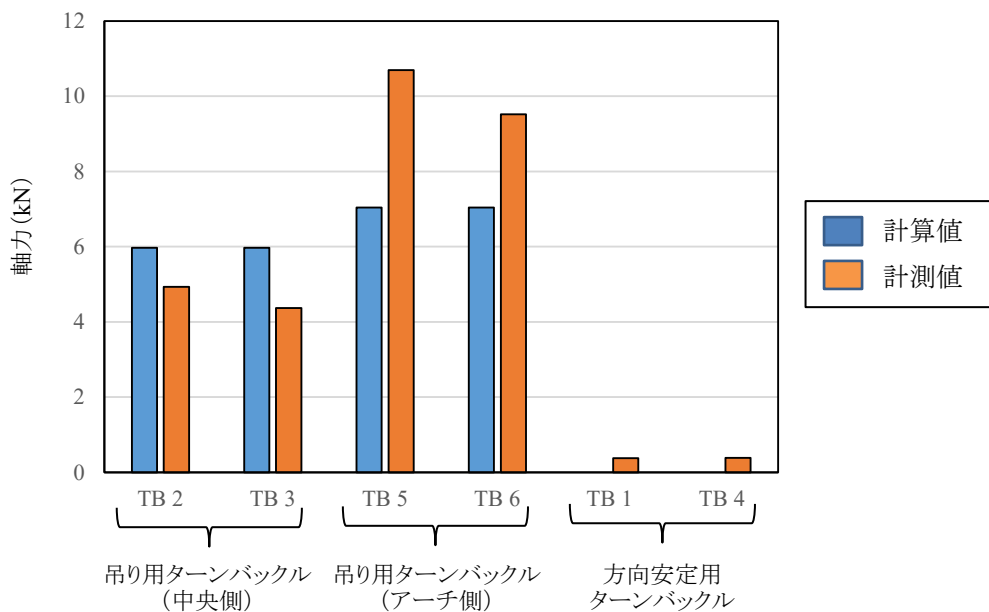


図 3-4 ジェットファンの据付けによるターンバックルの発生軸力

※) 軸力の表記は+ : 引張、- : 圧縮

値の乖離が認められた。前節で示したように、設計時、道路トンネル技術基準（換気編）・同解説^{3.1)}に則り、ジェットファンの本体重量の15倍となる作用荷重が想定されており、また、各取付部材も作用荷重に対して余裕のある部材が選定される。これより、5割程度の乖離に対しても一定程度の安全性は確保されていると言える。このような現地計測の事例は少なく、更なるデータの蓄積も必要と考えられる。なお、乖離の要因は、ジェットファンが不静定構造であり、トンネルの覆工の形状や取付部材の設置時のわずかな施工誤差等に起因するものと考えられる。ジェットファンの取付部材の設計や現地での設置工事等は、本計測結果にも留意し、実施される必要があると言える。

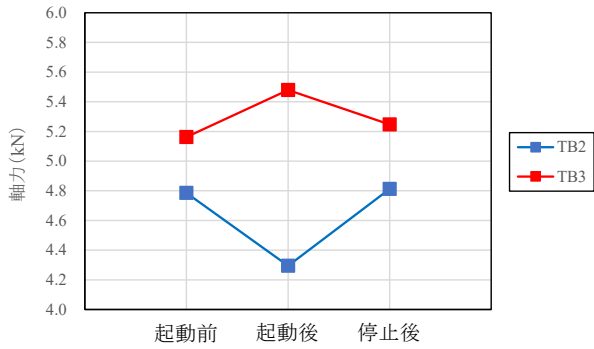
(2) ジェットファンの起動・停止時の軸力変動

6本のターンバックルTB1～TB6について、ジェットファンの起動（正転及び逆転）・停止時の軸力変動の計測値を図3-5及び図3-6に示す。ここで、正転とは起点から終点に向かっての送風で、逆転とは終点から起点に向かっての送風である。送風を停止することで、起動前とほぼ同じ軸力となることが確認された。図3-5及び図3-6をもとに、起動時と停止時の軸力の差から軸力変動を算出した結果を図3-7に示す。さらに図3-8において、軸力変動の大小を矢印の大きさにより模式的に表した。

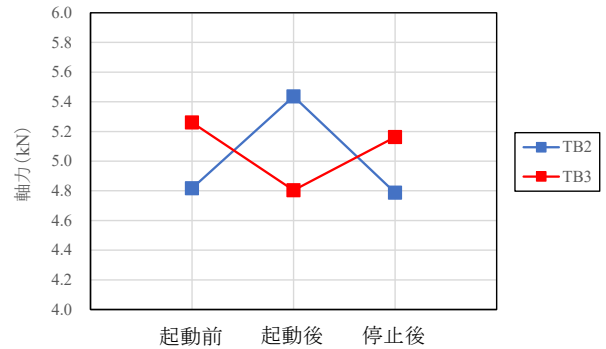
図3-7及び図3-8より、正転起動時、TB3、TB4、TB5で軸力が増加し、TB1、TB2、TB6で軸力が減少した。正転時、起点から終点に向かって風が流れることで、ジェットファンはその反力により起点側に変位する。終点側に取り付けられたTB3、TB4、TB5は一定の角度で回転しながら引っ張られ、起点側に取り付けられたTB1、TB2、TB6は縮んだと考えられる。軸力の変動はこの変形モードと整合すると言える。反対に、逆転起動時はTB1、TB2、TB6で軸力が増加し、TB3、TB4、TB5で軸力が減少した。ジェットファンは正転起動時と反対の終点側へと変位するため、妥当な結果であると言える。

ジェットファン起動・停止時の軸力変動の最大値としては、逆転起動時に吊り用ターンバックルのTB2で生じた軸力増加0.619kN（引張、4.817kNから5.437kN）が最も大きかった。方向安定用ターンバックルに作用する荷重は、3.3.2において4.05kNと計算されたが、実際に計測された軸力の変動の最大値はTB1の0.6kN（圧縮）であり、計算値よりも十分に小さかった。これは、計算上は、ジェットファンの起動時、推力の発生方向と方向安定用ターンバックルの伸縮の方向が一致するものと仮定したのに対し、実際はいずれのターンバックルとも一定の角度で回転し、また吊り用ターンバックルも推力に抵抗するため、これらの条件の差異に起因するものと考えられる。

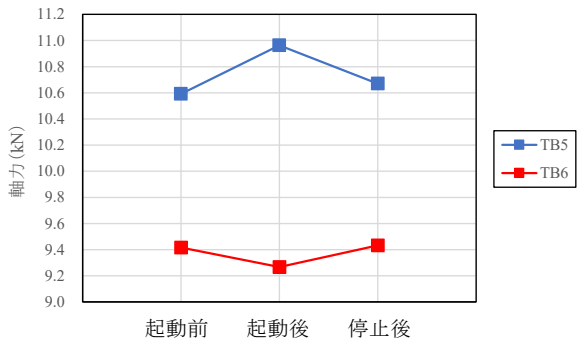
前節で示したジェットファンの据付けによる発生軸力が最大で10.7kN（引張）であったことを考慮すると、ジェットファンの運転に伴う軸力変動は最大でも0.6kN程度（引張・圧縮）と十分に小さいことが確認された。



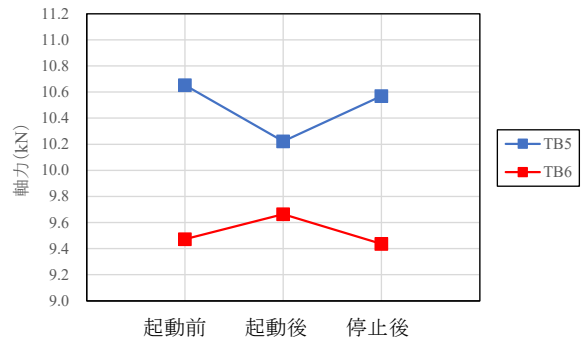
(a) 吊り用ターンバックル(中央側)



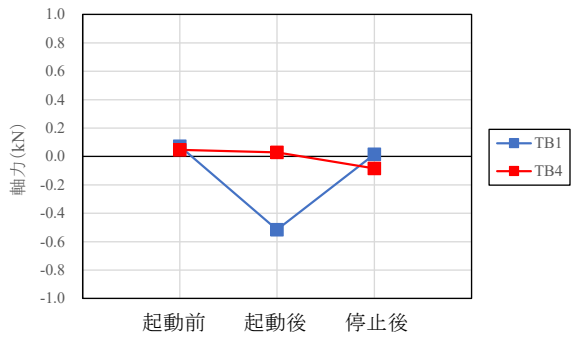
(a) 吊り用ターンバックル(中央側)



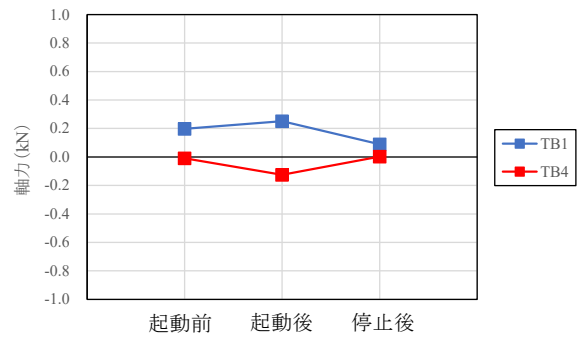
(b) 吊り用ターンバックル(アーチ側)



(b) 吊り用ターンバックル(アーチ側)



(c) 方向安定用ターンバックル



(c) 方向安定用ターンバックル

図 3-5 ジェットファンの起動(正転)・停止時のターンバックルの軸力変動

図 3-6 ジェットファンの起動(逆転)・停止時のターンバックルの軸力変動

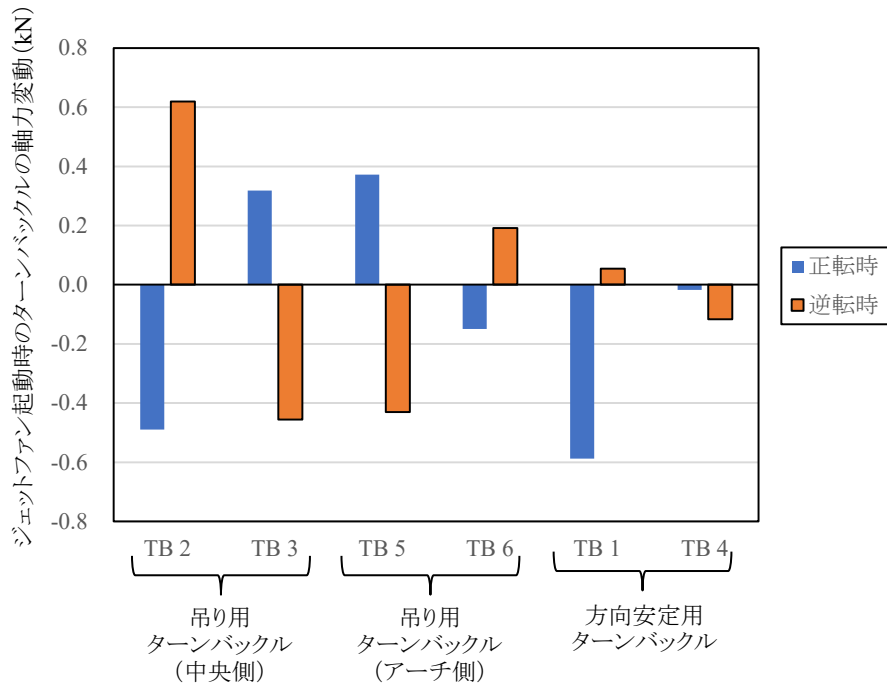


図 3-7 ジェットファン起動時のターンバックルの軸力変動

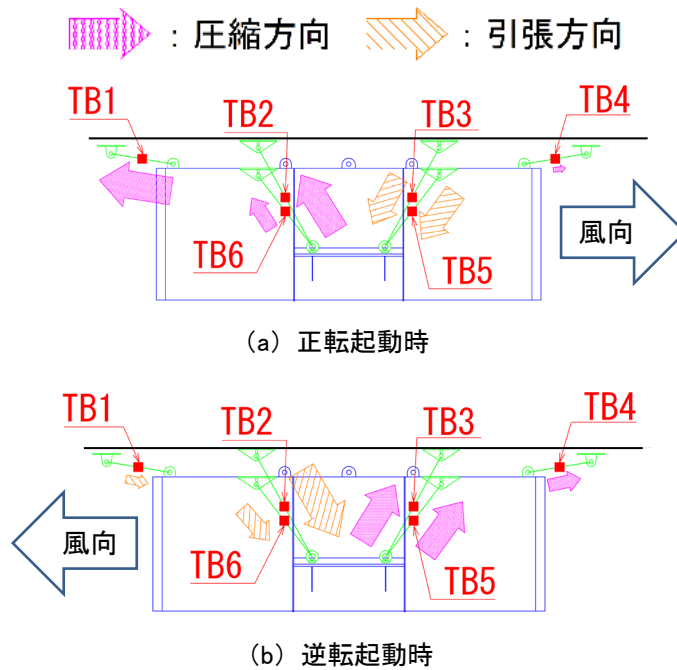


図 3-8 ジェットファン起動時の風向とターンバックルの軸力変動

(3) 大型車両通行時の軸力変動

トンネルの供用前に大型車両（除雪車）を通行させ、車両通行による軸力変動を計測した。車両重量は約20t、通行速度は30~40km/h程度で、上り線（ジェットファン設置側）と下り線を一度ずつ走行した。車両の通行状況を写真3-3に、軸力変動が顕著に認められた方向安定用ターンバックル（TB1及びTB4）の計測結果を図3-9に示す。図中の破線は、車両がジェットファンの近傍を通過した際のおおよその時刻を示している。同図より、車両通行時には両ターンバックルにおいて、最大で0.1kN程度（圧縮）の軸力が発生していることが分かった。変動量は、前節で示したジェットファン起動時の推力の影響と比較してもさらに小さく、ジェットファン及び取付部材の安定性に影響を及ぼすことは無いと言える。また、その他の4本の吊り用ターンバックル（TB2、TB3、TB5、TB6）では、軸力変動はほぼ認められなかった。車両通行によってトンネルの縦断方向に空気圧の変化が生じた可能性が考えられ、吊り用ターンバックルよりも方向安定用ターンバックルで、その影響がより顕著に生じたものと考えられる。



写真 3-3 重量物運搬車通行状況

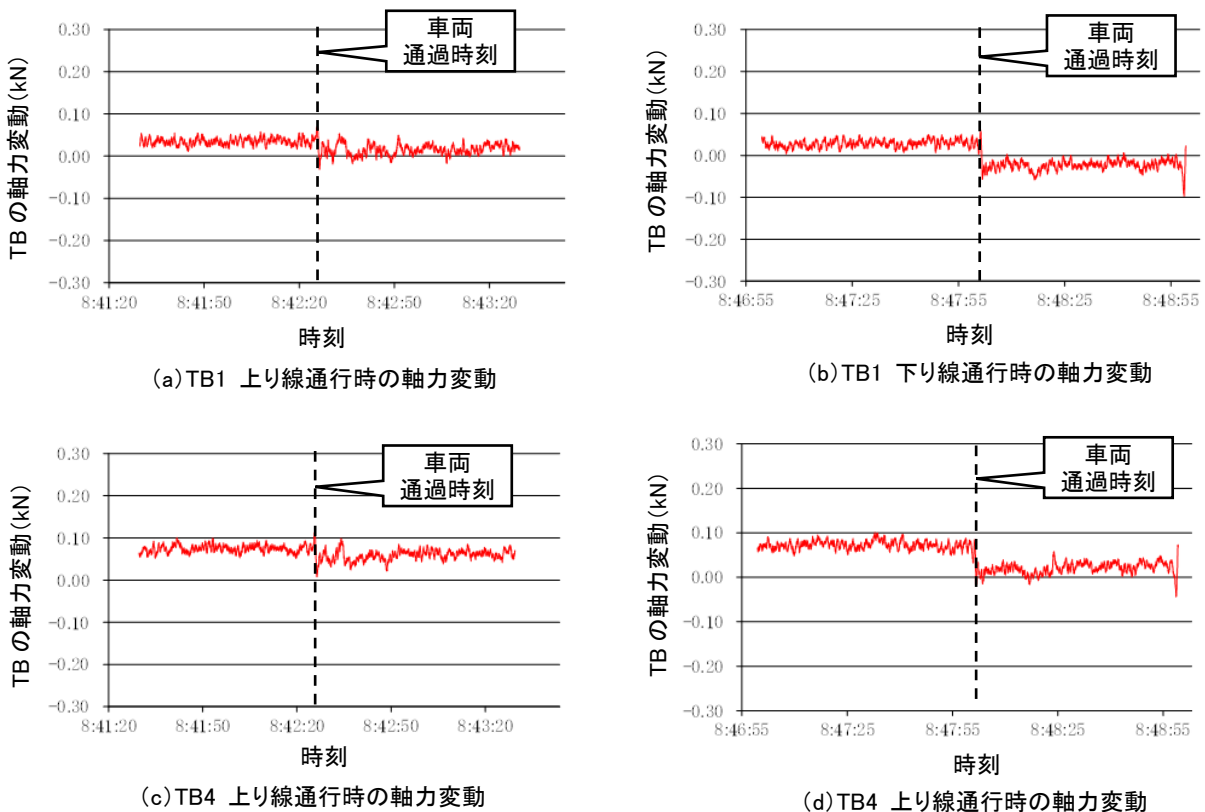


図 3-9 重量物運搬車通行時のターンバックルの軸力変動

(4) 地震時の軸力変動

平成 30 (2018) 年 9 月 6 日、北海道胆振東部地震が発生し、道内では最大震度 7 が記録され、その後も震度 3 以上の地震が頻発した。地震の発生時刻および最大震度、また対象トンネルが位置する小樽市での最大震度、最大加速度を表 3-3 に示す。震度は気象庁のデータを、加速度は防災科学技術研究所の強度観測網のデータを参照した。対象トンネル付近では、最大で震度 4 が観測され、それ以降も震度 3 以下の地震が複数回発生した。表 3-3 のうち、最大震度が示された No.1 地震発生時の各ターンバックルの軸力計測結果を図 3-10 に示す。また、震度が 2 番目に大きかった No.7 地震発生時の軸力計測結果を図 3-11 に示す。

図 3-10 より、No.1 地震発生時、6 本のターンバックルのうち、TB1 で 0.18kN、TB4 で 0.24kN と方向安定用ターンバックルで比較的大きな軸力の変動が認められた。吊り用ターンバックルでは、TB2 で地震発生に起因すると考えられる変動が見られたものの、その他のターンバックルでは有意な変動が認められなかった。次に、図 3-11 より No.7 地震発生時であるが、No.1 地震発生時に軸力変動が認められた方向安定用ターンバックル TB1 でも地震発生に伴う有意な軸力変動は認められず、いずれも計測中に発生するノイズと判別できない程度の軸力変動であったと考えられる。

以上、本計測結果から、地震発生時は、常時ジェットファン本体の荷重を支持している吊り用ターンバックルよりも、方向安定用ターンバックルでより大きな軸力変動が生じる可能性が考えられた。ただし、ここで計測された軸力変動の最大値 (0.24kN) であれば、ターンバックルの引張強度に対して十分な余裕があると言える。No.7 地震発生時に有意な軸力変動が認められなかったのは、No.1 地震に対して震度が 1 段階小さかったためと考えられた。地震動の大きさや、卓越する振動方向と振動数、吊り構造の固有振動数などとの関連を詳細に解明するためには、更なる計測データの蓄積が必要であると考えられる。

なお、平成 28 (2016) 年熊本地震では、最大震度 7 が観測され、複数のトンネルにおいて地震によ

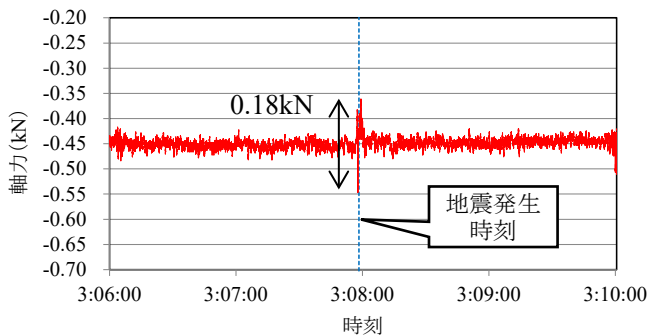
表 3-3 北海道胆振東部地震の諸元 (H30.9.6)

No.	発生時間	M	最大震度		最大加速度(gal)			
			全体	小樽	N-S	E-W	U-D	合成
1	3:07:59	M6.7	7	4	61	56	29	64
2	3:17:09	M4.7	4	2	2	4	1	5
3	3:20:10	M5.5	4	2	6	7	3	8
4	3:23:49	M4.8	4	2	3	2	1	3
5	3:32:52	M4.6	4	1	2	2	1	3
6	4:10:48	M4.7	4	1	2	2	1	3
7	6:11:30	M5.4	5弱	3	14	12	5	16
8	6:32:33	M3.9	3	1	1	2	1	2

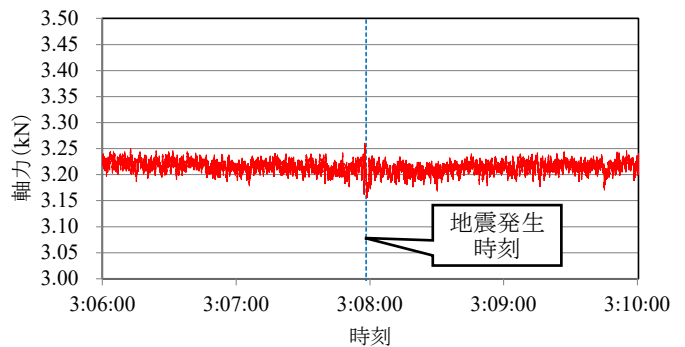
震度:気象庁の各種・資料・データを参照

加速度:防災科学研究所の強震観測網を参照

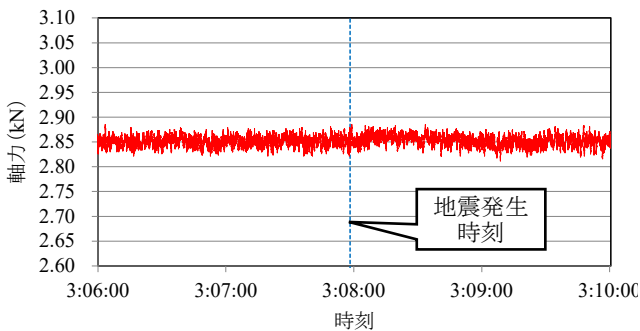
る被害が確認された。そのうち、地震で活動したとされる布田川断層に近接して位置する俵山トンネルでは、覆工の崩落を伴う大規模な被害もあった^{3.6)}。同トンネルでは、写真 3-4 に示すように、覆工全周にわたりトンネル軸方向の圧縮破壊が発生した箇所もあった。この箇所における震動特性は解明されていないが、比較的大きな揺れが発生したと推測される。そのような状況にも関わらず、同写真中のジェットファン 2 基は地震後も落下せず保持されており、アンカーボルトも近接目視や触診では異常が確認されなかった。



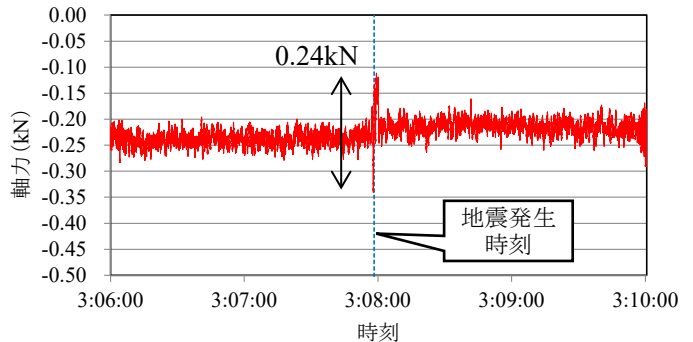
(a) TB1 (方向安定用ターンバックル)



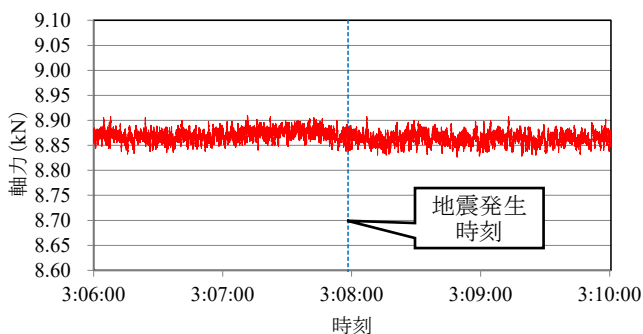
(b) TB2 (吊り用ターンバックル)



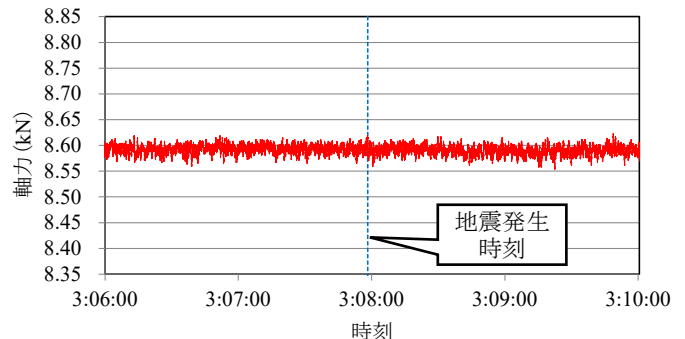
(c) TB3 (吊り用ターンバックル)



(d) TB4 (方向安定用ターンバックル)

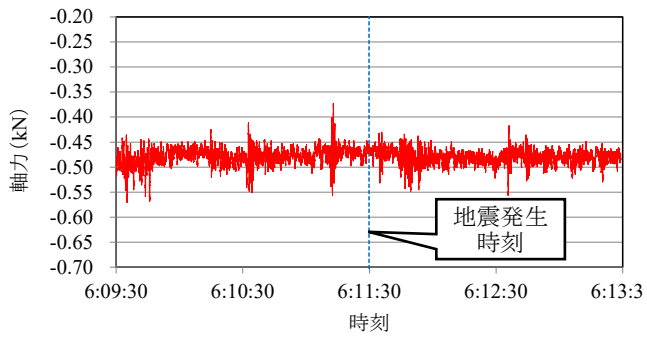


(e) TB5 (吊り用ターンバックル)

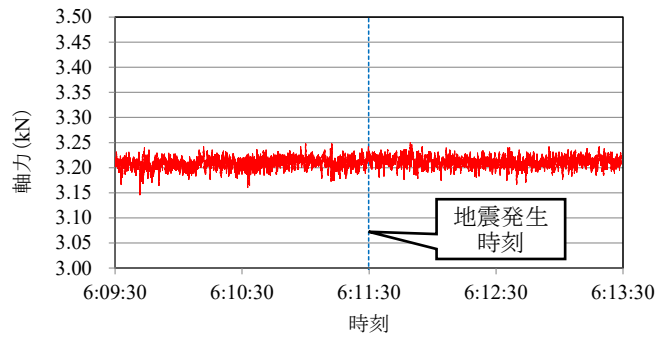


(f) TB6 (吊り用ターンバックル)

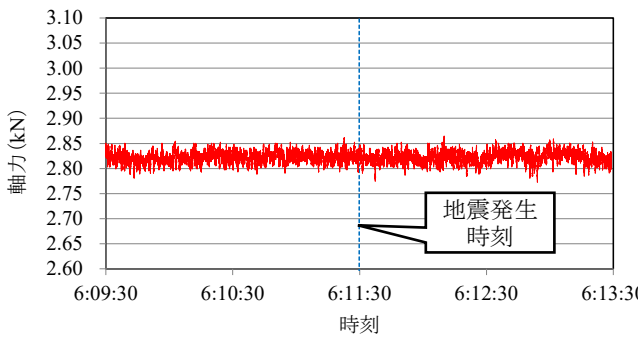
図 3-10 No.1 地震発生時の各ターンバックルの軸力変動



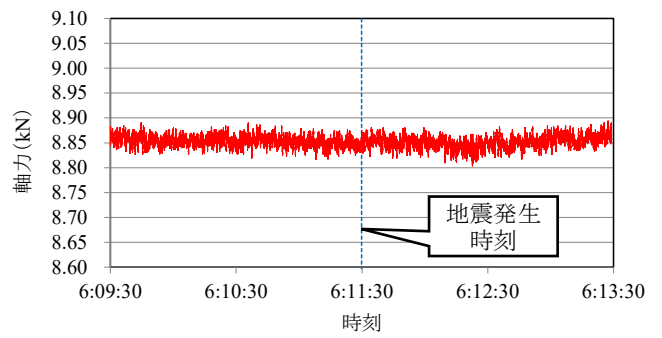
(a)TB1 (方向安定用ターンバックル)



(b)TB2 (吊り用ターンバックル)



(c)TB3 (吊り用ターンバックル)



(d)TB5 (吊り用ターンバックル)

図 3-11 No. 7 地震発生時の各ターンバックルの軸力変動

※ TB4 及び TB6: 計測データ欠損



写真 3-4 平成 28 年熊本地震により被害を受けたトンネルの例

3.4 斜め方向に引張られる吊り金具を支持するアンカーの軸力分担

3.4.1 斜め引張载荷試験の概要

3.1 で示したように、トンネル坑内のジェットファンは、一般に、複数のアンカーによって覆工に固定された吊り金具等とターンバックルを介して吊り下げられる。3.2 では、取付部材の強度計算の確認項目について概説したが、ジェットファン本体の静荷重等、アンカーに作用する荷重は、複数のアンカーで均等に分担されるものと想定されることが多い。一方、ターンバックルは、一定の吊り角度でジェットファンに接続されることも多く、斜め方向に引張荷重を受ける複数のアンカーの荷重分担の考え方を明らかにする必要があると考えられる。そこで、実大規模の吊り金具を4本のアンカーでコンクリートに固定し、吊り金具を45°の角度で引張载荷した。そして、このとき各アンカーに発生する軸力を計測する斜め引張载荷試験を行った^{3.7)}。

試験の概要を図3-12に、実施状況を写真3-5に示す。コンクリート(18-12-40-N)により直方体の試験体(縦1,200mm×横1,000mm×厚さ400mm)を作製し、吊り金具を模擬した金具(400mm×250mm)を4本の金属系あと施工アンカー(スリーブ打込み式、ボルト径M24、スリーブ長140mm)により固定した。アンカーは、内部にひずみゲージが埋め込まれたものを使用し、発生する軸力が測定できるようにした。吊り金具の固定には普通ナットとワッシャーを使用し、アンカーA、D、B、Cの順で目標トルク195Nmの120%で締付けを行った。目標トルクは実施工の実績を参考に設定し、トルク値はトルクメーターにより管理した。引張载荷の角度は45°とし、引張荷重及び各アンカーの軸力を0.1秒間隔で計測した。

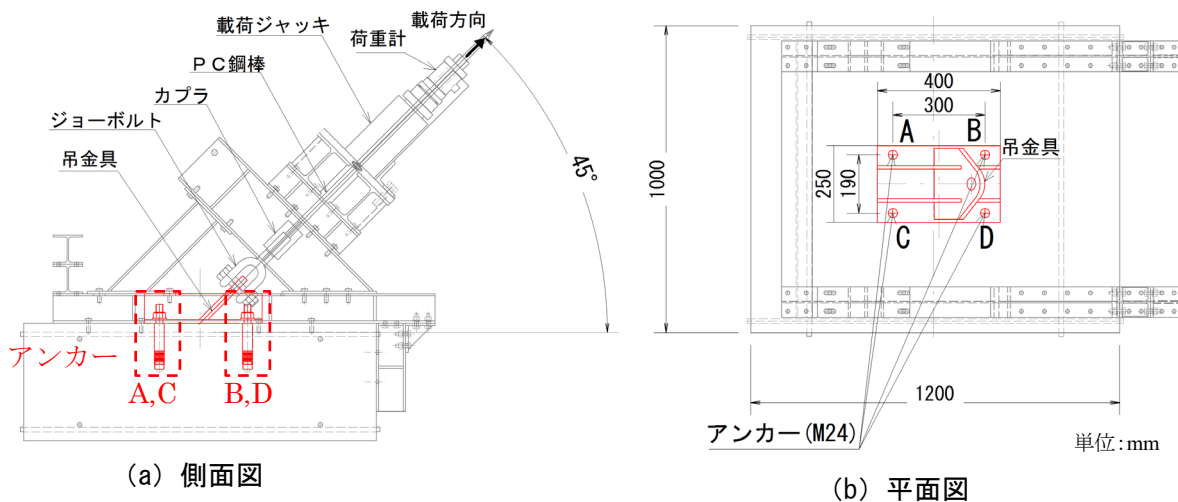
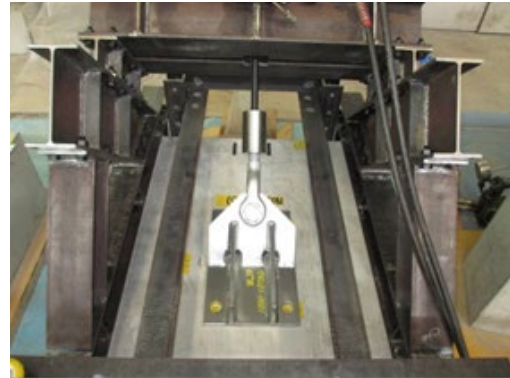


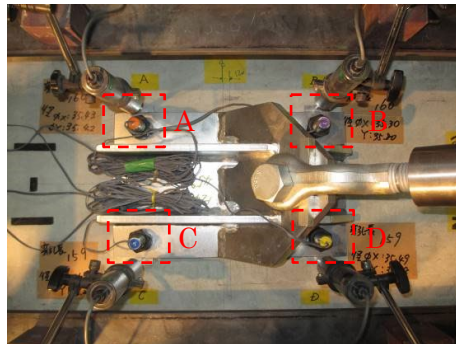
図3-12 斜め引張载荷試験の概要図



(a) 試験体の全景



(b) 吊り金具の設置状況
(アンカー打設前)



☐ : アンカー

(c) 吊り金具の設置状況
(アンカー打設後)

写真 3-5 斜め引張载荷実験の実施状況

3.4.2 実験結果

アンカーA～Dの軸力の推移を図3-13に示す。同図中では、吊り金具に作用する引張荷重を破線で記載した。図3-13より、載荷以前では、ナットの締付けによる軸力(引張)が各アンカーではほぼ均等に生じており、平均21kN程度であったことが分かる。計測開始から約60秒後に載荷が開始され、載荷荷重40kN程度(時間147秒)までは、アンカー4本の間で軸力、変位とも有意な差異は見られなかった。ジェットファンの質量は大型のもので2,300kg程度である。3.3.2で示した式(3.2)に2,000kgではなく2,300kgを代入し、斜め方向に吊り下げることによる軸力の割増しを考慮しても、その計算値は8.1kNであり、40kNを大きく下回った。以上、本実験の結果からは、吊り金具に作用する引張荷重がジェットファンの静荷重程度であれば、4本のアンカーの荷重の分担率はほぼ均等であるものと考えられた。

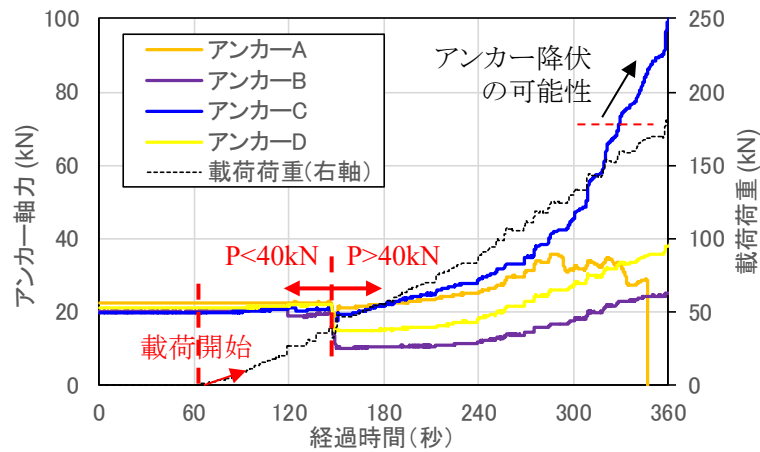


図3-13 アンカー4本の軸力(引張)及び引張載荷荷重の経時変化

3.5 吊り用ターンバックル破断時の軸力変動及びバックアップ材の設置効果に関する模型実験

3.5.1 模型実験の概要

3.1 で示したように、取付部材の破断・脱落に伴うジェットファンの落下といった不測の事態に備え、近年、バックアップ材が設置される事例が増加傾向にある。ここでは、吊り用ターンバックルの破断を模擬した模型実験を実施し、破断後、残存するターンバックルの軸力分担やジェットファン模型の安定性を把握した。また、バックアップ材の設置を想定した実験ケースでは、追加のターンバックル4本をジェットファンに接合し、破断後、バックアップ材も含めたターンバックルの軸力分担やジェットファン模型の安定性を評価した。ただし、実構造物において吊り用ターンバックルが破断する場合、破断の要因となる荷重がジェットファンに作用したり、破断に伴い残存するターンバックルに衝撃的な荷重が加わる可能性もある。これらの荷重条件は、本模型実験で想定されていない点について留意が必要である。

3.5.2 実験方法及び実験ケース

ジェットファン模型（外径 216.3 mm、長さ 600 mm、厚さ 4.5 mm）は主として鋼管からなり、実際のジェットファンと同様の重量バランスとなるよう中心部の約 200 mm 区間はモルタルで中詰めしたところ、総質量は 28.3 kg となった。ジェットファン模型の概要を図 3-14 に示す。この模型の 4 ヶ所に金具を溶接し、4 本の吊り用ターンバックル（A1、B1、C1、D1）により吊り下げた（写真 3-6）。また、バックアップ材の設置を模擬した実験では、追加のターンバックル 4 本（A2、B2、C2、D2）を設置し、設置時、たるみを持たせて接続したケースと、たるみを持たせずに接続したケースとを実施した（写真 3-7）。いずれのターンバックルにも軸力計が接続されており、これらの位置関係及び吊り角度 α_1 、 α_2 、 β_1 、 β_2 を図 3-15 に示す。バックアップ材の有無、バックアップ材設置時のたるみの有無、ターンバックルの吊り角度をパラメータとして多数の実験を行った。本資料では、表 3-4 に記載した代表的な実験ケースの結果を次節で示す。

模型実験では、4 本の吊り用ターンバックルで同程度の軸力が発生するよう、はじめにターンバックルの接続の微調整を行った。なお、シリーズ 3 では、バックアップ材となるターンバックルの軸力が、吊り用ターンバックルの軸力の概ね 10%となるように調整した。その後、吊り用ターンバックルのうち 1 本目として A1 を切断し、2 本目として B1～D1 のいずれかを切断した。なお、ターンバックルはシャックルピンによりジェットファン模型に接続されており、ピンを引き抜くことでターンバックルの破断を模擬した（写真 3-8）。破断後、残存するターンバックルに発生する軸力の収束値を計測し、ジェットファン模型が大きく傾くか否か等の挙動を評価した。

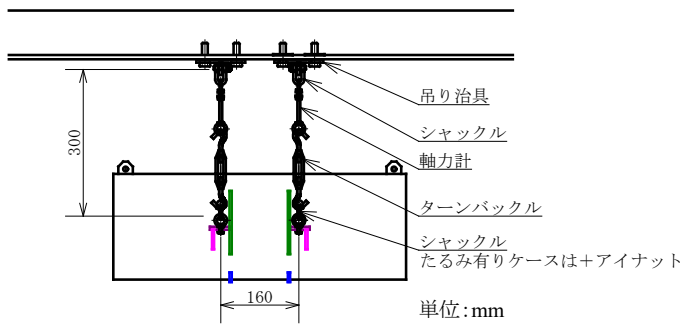


図 3-14 ジェットファン模型の概要

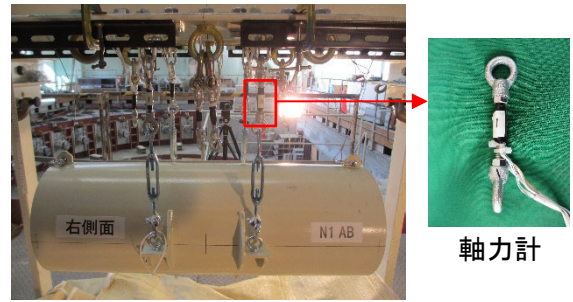


写真 3-6 ジェットファン模型
(バックアップ材：無し)

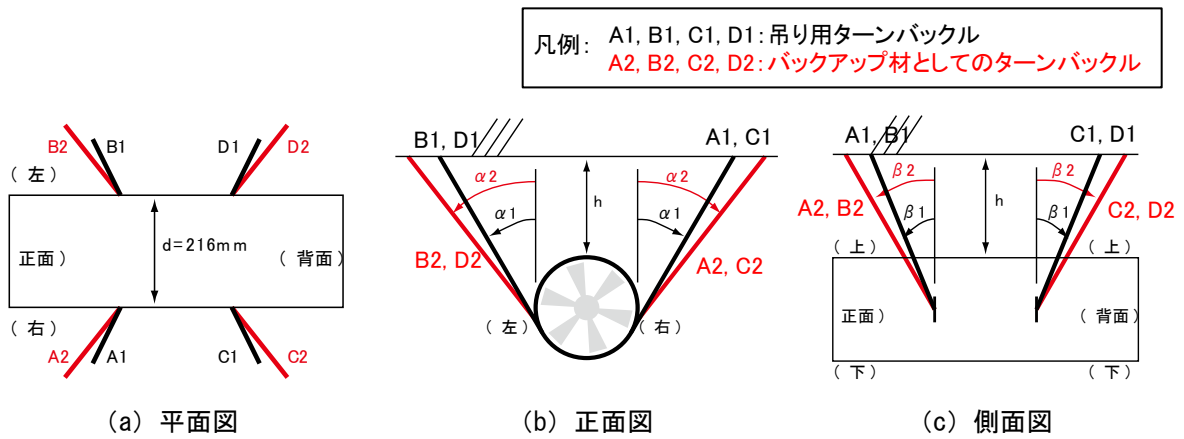
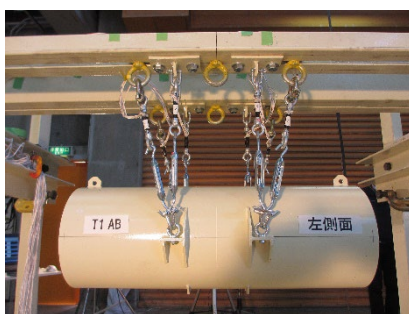


図 3-15 ターンバックルの配置及び吊り角度



(a) たるみ：無し



(b) たるみ：有り

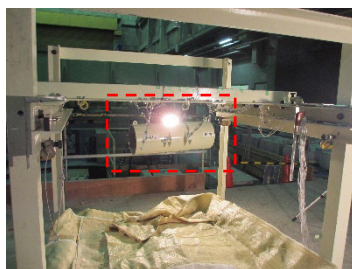
写真 3-7 ジェットファン模型
(バックアップ材：有り)

表 3-4 ジェットファン吊り用ターンバックル破断実験の実験ケース

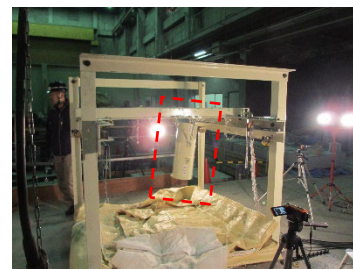
シリーズ	ケース名	バックアップ材の有無	吊角度				ターンバックルの切断順序	
			吊り用ターンバックル		バックアップ材			
			$\alpha 1$ (deg)	$\beta 1$ (deg)	$\alpha 2$ (deg)	$\beta 2$ (deg)	1 本目	2 本目
1	1-AB	無し	0	0	-	-	A	B
	1-AC							C
	1-AD							D
2	2-AB	無し	30	30	-	-	A	B
	2-AC							C
	2-AD							D
3	3-AB	有り (たるみ無し)	0	0	0	13.5	A	B
	3-AC							C
	3-AD							D
4	4-AB	有り (たるみ有り)	0	0	0	13.5	A	B
	4-AC							C
	4-AD							D



(a) シャックルピンの引抜き状況
(ターンバックルの破断を模擬)



(b) 1 本目切断後状況
ジェットファン模型：
大きな傾き無し



(c) 2 本目切断後状況
ジェットファン模型：
大きく傾いた

写真 3-8 模型実験の実施状況

3.5.3 実験結果

(1) 初期状態における軸力分担

全シリーズの初期状態における軸力計測結果を図 3-16 に示す。吊り角度を 30°としたシリーズ 2 では、他のシリーズに比較して大きな軸力が生じていた。また、バックアップ材をたのみ無く設置したシリーズ 3 では、バックアップ材でわずかな軸力が生じている。いずれのシリーズでも、若干のばらつきはあるものの、4 本の吊り用ターンバックルで概ね均等に軸力が発生している状況が確認された。

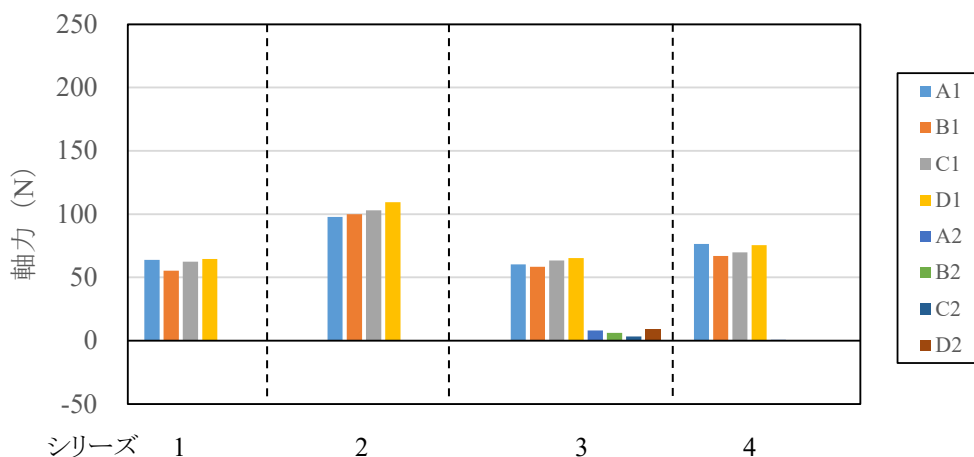


図 3-16 初期状態における各ターンバックルの軸力分担

(2) ターンバックル 1 本目切断後の軸力分担とジェットファン模型の挙動

ターンバックル 1 本目 (A1) 切断後の軸力の収束値を図 3-17 に示す。いずれのケースでも、切断されたターンバックル A1 の軸力とその対角線上に位置する D1 の軸力はほぼゼロとなり、バックアップ材の有無に関わらず、残存する吊り用ターンバックル B1 と C1 とでジェットファンの荷重がほぼ均等に分担された。また、この時点でジェットファン模型が大きく傾くことは無かった。

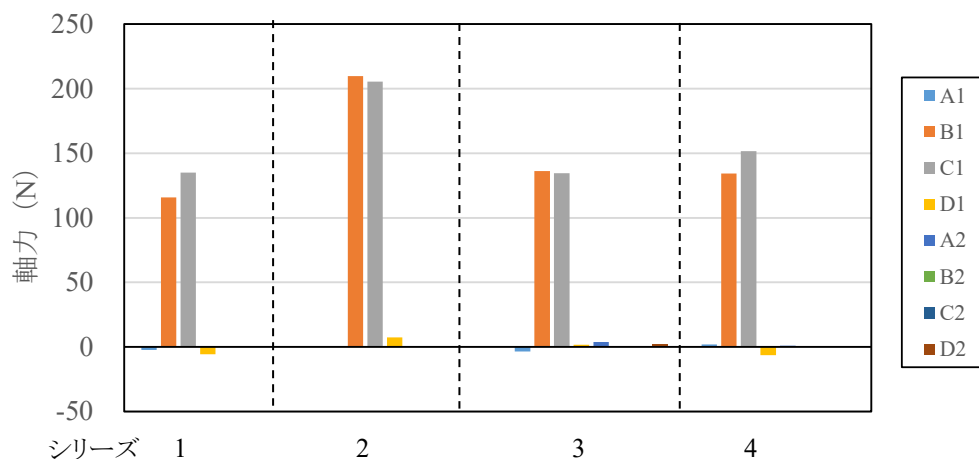
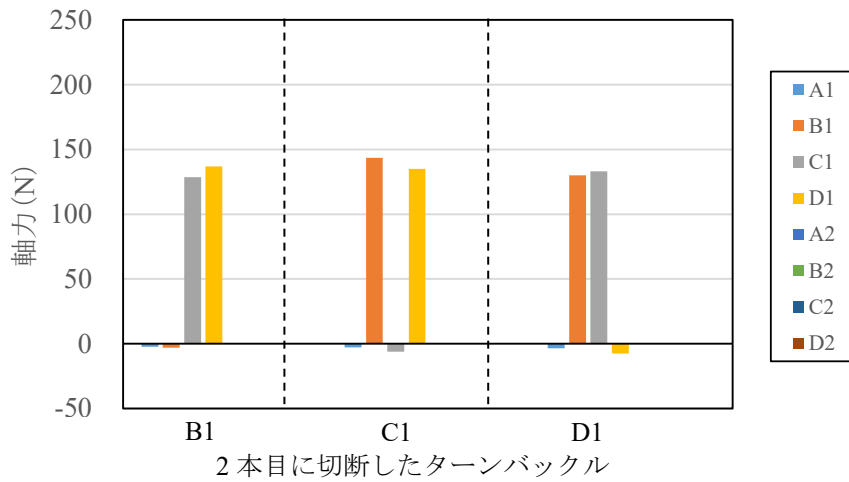


図 3-17 ターンバックル 1 本目切断後における各ターンバックルの軸力分担

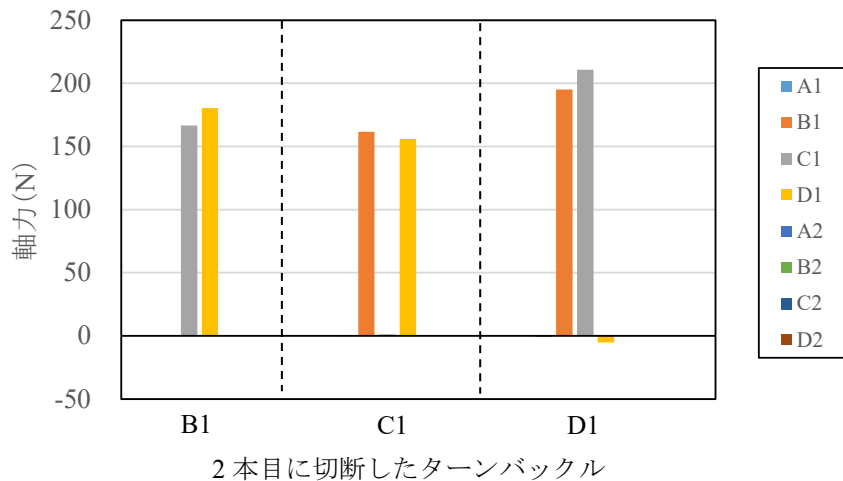
(3) ターンバックル 2 本目切断後の軸力分担とジェットファン模型の挙動

ターンバックル 2 本目切断後の軸力の収束値を図 3-18 及び図 3-19 に示す。まず、シリーズ 1 及び 2 であるが、2 本目でターンバックル D1 を切断するケースでは、ジェットファン模型が大きく傾くことは無く、軸力分担も 1 本目切断時からほぼ変化無かった。一方、2 本目でターンバックル B1 または C1 を切断するケースでは、ジェットファン模型が大きく傾き、残存する 2 本のターンバックルでジェットファン模型の荷重を二分する結果となった。

次に、バックアップ材を設置したシリーズ 3 及び 4 であるが、こちらでも 2 本目でターンバックル D1 を切断するケースでは、ジェットファン模型が大きく傾くことは無く、軸力分担も 1 本目切断時からほぼ変化無かった。2 本目でターンバックル B1 を切断するケースでは、シリーズ 3 (たるみ無し) の場合、残存するターンバックル 6 本全てで軸力が発生し、特に、破断したターンバックル A1 及び B1 のバツ



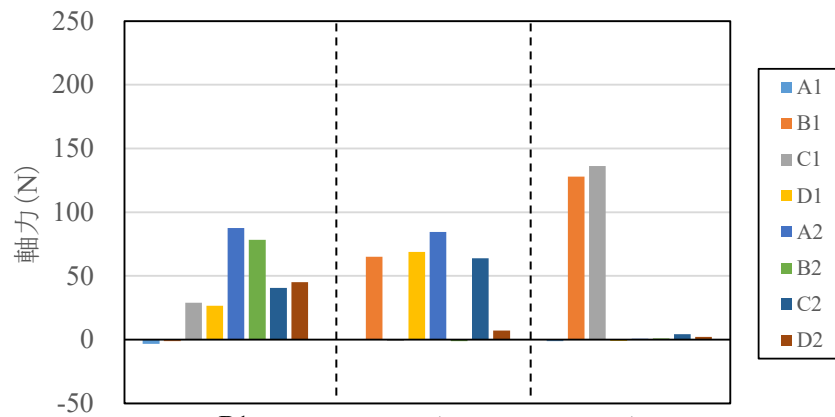
(a) シリーズ 1 (吊り角度 : 0°)



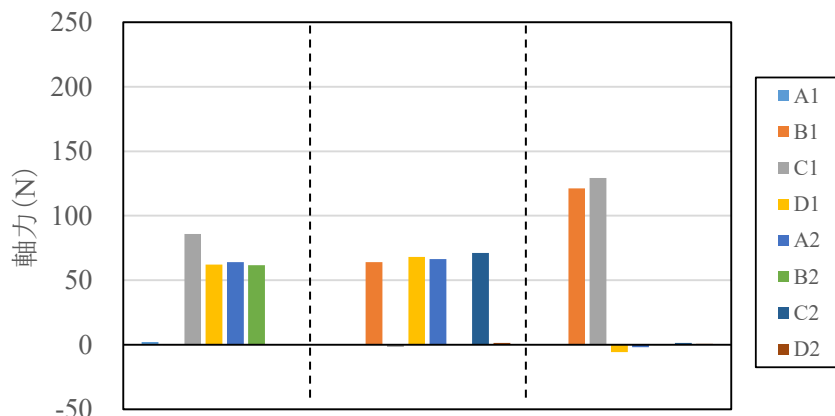
(b) シリーズ 2 (吊り角度 : 30°)

図 3-18 ターンバックル 2 本目切断後における各ターンバックルの軸力分担 (バックアップ材 : 無し)

クアップ材である A2 及び B2 で大きな軸力が発生した。一方、シリーズ 4（たるみ有り）では、バックアップ材の C2 及び D2 では軸力が発生しないという差異が見られた。2 本目でターンバックル C1 を切断するケースでは、シリーズ 3 と 4 で大差なく、ターンバックル B1、D1、A2、C2 でほぼ均等に軸力が発生した。以上、バックアップ材を設置したケースでは、いずれも 2 本のターンバックルの破断により、ジェットファン模型が大きく傾くことはなく、バックアップ材設置による効果が確認された。



2 本目に切断したターンバックル
(a) シリーズ 3 (たるみ: 無し)



2 本目に切断したターンバックル
(b) シリーズ 4 (たるみ: 有り)

図 3-19 ターンバックル 2 本目切断後における各ターンバックルの軸力分担
(バックアップ材: 有り)

3.6 道路トンネル用ジェットファンの取付構造及び現地計測等による作用荷重の実態に関するまとめ

本章では道路トンネル用ジェットファンの取付構造を概説するとともに、トンネル現場での現地計測や模型実験を行い、各取付部材に作用する荷重の実態を調査した。その結果を以下に整理する。

(1) ジェットファン（重量：約 20kN）を支持する取付部材への作用荷重を把握するため、6本のターンバックルにひずみゲージを設置し、発生する軸力の計測を行った。

(a) ジェットファンの据付け時、計測された発生軸力は、ジェットファン本体の静荷重及び吊り角度から計算される想定軸力と比較し、最大で 5 割程度の乖離が認められた。設計時、道路トンネル技術基準（換気編）・同解説に則り、ジェットファンの本体荷重の 15 倍となる作用荷重が想定されており、また、各取付部材も作用荷重に対して余裕のある部材が選定される。これらより、5 割程度の乖離に対しても一定程度の安全性は確保されていると言える。乖離の要因は、ジェットファンが不静定構造であり、トンネルの覆工の形状や取付部材の設置時のわずかな施工誤差等に起因するものと考えられる。ジェットファンの取付部材の設計や現地での設置工事等は、本計測結果にも留意し、実施される必要があると言える。

(b) ジェットファンの起動に伴うターンバックルの軸力変動は、最大で 0.6kN 程度であり、ジェットファン本体の静荷重による常時の引張力に対し、十分に小さいものと把握された。

(c) 大型車両の通行に伴うターンバックルの軸力変動は、最大で 0.1kN 程度であり、ジェットファン本体の静荷重による常時の引張力に対し、十分に小さいものと把握された。

(d) 対象トンネル付近で震度 4 が観測された地震に伴うターンバックルの軸力変動は、最大で 0.24kN 程度であり、ジェットファン本体の静荷重による常時の引張力に対し、十分に小さいものと把握された。

(2) 吊り金具を斜め方向に引張り、4本のアンカーで発生した軸力を測定する載荷試験を実施した。引張荷重 40kN 以下、つまり、実際のトンネルでジェットファンを支持するターンバックルを想定した場合、4本のアンカーの荷重の分担率はほぼ均等であることが確認された。

(3) ジェットファン及び取付部材を模擬した小型の模型を作製し、取付部材の破断時の軸力変動を計測する模型実験を実施した。

(a) ジェットファンを支持する 4本の吊り用ターンバックルのうち、1本が切断された場合、残存する 3本のターンバックルのうち主として対角線上に残った 2本のターンバックルがジェットファンを支持し、ジェットファンが大きく傾くことはなかった。

(b) 2本のターンバックルが切断されても、対角線上の 2本のターンバックルでジェットファ

- ンが支持されている場合は、バックアップ材には軸力が発生しない傾向が認められた。
- (c) バックアップ材の設置方法、すなわちバックアップ材にたるみを持たせるか否か等によって、メインのターンバックルの切断後、バックアップ材が負担する軸力の割合が変化した。
- (d) バックアップ材の設置により、メインのターンバックルが1～2本切断された場合、バックアップ材への荷重の受け替えにより、ジェットファンが大きく傾くことが阻止された。

参考文献

- 3.1) 日本道路協会：道路トンネル技術基準（換気編）・同解説 平成20年改訂版、pp.117～144、2008.10
- 3.2) 国土交通省総合政策局公共事業企画調整課：機械工事共通仕様書（案）、pp.226～228、2021.3
- 3.3) 東日本高速道路(株)・中日本高速道路(株)・西日本高速道路(株)：機械電気通信設備標準設計図集 令和4年7月、Q トンネル換気設備、2022.7
- 3.4) 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・維持管理指針（案）、pp.44～47、コンクリートライブラリー160、2022.1
- 3.5) 原翔平・日下敦・小出孝明・砂金伸治：トンネル換気用ジェットファン吊金具の軸力計測に関する一考察、トンネル工学報告集、Vol.28、I-51、pp.1～6、2018.11
- 3.6) 国立研究開発法人土木研究所：山岳トンネルの地震時挙動と耐震対策に関する研究報告書、土木研究所資料 第4358号、pp.3-3～3-37、2017.3
- 3.7) 日下敦・小出孝明・砂金伸治・原翔平：トンネル内ジェットファンの吊金具を用いた金属系あと施工アンカーの引抜き載荷実験、土木学会第73回年次学術講演会概要集、Ⅲ-583、pp.1165～1166、2018.8

4. アンカーの基本的な耐荷力特性の確認

4.1 金属系あと施工アンカー

4.1.1 耐荷力特性の一般的な評価方法

母材コンクリートに設置したあと施工アンカーの耐荷力特性（最大引張荷重等）を評価する試験方法として、日本建築あと施工アンカー協会が示している引張試験がある^{4.1)}。この試験方法は、金属系アンカーと接着系アンカー、その他のアンカー類を対象としている。また、試験条件として、アンカーに加える引張応力の平均増加率は $2\text{kgf/mm}^2 \cdot \text{s}$ 以下 ($19.6\text{N/mm}^2 \cdot \text{s}$ 以下)、載荷装置の反力台間隔（支点間隔）は、表 4-1 に示す最小値が示されている。

表 4-1 引張試験における支点間隔の最小値（母材が普通コンクリートの場合）

アンカーの破壊形式	金属系アンカー	接着系アンカー
コーン状破壊する場合	3.5 <i>l</i>	2.0 <i>l</i>
コーン状破壊しない場合	2.0 <i>l</i>	1.5 <i>l</i>

(*l* : 埋込み長さ)

4.1.2 載荷装置の適切な支点間隔

道路トンネル用ジェットファンの取付けで使用される金属拡張アンカーで、コーン状破壊を想定する場合は、表 4-1 に示すように支点間隔は3.5*l*以上 (*l* : 埋込み長さ) とすることで、試験結果に影響を及ぼさないようにできると考えられている^{4.1)}。この点について確認するために、載荷装置の支点間隔を種々変化させた試験を行った。

(1) 試験方法

表 4-2 に示す配合、性状のレディーミクストコンクリートを母材コンクリートに用いて、厚さ 300mm の試験体を作製した。試験体は、材齢 7 日まで湿潤養生し、その後材齢 28 日まで試験室内に静置した。材齢 28 日以降に表 4-3 に示す条件で金属拡張アンカー（アンカーボルトのねじの呼び M16、全長 160mm、外径 21.7mm、ステンレス製のスリーブ打込み式アンカー）を設置し、引張試験を行った。載荷速度は約 3kN/s（M16 のアンカーボルトの場合、約 $14.9\text{N/mm}^2 \cdot \text{s}$ ）とした。試験ケースを表 4-3 に示す。なお、本研究では、載荷装置脚部と試験体の間に、支点間隔に等しい直径の円形孔を有する反力板（鋼板、厚さ 19mm）を試験体表面に設置することで、支点間隔を調整した。引張試験の状況を写真 4-1 に示す。

表 4-2 母材コンクリートの配合、フレッシュ性状、圧縮強度

水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m ³)					スランブ (cm)	空気量 (%)	引張試験時圧縮強度 (N/mm ²)
		水	普通ポルトランドセメント	細骨材	粗骨材	混和剤			
57.0	43.8	159	279	810	1068	3.0	6.5	4.0	33.8

表 4-3 支点間隔を変えた引張試験の検討ケースとアンカー設置条件

支点間隔 (mm)	アンカー設置条件				試験数
	穿孔径 (mm)	埋込み長さ l (mm)	へりあき寸法 (mm)	アンカーピッチ (mm)	
30 (0.5 l)	22	60	350	550	2
120 (2 l)	22	60	350	550	4
240 (4 l)	22	60	415	690	4
300 (5 l)	22	60	415	690	4
360 (6 l)	22	60	415	690	4

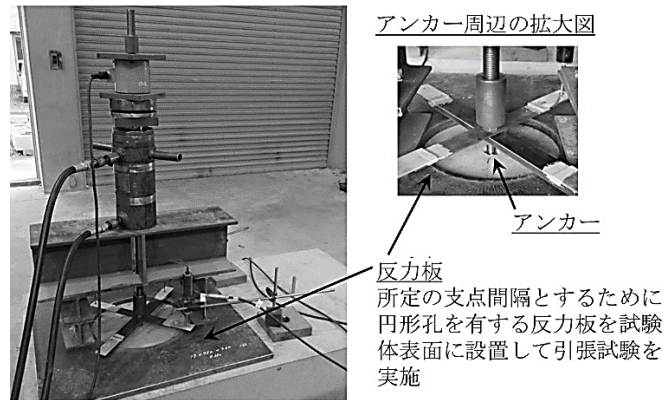


写真 4-1 引張試験の状況 (荷重の測定)

(2) 試験結果

引張試験時の支点間隔を変化させた場合の、最大引張荷重の関係を図 4-1 に示す。

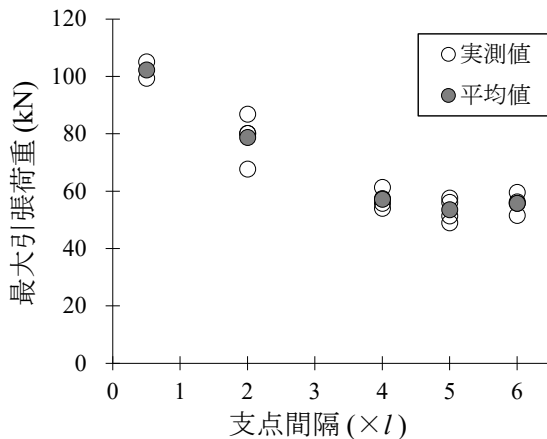


図 4-1 支点間隔と最大引張荷重の関係

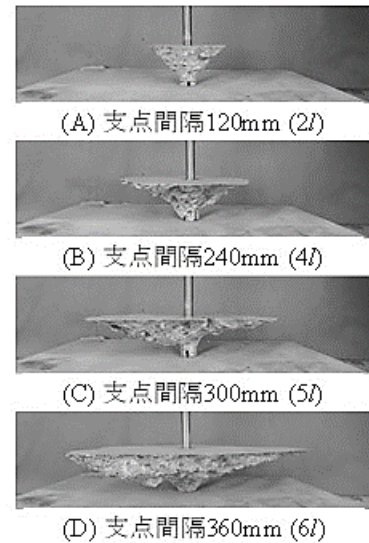


写真 4-2 各支点間隔のコーン状破壊の例

図 4-1 より、支点間隔を埋込み長さ l の 0.5~4 倍にすると、最大引張荷重は支点間隔を大きくするほど低下した。しかし、支点間隔が l の 4~6 倍の範囲では、最大引張荷重は支点間隔の違いによらず同程度となった。

破壊モードは、支点間隔が l の 0.5 倍の場合は鋼材降伏、支点間隔が l の 2~6 倍の場合は写真 4-2 示すような母材コンクリートのコーン状破壊となった。写真 4-2 より、コーン状破壊部の形状は、支点間隔を大きくするほど上面の寸法が大きくなった。支点間隔（反力板の孔の直径）を大きくすると、反力板に拘束されないコンクリートの範囲が広がるため、コーン上面の寸法が大きくなったと考えられる。しかし、支点間隔が l の 4~6 倍の範囲では最大引張荷重が同程度であったことを踏まえると、アンカー設置位置から l の 4 倍以上離れた部分のコーン状破壊部の最大引張荷重への貢献度は大きくなかったと推察される。

これらのことから、支点間隔の調整に反力板を用いた今回の試験において、スリーブ打込み式の金属拡張アンカーの引張試験結果に大きな影響を及ぼさず、コーン状破壊耐力を適切に求めるためには、支点間隔を l の 4 倍以上とする必要があると考えられる。この支点間隔の推奨値は、筆者らが過去に行った接着系アンカーの試験結果⁴²⁾から得られたものと同様であった。日本建築あと施工アンカー協会が示している引張試験の支点間隔条件は、金属系アンカーの場合 l の 3.5 倍以上(表 4-1 参照)としているが、反力板を用いた今回の試験においても l の 4 倍以上と近い結果となった。

4.1.3 固着方法の異なる金属系アンカーの耐荷挙動

あと施工アンカーは、金属系と接着系に大別される。また、金属系アンカーは、金属拡張アンカーと金属拡底アンカーがある。更に、金属拡張アンカーには、先端の形状の違いや、固着方法の違いなど、

さまざまな種類の製品が存在する。しかし、アンカーに関する国内の指針類^{4.3), 4.4)}では、固着方法の違いによる、荷重と変位の関係などの耐荷挙動の特徴などは明確に示されていない。そこで、固着方法の異なる複数種類のあと施工アンカーについて、引張試験時の耐荷挙動の特徴を確認した。

(1) 試験方法

表 4-4 に示す配合、性状のレディーミクストコンクリートを母材コンクリートに用いて、厚さ 300mm の試験体を作製した。4.1.2 の試験と同様に、試験体は材齢 7 日まで湿潤養生、その後材齢 28 日まで試験室内に静置した。

表 4-4 母材コンクリートの配合、フレッシュ性状、圧縮強度

水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m ³)					スランプ (cm)	空気量 (%)	引張試験時圧縮強度 (N/mm ²)
		水	普通ポルトランドセメント	細骨材	粗骨材	混和剤			
57.0	43.8	159	279	810	1068	2.99	7.5	3.5	33.0

写真 4-3 に示す外観の、固着方法の異なる 5 種類のアンカーを試験に使用した。アンカーの概要は表 4-5 に示すとおりである。内訳は、4 種類の金属系アンカー（3 種類の金属拡張アンカーと 1 種類の金属拡底アンカー）と 1 種類の接着系アンカー（無機系接着剤、注入式）である。金属拡張アンカーについて、(1)スリーブ打込み式はアンカーボルト先端にスリーブを打ち込んでスリーブを拡張、(2)芯棒打込み式はアンカーボルトの中心部に芯棒を打ち込むことで先端部を拡張、(3)締付け式は所定の締付けトルクで締め付けてスリーブを拡張させて孔壁に固着させるものである。また、接着系アンカーのアンカー筋は、平寸切りの全ねじボルトとし、用いた無機系接着材の引張試験時の圧縮強度は 62.0N/mm²であった。各アンカーの有効埋込み長さ l_e は、図 4-2 に示すとおりである^{4.5)}。

寸法は、アンカーボルトのねじの呼びを M12 に統一させたが、他の寸法については種類により異なっている。特に、(2)芯棒打込み式や(3)締付け式と比較し、(1)スリーブ打込み式と(4)拡底式はアンカー先端の拡張部が大きく、スリーブも含めたアンカー外径や穿孔径は大きい。

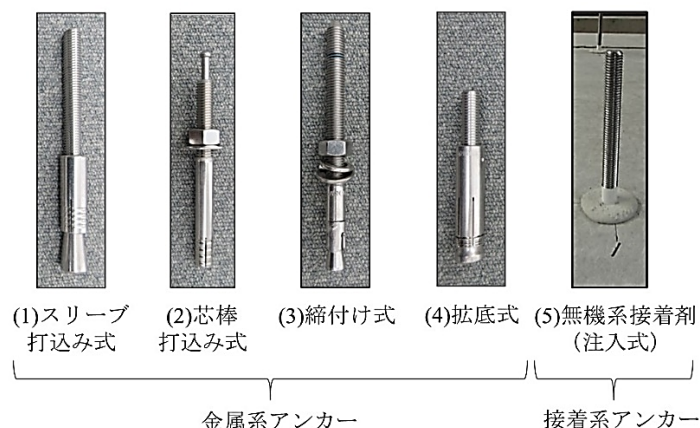


写真 4-3 試験に使用した各種あと施工アンカーの外観

表 4-5 試験に使用したあと施工アンカーの概要

あと施工アンカーの種類	固着方法等	アンカーの形状				孔の形状		施工トルク (N・m)	
		アンカーボルトのねじの呼び	外径 (mm)	埋込み長さ l (mm)	有効埋込み長さ l_e (mm)	穿孔径 (mm)	穿孔深さ (mm)		
金属系	金属拡張式	(1)スリーブ打込み式	M12	17.3	50	32.7	18.0	56	なし
		(2)芯棒打込み式	M12	12.0	60	48	12.5	75	なし
		(3)締付け式	M12	12.0	60	48	12.0	75	50
	金属拡底式	(4)拡底式	M12	17.5 (22.0*)	—	60	18.0	68	30
接着系	注入式	(5)無機系接着剤	M12 (平寸切り)	12.0	60	60	16.0	60	なし

※：拡径後の直径（試験後取り出して実測した値）

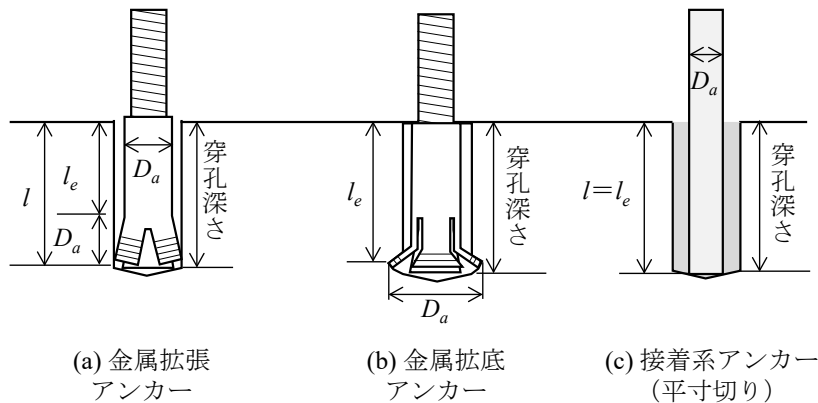


図 4-2 各種あと施工アンカーの有効埋込み長さ l_e

材齢 28 日以降に表 4-5 に示す条件で各種アンカーを設置し、引張試験を行った。直径 360mm の孔を有する反力板（鋼板、厚さ 19mm）を試験体表面に設置して、支点間隔を 360mm (l の 4 倍) とした。また、アンカーに作用する引張荷重はロードセルで測定し、変位はアンカー周囲の 4 箇所を設置した変位計で測定して平均値を求めた。引張試験の状況を写真 4-4 に示す。

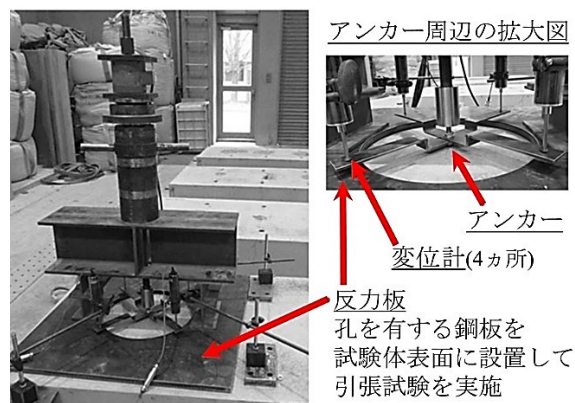
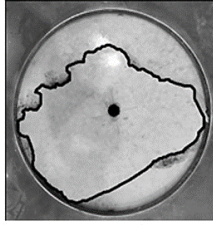
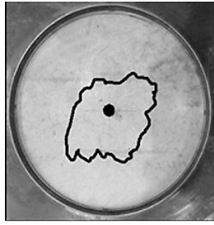
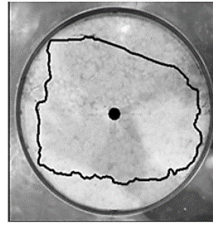
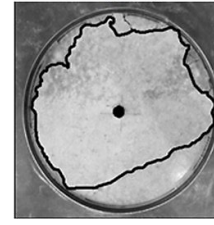
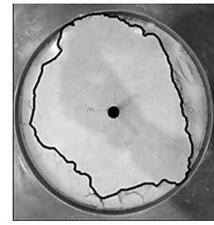


写真 4-4 引張試験の状況（荷重と変位の測定）

(2) 試験結果

引張試験によるコーン状破壊の発生状況の例を表 4-6 に示す。アンカーを中心としたコーン状破壊が発生している。

表 4-6 5 種類のアンカーのコーン状破壊の発生状況の例

金属系アンカー				接着系アンカー
(1)スリーブ打込み式	(2)芯棒打込み式	(3)締付け式	(4)拡底式	(5)無機系接着剤
				

コーン状破壊部の面積の実測値と平均値を図 4-3 に示す。アンカーボルトの径が同一 (12mm) でも、固着方法の違いによって、コーン状破壊部の面積が異なっている。特に、(2)芯棒打込み式と(3)締付け式の中にはコーン状破壊部の面積がほぼ 0 のもの、つまり引抜き破壊となったものもあった。一方、接着系アンカーは、コンクリートと接着剤の付着力や接着剤に含まれる骨材のかみ合わせなどによって固着力が得られるため、接着剤の強度や種類、アンカー筋の種類 (異形棒鋼、全ねじボルト) によっても異なると考えられる。今回用いた接着系アンカーのコーン状破壊部の面積は、(1)スリーブ打込み式や(4)拡底式と同程度であった。

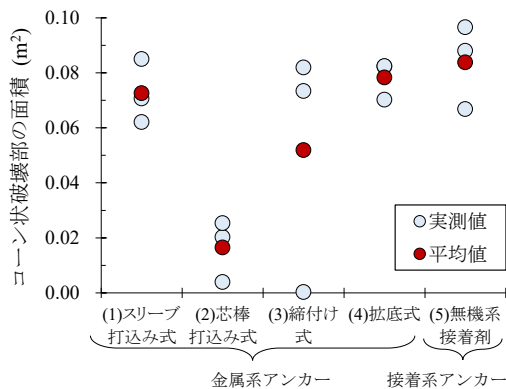


図 4-3 5 種類のアンカーのコーン状破壊部の面積

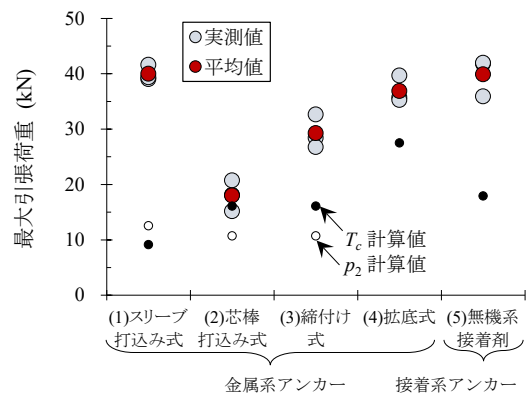


図 4-4 5 種類のアンカーの最大引張荷重

次に、アンカーの引張最大荷重の実測値と平均値を図 4-4 に示す。コーン状破壊部の面積と同様、固着方法の違いによって最大引張荷重に差が生じた。また、図 4-4 には、比較のために 2 章の式(2.2)を参考としたコーン状破壊耐力 T_c (式(4.1)) と、式(2.5)を参考としたコーン状破壊により決まる引張力 p_2 (式(4.2))、(4)拡底式と(5)接着系アンカーは「各種合成構造設計指針・同解説」では適用外のため除外) の計算値も併記した。なお、 T_c および p_2 は、設計に用いる式(2.2)、式(2.5)から部材係数や施工のばらつき

を考慮した低減係数などを考慮せず、コンクリートの強度に設計基準強度ではなく引張試験時の圧縮強度測定値を用いている点で異なっており、やや大きな値となる。実測値にはコーン状破壊ではない破壊モードとなったデータも含まれている。特に(2)芯棒打込み式の最大引張荷重の最も小さいものはコーン状破壊耐力 T_c より小さいが、引抜き破壊であったことから、計算値の想定する破壊モードでないことに留意する必要がある。

$$T_c = K_t \alpha A_c \sqrt{f'_c} \quad (4.1)$$

ここに、

T_c : コーン状破壊耐力

K_t : 使用期間の長さの影響を表す係数 (=1.0 ; 短期使用)

α : あと施工アンカーの種類を表す係数 (=0.31 ; 金属拡張、0.23 ; 接着系)

A_c : 母材コンクリートのコーン状破壊面の有効水平投影面積 (= $\pi l_e (l_e + D_a)$)

l_e : 有効埋込み長さ

金属拡張アンカーの場合 : (= $l - D_a$)

接着系アンカーの場合 : 母材表面からアンカー筋先端までの長さ (= l)

ただし、先端部にカットのあるアンカー筋は、その部分を除いた距離

l : アンカーの埋込み長さ

D_a : アンカー本体の直径

f'_c : 母材コンクリートの圧縮強度

$$p_2 = \phi_2 \cdot A_c \cdot 0.31 \sqrt{f'_c} \quad (4.2)$$

ここに、

p_2 : コーン状破壊により決まる引張力

ϕ_2 : 低減係数 (=2/3 ; 短期荷重用)

A_c : コーン状破壊面の有効水平投影面積 (= $\pi l_{ce} (l_{ce} + D_a)$)

l_{ce} : 強度算定用埋込み長さ

$l < 4D_a$ の場合 : $l_{ce} = l$

$l \geq 4D_a$ の場合 : $l_{ce} = 4D_a$

l : アンカーの埋込み長さ

D_a : アンカー本体の直径

f'_c : 母材コンクリートの圧縮強度

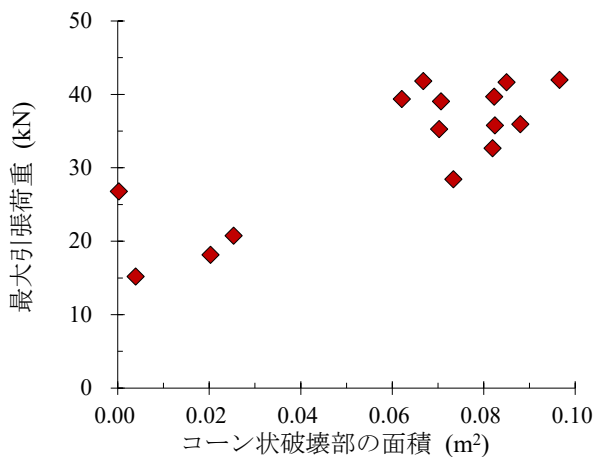


図 4-5 コーン状破壊部の面積と最大引張荷重の関係

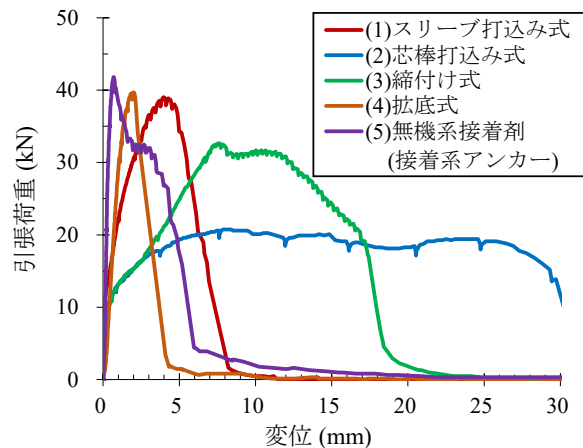


図 4-6 荷重-変位曲線の例

ここで、コーン状破壊部の面積と最大引張荷重の関係を図 4-5 に示すが、コーン状破壊部の面積が大きくなると、最大引張荷重が大きくなる傾向があることが分かる。

引張試験より得られた荷重-変位曲線の例を図 4-6 に示す。金属系アンカーでは、荷重-変位曲線は固着方法の違いによって異なり、引張載荷時の最大荷重に達した時の変位は、スリーブ打込み式と拡底式が小さく、芯棒打込み式と締付け式が大きい。特に芯棒打込み式は最大荷重以降も変位が大幅に増大している。芯棒打込み式と締付け式はアンカー先端の拡張部が比較的小さいため、アンカーの引抜き量が大きかったためと考えられる。一方、今回用いた接着系アンカーでは、変位の増加量は最も小さかった。接着系アンカーは孔内全体に接着剤を充填して孔壁に固着させるため、アンカー先端の拡張部のみで固着する金属系アンカーと比べて引抜きが生じにくいためと考えられる。

これらの結果より、アンカーボルトの径が同一でも、固着メカニズムの違い、特に金属系アンカーについては先端形状や拡張部の大きさの違いによって、最大引張荷重の大きさや最大荷重時の変位量が異なることが確認された。このため、使用目的に応じて、所要の耐荷力特性を有するあと施工アンカーを選定する必要がある。

4.2 群効果

4.2.1 群配置されたアンカーのアンカーピッチの影響

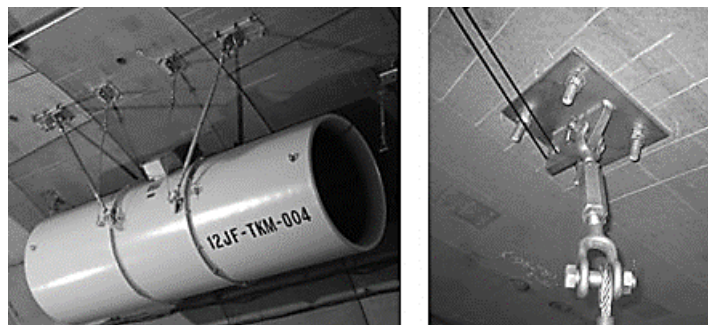


写真 4-5 ジェットファンの取付け状況の例

道路トンネルの覆工コンクリートにジェットファンを取り付ける際、写真 4-5 に示すように 1 つの吊り金具に対し複数のアンカーを近接して取り付けるのが一般的である。このような群配置されたアンカーについては、2.3.1(3)に示すように、有効水平投影面積が重複する部分を累加しないように求めて、設計コーン状破壊耐力（コーン状破壊により決まる許容引張力）を計算することとしている。しかし、4.1.2 の写真 4-2 に示すように、アンカー 1 本の場合では、実際のコーン状破壊部の形状は、支点間隔が $4l$ 以上の場合、設計で想定している 45° のコーンよりも大きい。そのため、 45° のコーンにおける有効水平投影面積が重複しないようなアンカーピッチであっても、実際の水平投影面積が重複する可能性が考えられる。そこで、群配置した場合の耐荷力特性に、アンカーピッチが及ぼす影響について確認した。

(1) 試験方法

表 4-7 に示す配合、性状のレディーミクストコンクリートを母材コンクリートに用いて、厚さ 300mm の試験体を作製した。試験体は、材齢 7 日まで湿潤養生、その後材齢 28 日まで試験室内に静置した。材齢 28 日以降に表 4-8 に示す条件で金属拡張アンカー（M16、全長 160mm、外径 21.7mm、ステンレス製のスリーブ打込み式アンカー）を設置し、引張試験を行った。引張試験の実施状況を写真 4-6 に示す。4 本のアンカーに引張荷重を均等に作用させるために、載荷板（鋼製、厚さ 35 mm）に球面座付きフランジナットでアンカーを固定し、載荷板中央に設置したテンションバー（SNB7、M33）を介して引張荷重を作用させた。また、アンカーの最大引張荷重を適切に求めるためには十分な支点間隔を確保する必要があるため、アンカー 1 本のケースでは直径 360mm（ $=6l > 4l$ ）、アンカー 4 本を群配置するケースでは直径 735 mm（ $\approx 4l + 3\sqrt{2}l + 4l$ 、アンカーピッチ 180mm のケースで各アンカーから $4l$ を確保）の孔を有する反力板（鋼製、厚さ 19 mm）を試験体表面に設置した。試験時には、引張荷重の載荷速度を約 3 kN/s とし、アンカーに作用する引張荷重をロードセル、アンカーの変位を変位計で測定した。変位の測定位置については、試験体表面から約 20 mm の高さで、互いに直角をなすように載荷板の 4 ヲ所に貼付した鋼板の表面とし、平均値を変位とした。

表 4-7 母材コンクリートの配合、フレッシュ性状、圧縮強度

水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m ³)					スランプ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度(N/mm ²)	
		水	普通ポルトランドセメント	細骨材	粗骨材	混和剤			材齢28日	引張試験時
52.5	43.3	159	303	792	1068	3.24	8.0	4.4	35.2	39.2

表 4-8 群配置のアンカーピッチを変えた引張試験の検討ケースとアンカー設置条件

試験ケース	アンカーピッチ (mm)	アンカー寸法、設置条件				反力板孔直径 (mm)	試験数
		アンカーボルトのねじの呼び	アンカー外径 D_a (mm)	穿孔径 (mm)	埋込み長さ l (mm)		
1本	—	M16	21.7	22	60	360	4
4本群配置	60 (1.0 l , <5 D_a)	M16	21.7	22	60	735	2
	90 (1.5 l , <5 D_a)	M16	21.7	22	60	735	2
	120 (2.0 l , <7.5 D_a)	M16	21.7	22	60	735	3
	180 (3.0 l , >7.5 D_a)	M16	21.7	22	60	735	3

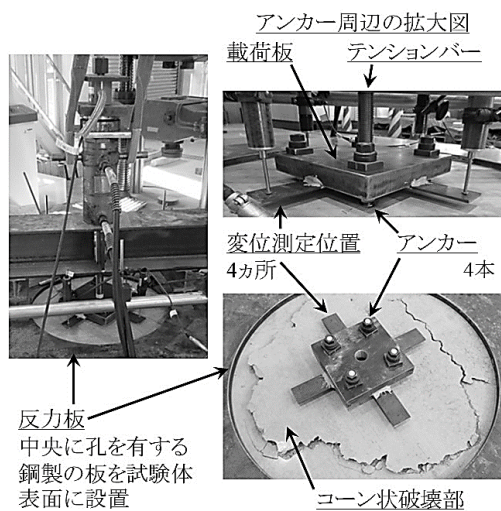


写真 4-6 引張試験の状況（群配置した場合の荷重と変位の測定）

(2) 試験結果

引張試験時の支点間隔を変化させた場合の、最大引張荷重の関係を図 4-7 に、群配置した場合のコーン状破壊の例を写真 4-7 に示す。図 4-7 には最大引張荷重の実測値の他、アンカーピッチごとの平均値を示した。また、図 4-7 には、比較のためにコーン状破壊耐力 T_c (式(4.1)) と、コーン状破壊により決まる引張力 p_2 (式(4.2)) の計算値も併記した。さらに、参考としてアンカー1本で引張試験を行った結果についても縦軸上に併記した。

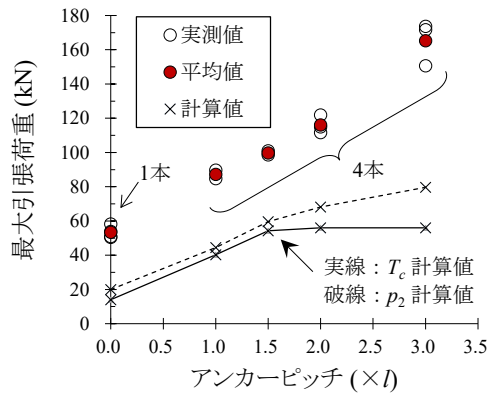


図 4-7 アンカーピッチと最大引張荷重

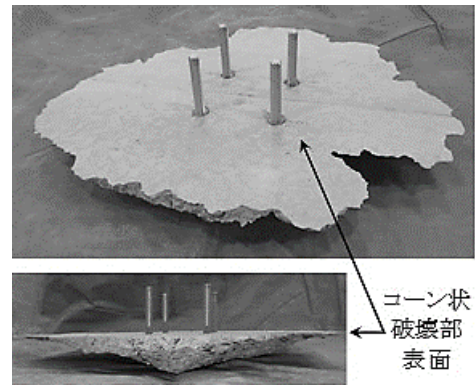


写真 4-7 群配置した場合のコーン状破壊の例

図 4-7 の最大引張荷重の実測値と平均値によると、群配置された 4 本のアンカーの最大引張荷重は、単独で設置された 1 本のアンカーの最大引張荷重よりも大きく、アンカーピッチが拡大するほど大きくなった。また、破壊時には、アンカーピッチにかかわらず、写真 4-7 に例示したように 4 本のアンカーに囲まれた部分を中心とした一塊のコーン状破壊が生じることが多かった。

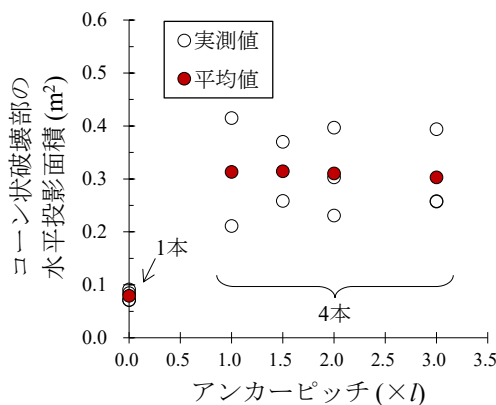


図 4-8 コーン状破壊部の水平投影面積

次に、目視観察結果から求めたコーン状破壊部の表面の面積を図 4-8 に示す。式(4.1)または式(4.2)ではアンカーピッチを広くすると図 4-9 または図 4-10 のようにコーン状破壊部の有効水平投影面積が大きくなると仮定しているが、図 4-8 に示したように実際には両者の関係の傾向は明確ではなかった。また、図 4-9 ではコーン状破壊部の破壊面の角度を 45° とし、アンカーピッチを $2l$ あるいは $3l$ 、図 4-10 ではアンカーピッチを $3l$ とすると各アンカー周囲が分離したコーン状破壊が発生すると仮定しているが、実際には写真 4-7 のように 4 本のアンカーに囲まれた部分を中心とした一塊のコーン状破壊が発生した。このように、今回の試験では図 4-9 または図 4-10 での仮定と実際のコーン状破壊の発生状況は一致しなかった。

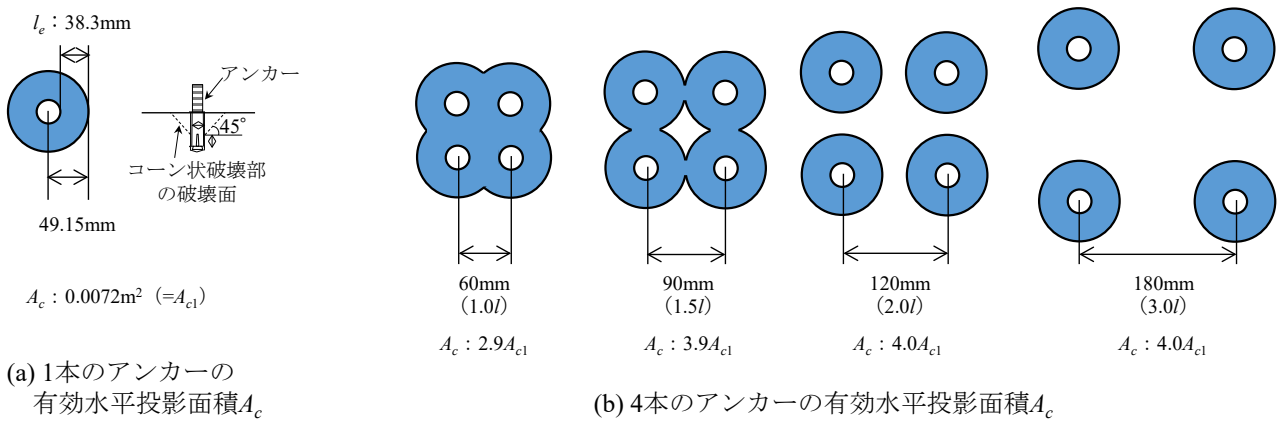


図 4-9 式 (4.1) の有効水平投影面積 (有効埋込み長さ l_e を考慮した場合)

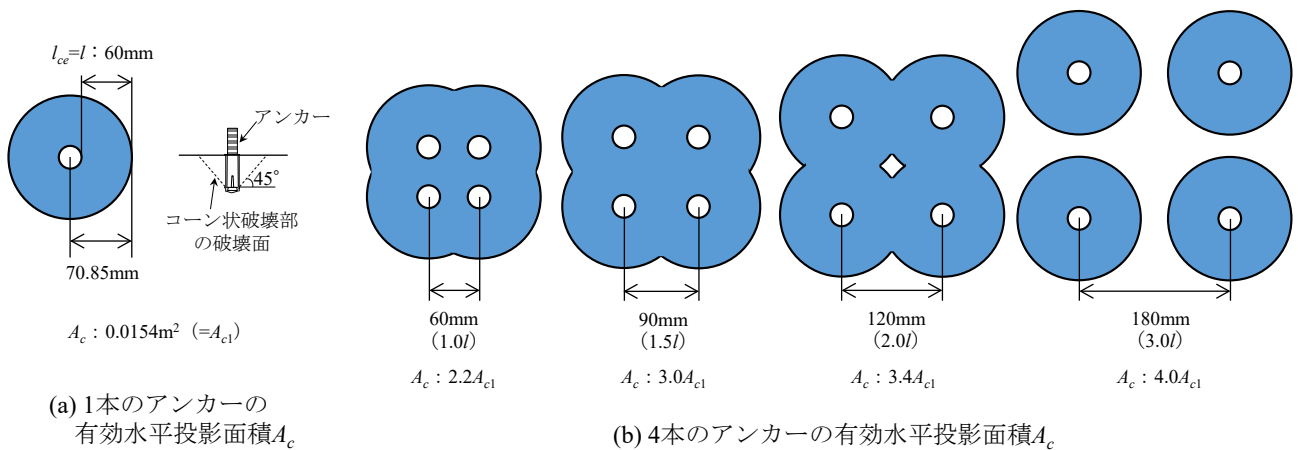


図 4-10 式 (4.2) の有効水平投影面積 (強度算定用埋込み長さ $l_{ce}=l$ を考慮した場合)

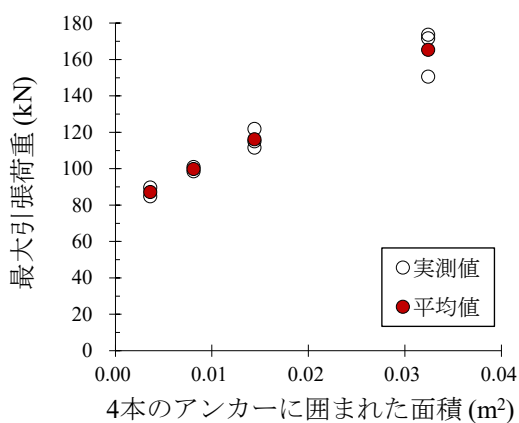


図 4-11 4本のアンカーに囲まれた面積と最大引張荷重

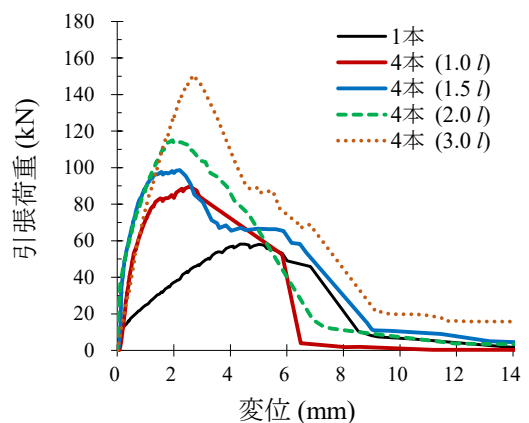


図 4-12 荷重-変位曲線の例

また、図 4-7 で最大引張荷重の実測値と計算値を比較すると、アンカーピッチにかかわらず、実測値は計算値よりも大きくなった。また、実測値と計算値の差はアンカーピッチによって異なった。ここで、

4本のアンカーに囲まれた面積（正方形の母材コンクリートの表面積）と最大引張荷重の関係を図4-11に示すが、4本のアンカーに囲まれた面積が大きいほど最大引張荷重は大きくなる傾向にあった。このため、前述した最大引張荷重の実測値と計算値の不一致の要因としては、4本のアンカーが群配置されると実際のコーン状破壊の発生状況や耐荷機構が図4-9または図4-10の仮定と異なり、少なくともアンカーピッチが $3l$ までの範囲においては、コーン状破壊部の中でも特に4本のアンカーに囲まれた部分のコンクリートがアンカーに拘束されて引張荷重を多く負担したことが考えられる。ただし、設計コーン状破壊耐力（コーン状破壊により決まる許容引張力）は、本試験の結果、実測のコーン状破壊耐力は式(4.1)および式(4.2)の計算値よりも大きい値が得られた。

次に、荷重-変位曲線の例を図4-12に示すが、4本のアンカーでは、1本のアンカーと比較して、荷重-変位曲線の傾きが大きく、最大荷重時の変位が小さい。4本のアンカーで分担して引張荷重を負担したためと考えられる。

4.3 へりあきの影響

4.3.1 へりあきが基準最小の場合の最大引張荷重と耐荷特性

2.3.1に示した軸引張力を受ける場合の設計コーン状破壊耐力（コーン状破壊により決まる許容引張力）は、母材コンクリートが 45° のコーン状に破壊することを想定している。そのため、へりあき寸法が、「軸引張力を受ける場合の設計コーン状破壊耐力」は有効埋込み長さ l_e 以上、「コーン状破壊により決まる許容引張力」は強度算定用埋込み長さ l_{ce} 以上の場合は有効水平投影面積 A_c が母材コンクリート内に収まるため、へりあきについて配慮する必要がないと考えられている。一方、へりあき寸法が l_e または l_{ce} 未満の場合は、母材コンクリート端部より突出した部分を除いた A_c を求めて設計耐力を算出する。

しかし、実際にアンカーの引張試験を行うと、写真4-2や写真4-7に示すように設計で想定する 45° コーンよりも広い範囲で母材コンクリートが破壊する例が多く確認された。また、4.1.3に示すように、あと施工アンカーには様々な製品があり、金属系アンカー先端の固着部の形状の違いによって、コーンの形状も異なることが考えられる。

そこで、有効水平投影面積 A_c の円が母材コンクリート端部に接するような、へりあきが設計基準上の最小値の場合において、最大引張荷重や挙動に影響が生じないと評価することの適否について、試験により確認した。

(1) 試験方法

表4-9に示す配合、性状のレディーミクストコンクリートを母材コンクリートに用いて、図4-13に示す $1,690\text{mm} \times 1,500\text{mm} \times$ 厚さ 300mm の試験体を作製した。試験体は、材齢7日まで湿潤養生、その後材齢28日まで試験室内に静置した。材齢28日以降に、4.1.3で用いた写真4-3および表4-5に示す固着方法の異なる5種類のアンカーを設置した。試験ケースはへりあきが十分なケースと、へりあきが最

小のケースの2ケースとし、最小へりあき寸法とアンカーピッチを表4-10に示すとおりとなるようにアンカーを設置した。へりあきが最小のケースについては、式(4.2)の有効水平投影面積の求め方を参考とし、アンカー外周部から母材コンクリート端部までの距離を埋込み長さ l となるように設定したが、アンカーの設置位置を試験体端部付近とした場合は、引張試験のための直径360mmの反力版（鋼製、厚さ19mm）の設置が困難となるため、アンカー設置位置から最小へりあき寸法となる位置に母材コンクリート端部を模擬するためのスリット（幅20mm、深さ100mm）を設けた。引張試験は4.1.3と同じ方法、条件で行った。なお、接着系アンカーに用いた無機系接着剤の引張試験時の圧縮強度は47.0N/mm²であった。

表4-9 母材コンクリートの配合、フレッシュ性状、圧縮強度

水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)					スランプ (cm)	空気量 (%)	引張試験時圧縮強度 (N/mm ²)
		水	普通ポルトランドセメント	細骨材	粗骨材	混和剤			
57.0	43.8	159	279	810	1068	2.99	7.5	3.7	28.4

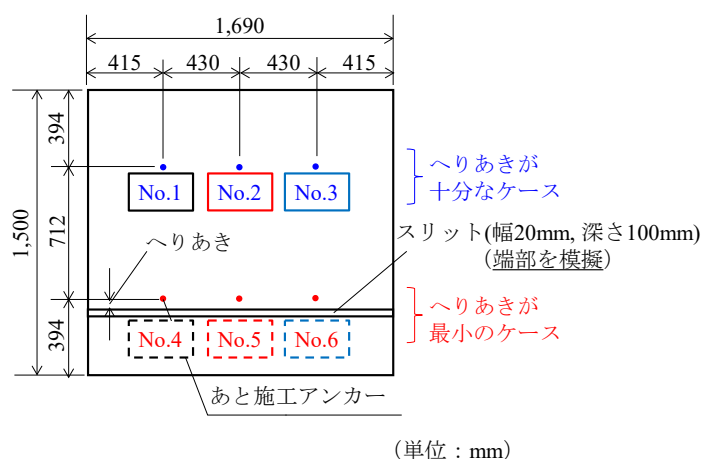


図4-13 へりあき検討用試験体

表4-10 試験に使用したあと施工アンカーの概要

あと施工アンカーの種類		固着方法等	試験ケース	最小へりあき寸法 (mm)	最小アンカーピッチ×0.5 (mm)
金属系	金属拡張式	(1)スリーブ打込み式	へりあきが十分	394	215
			へりあきが最小	59	
		(2)芯棒打込み式	へりあきが十分	394	
			へりあきが最小	66	
	(3)縮付け式	へりあきが十分	394		
		へりあきが最小	66		
金属拡底式	(4)拡底式	へりあきが十分	394		
		へりあきが最小	69		
接着系	注入式	(5)無機系接着剤	へりあきが十分	394	
			へりあきが最小	66	

※最小へりあき寸法は、アンカー中心から母材コンクリート端部までの長さの最小値


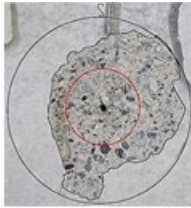
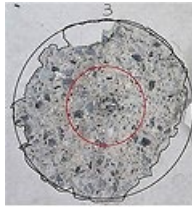
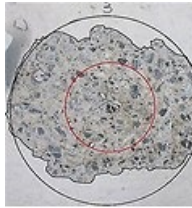
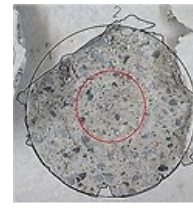
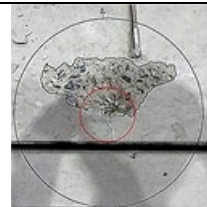
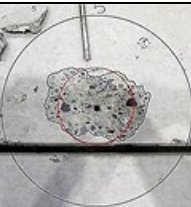


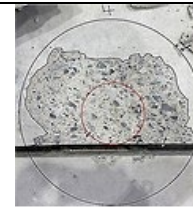
(2) 試験結果

引張試験後の破壊形式を表 4-11 に示す。また、破壊状況写真の例を表 4-12 に示す。

表 4-11 引張試験後の破壊形式

あと施工アンカーの種類		固着方法等	破壊形式					
			へりあきが十分なケース			へりあきが最小のケース		
			No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6
金属系	金属拡張式	(1)スリーブ打込み式	コーン状	コーン状	コーン状	割裂	割裂	割裂
		(2)芯棒打込み式	コーン状	コーン状	コーン状	コーン状	コーン状	割裂
	金属拡底式	(3)締付け式	引抜き	引抜き	コーン状	割裂	割裂	割裂
接着系	注入式	(4)拡底式	コーン状	コーン状	コーン状	割裂	割裂	割裂
		(5)無機系接着剤	コーン状	コーン状	コーン状	コーン状	コーン状	割裂

表 4-12 5種類のアンカーの破壊状況写真の例

	金属系アンカー				接着系アンカー
	(1)スリーブ打込み式	(2)芯棒打込み式	(3)締付け式	(4)拡底式	(5)無機系接着剤
へりあきが十分	 No.1 コーン状	 No.2 : コーン状	 No.3 : コーン状	 No.3 : コーン状	 No.2 : コーン状
へりあきが最小	 No.4 : 割裂 (ひび割れ)	 No.5 : コーン状	 No.5 : 割裂 (ひび割れ)	 No.6 : 割裂 (ひび割れ)	 No.4 : コーン状 (コーン分断)

※写真中の赤丸は有効水平投影面積の円を示している

4.1.3 と同様に、固着方法の違いによって破壊形式に差が生じている。へりあきが十分なケースでは、ほとんどがコーン状破壊となったが、(3)締付け式の No.1、2 では引抜き破壊となった。

へりあきが最小のケースでは、多くの場合、試験中に写真 4-8 に示すような母材コンクリートにひび割れが生じ、割裂破壊となった。2.2 に示すように、母材コンクリート厚やへりあきが小さい場合などに割裂破壊が生じやすいとされており、今回の試験でもこの傾向が示されたと考えられる。また、(2)芯棒打込み式と(5)接着系アンカー（注入式、無機系接着剤）ではコーン状破壊が見られた。(2)芯棒打込み式では、コーンの大きさがあまり大きくならず、今回の試験ではコーンが端部からはみ出なかった。(5)

接着系アンカーではコーンの一部がスリットで分断されており、へりあきが十分なケースよりも破壊面の水平投影面積が小さくなった。このように、実際のアンカーでは設計で想定する 45°コーンより大きなコーンで破壊するため、へりあきが十分確保されている場合よりも破壊面の水平投影面積が小さくなることが確認された。



写真 4-8 割裂破壊の例

破壊部の表面積の実測値と平均値を、へりあきが十分なケースとへりあきが最小のケースを合わせて図 4-14 に示す。4.1.3 と同様に、へりあきが十分なケースでは、アンカーボルトの径が同一（12mm）でも固着方法の違いによって破壊部の面積が異なっている。へりあきが最小のケースも同様に固着方法の違いで差が生じているが、概ねへりあきが十分なケースに比べて破壊部の面積が小さい。

これらのことから、設計上有効水平投影面積 A_c を減じる必要が無くても、コーン状破壊部が設計で想定する 45°のコーンより大きなコーンで破壊する場合があるため、へりあきが小さい場合はコーンが端部から突出する場合があることや、割裂破壊など異なる破壊モードとなる場合が確認された。

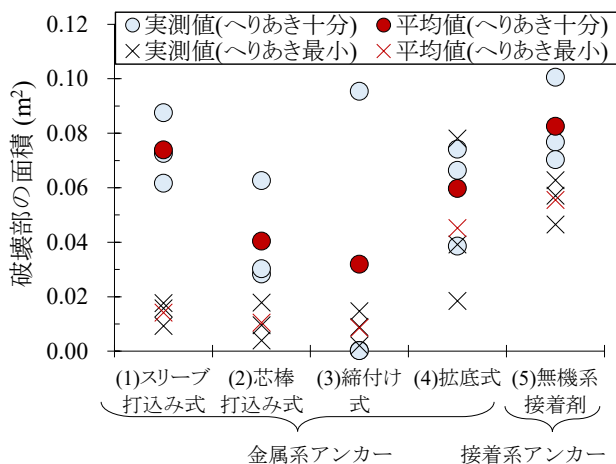


図 4-14 5 種類のアンカーの破壊部の母材表面積

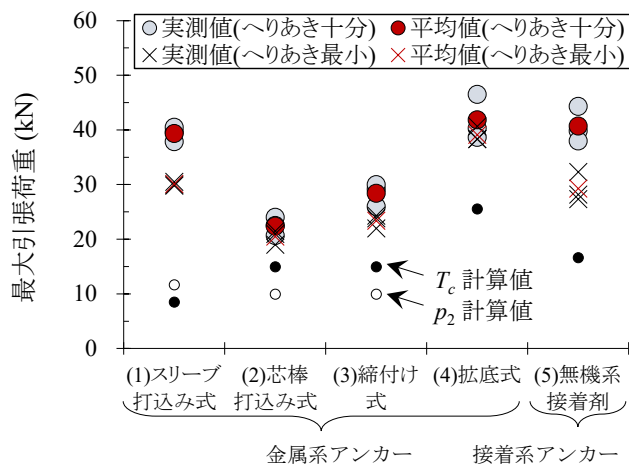


図 4-15 5 種類のアンカーの最大引張荷重

次に、アンカーの最大引張荷重の実測値と平均値を、へりあきが十分なケースとへりあきが最小のケースを合わせて図 4-15 に示す。破壊部の面積と同様、へりあきが十分なケース、へりあきが最小のケー

スのどちらも、固着方法の違いによって最大引張荷重に差が生じた。また、へりあきが最小のケースの方が、最大引張荷重は小さかった。図 4-15 には、比較のためにコーン状破壊耐力 T_c (式(4.1)) と、コーン状破壊により決まる引張力 p_2 (式(4.2)、(4)拡底式と(5)接着系アンカーは「各種合成構造設計指針・同解説」では適用外のため除外) の計算値も併記した。実測値にはコーン状破壊ではない破壊モードとなったデータも含まれているが、へりあきが十分なケース、へりあきが最小のケースのいずれにおいても、全ての最大引張荷重の実測値は計算値を上回っていた。

次に、各アンカーの荷重-変位曲線を図 4-16 に示す。(2)芯棒打込み式と(3)締付け式については、引抜き変位が他のアンカーと比べて大きい。また、点線はへりあきが最小のケースの結果を示しているが、大多数が変位の小さいところでピークに達していた。

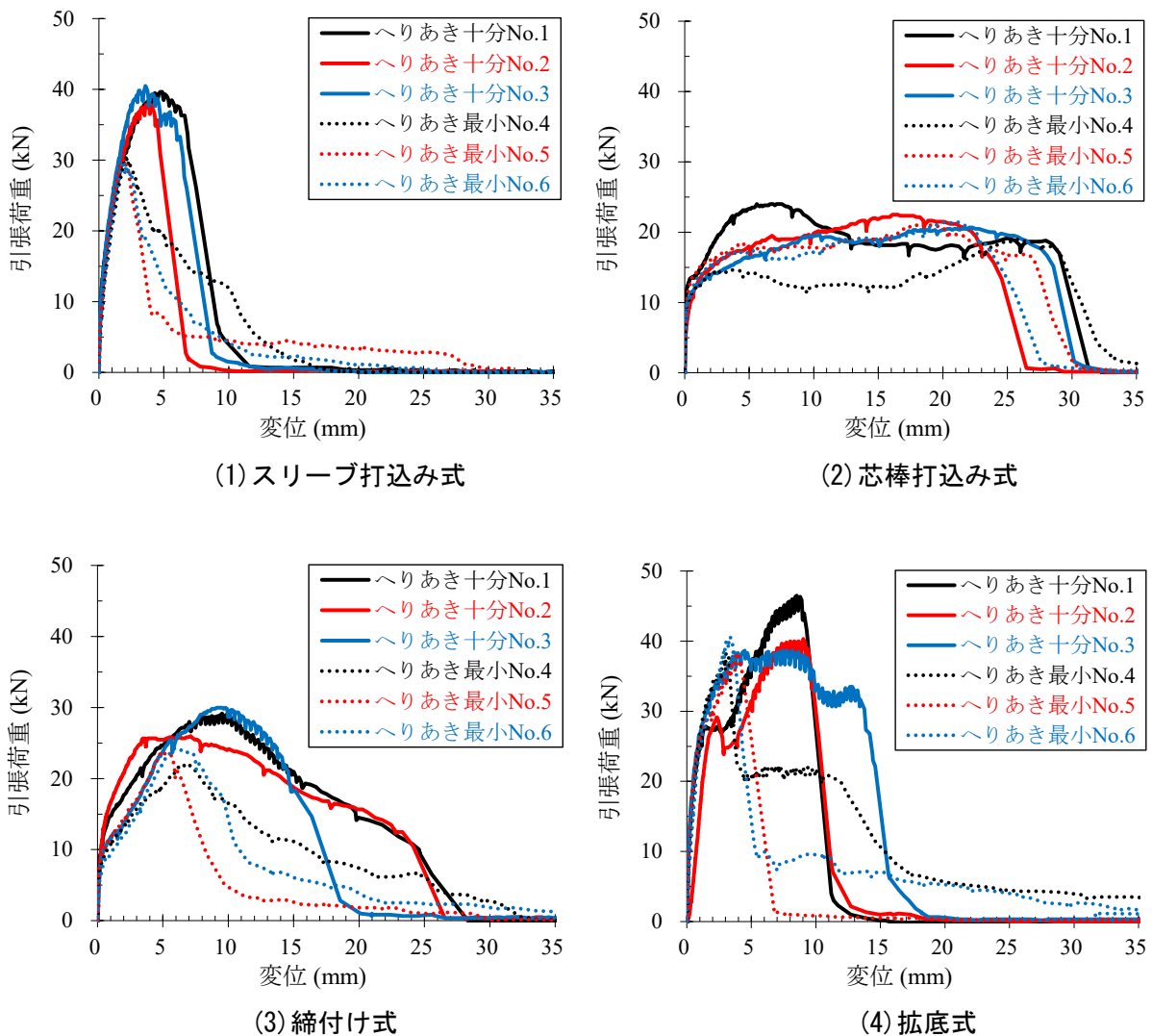
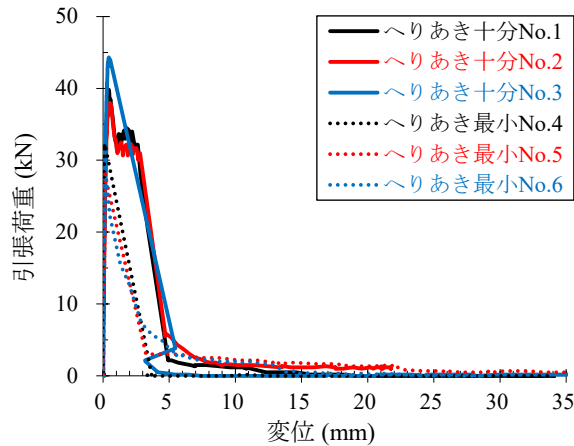


図 4-16 荷重-変位曲線の例



(5) 接着系アンカー

図 4-16 荷重-変位曲線の例 (つづき)

これらの結果より、へりあきが十分なケースと比べて、へりあきが最小のケースでは最大引張荷重が小さくなり、大多数でより小さな変位で最大荷重に達するなど、影響が確認された。また、割裂破壊を示すものもあり、必ずしもコーン状破壊とならない場合も確認された。ただし、最大引張荷重の実測値はいずれも、コーン状破壊耐力 T_c (式(4.1)) およびコーン状破により決まる引張力 p_2 (式(4.2)) の計算値を上回った。

これらを総合的に考慮すると、有効水平投影面積 A_c の円が母材コンクリート端部に接するようにへりあきを設定しても、耐力の面からただちに問題は生じにくいと想定される。しかし、割裂破壊など耐力の算定式が示されていない破壊モードも生じうるため、へりあき寸法はできるだけ埋込み長さ以上確保することが望ましい。

4.4 持続载荷の影響

道路トンネルジェットファンを吊り下げ設置する状況において、アンカーには、常にジェットファンや取付部材等の静荷重が作用している状況である。そこで、静荷重の持続载荷がアンカーの耐力に与える影響について確認した。

ここで、ジェットファンの取付けには**写真 4-5** に示すように複数のアンカーが用いられる。例えば、ジェットファンの取付けに 4 つの吊り金具が用いられ、1 つの吊り金具の固定に用いるアンカーの本数を 4 本とすると、16 本のアンカーでジェットファンや吊り金具、ターンバックル等の静荷重を負担することになる。例えば、文献 4.6) に記載されている最も重いジェットファン (質量 2,300kg) のみを 16 本のアンカーで支えた場合を考えると、アンカー 1 本あたりの負荷は 1.5kN 程度になる。実際は、吊り金具やターンバックル等の静荷重もこれに加わる。実際の現場では、M24 のスリーブ打込み式金属拡張アンカーが一般的に用いられているが、本試験ではより厳しい条件として、径の小さな M16 のスリーブ打込み式金属拡張アンカーを用いて、実際のジェットファン取付け状況でアンカー 1 本が負担するよりも

大きな静荷重を持続的に加え、その後載荷試験を行うことで持続荷重が最大引張荷重に与える影響を確認した。

(1) 試験方法

表 4-7 に示す配合、性状のレディーミクストコンクリートを母材コンクリートに用いて、1,000mm×1,000mm×厚さ 300mm の試験体を 3 体 (D1～D3) 作製した。試験体は、材齢 7 日まで湿潤養生、その後材齢 28 日まで試験室内に静置した。材齢 28 日以降に、金属拡張アンカー (M16、全長 160mm、外径 21.7mm、ステンレス製のスリーブ打込み式アンカー) を設置した。これを図 4-17 に示すように室内に静置し、重量が約 12kN の荷重コンクリートブロックを吊り下げて、持続荷重を開始した。持続荷重中は、アンカーの変位を記録した。約 1 年後に除荷し、持続荷重を受けたアンカーで引張試験を行うとともに、試験体の反対側に新たにアンカーを設置して持続荷重を受けていない条件での引張試験も行った。

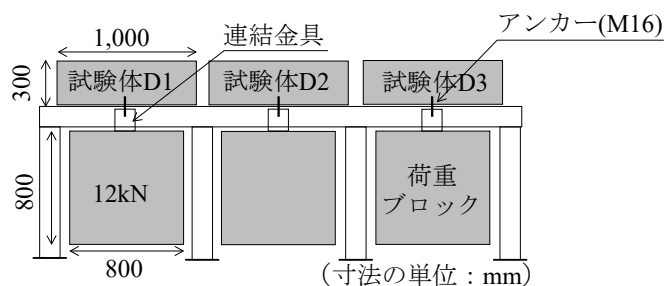


図 4-17 持続荷重状況

(2) 試験結果

図 4-18 に持続荷重期間中のアンカーの変位を示す。アンカーの埋込み長さ l は 60mm であるが、アンカーに 12kN の荷重を載荷した直後に 0.6mm 程度の変位が生じた。また、持続荷重終了時点で、0.9～1.2mm 程度まで変位が増加した (増加量は 0.3～0.6 mm 程度)。変位が大きく増加したのは初めの 100 日程度であり、その後の増加は緩やかであった。

図 4-19 に持続荷重後の引張試験結果として荷重-変位曲線を、持続荷重を受けていない場合の引張試験結果と合わせて示す。持続荷重の有無にかかわらず、いずれのアンカーでもコーン状破壊が生じた。最大引張荷重は持続荷重がない場合で平均 57kN、約 1 年間の持続荷重 (12kN) を受けた場合で平均 63kN であった。両者の違いは有意ではないと考えられる。質量 2,300kg のジェットファンを 16 本のアンカーで支えた場合の 1 本当たりの負荷と同じ荷重 1.5kN における変位は 0～0.3mm と小さかった。

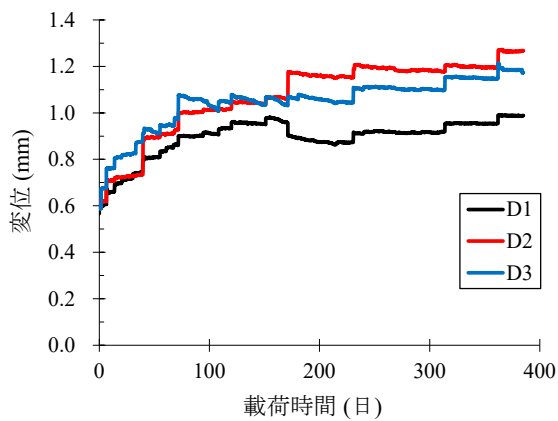


図 4-18 持続荷重期間中のアンカーの変位

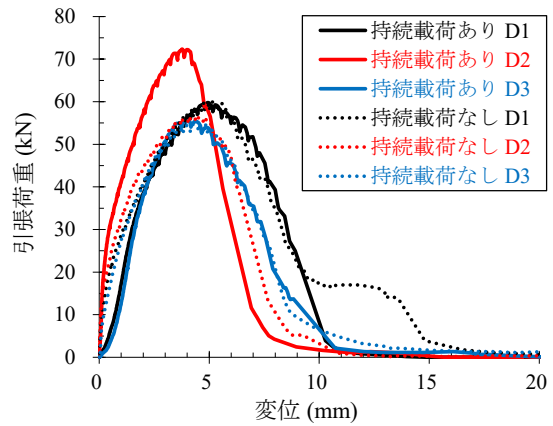


図 4-19 荷重-変位曲線

この試験結果より、アンカーの実際のコーン状破壊耐力の 2 割程度の荷重で 1 年間持続荷重を行った履歴があっても、引張試験における破壊形態や耐力には影響がないことが確認された。ジェットファンの取付けにおいては、持続的に作用する静荷重は今回の試験の荷重よりもかなり小さいため、最大引張荷重への影響は少ないと考えられる。

4.5 初期軸力の影響

4.5.1 ナット締め付けによる軸力が耐荷挙動に及ぼす影響

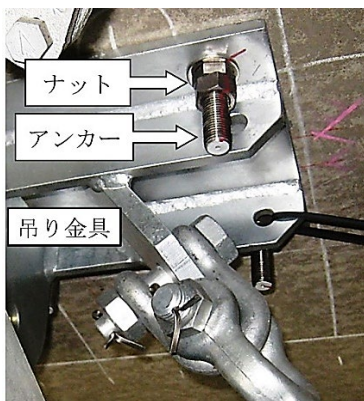


写真 4-9 吊り金具等の設置状況

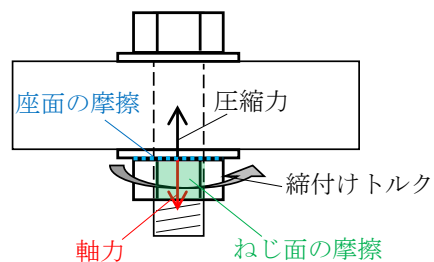


図 4-20 締め付けトルクと各摩擦・軸力の模式図

写真 4-9 に示すように、覆工コンクリートに固着されたあと施工アンカーに、ジェットファン取付けのための吊り金具をナットで締め付けて固定するが、締め付け力が大きいとアンカーが破損する恐れがあるため、トルクレンチで締め付け、締め付け力が管理されている（トルク管理）。一般的なボルトにおいて、ナットを締め付けて固定する際、その締め付けトルクは式(4.3) (Motosh の式) に示すように、ねじ面の摩擦と座面の摩擦で消費される他、ボルトに引張を与え、ボルトには軸力（初期軸力）が導入される。ボルトは元に戻ろうとするため、座面には圧縮力が作用してボルトが固定される（図 4-20 参照）。

締付けトルク=(ねじ面の摩擦トルク)+(座面の摩擦トルク)+(ボルトの引張に関するトルク) (4.3)

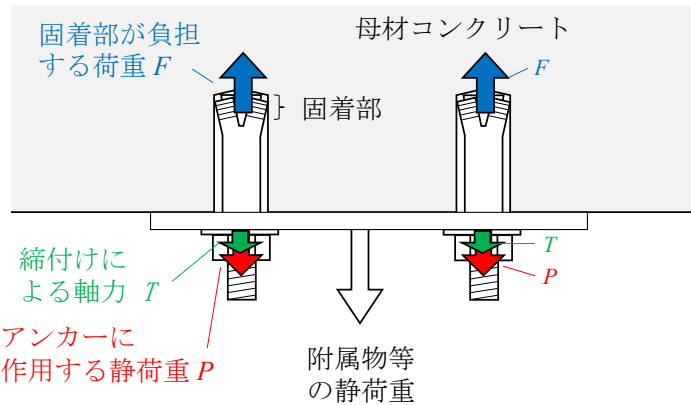


図 4-21 アンカーに作用する荷重の模式図

また、アンカーが附属物や取付金具等の静荷重を支えているとき、アンカーには図 4-21 および式(4.4)に示すように、固着部が負担する荷重 F は、アンカーに作用する静荷重 P と締付けによる軸力 T が釣り合った状態となっている。

$$F = P + T \quad (4.4)$$

ここに、

- F : アンカーの固着部が負担する荷重
- P : アンカーに作用する静荷重
- T : 締付けによる軸力

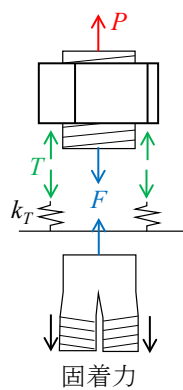


図 4-22 力のつり合いイメージ

アンカーの引張試験を行う際は、式(4.4)の P は試験機による引張荷重になるが、試験における引張変位 δ がアンカー全長にわたって一定（一様に変位する剛体）とした場合、軸力 T は式(4.5)のように表される。

$$\begin{cases} T = T^* - k_T \delta & (\text{ナットが座面から離れていない場合}) \\ T = 0 & (\text{ナットが座面から離れた場合}) \end{cases} \quad (4.5)$$

ここに、

- T : 軸力
- T^* : ナット締め付け時の初期軸力
- k_T : 母材コンクリートからの反力をノーテンションばねで表現した場合のばね定数
(図 4-22 参照、ただし、ナットが座面から離れて $T = 0$ となった時点で $k_T = 0$)
- δ : 引張変位

また、ナット締め付けを行わないで引張試験を行った場合の荷重-変位曲線の傾きを k とすると、ナットを締め付けて初期軸力 T^* が導入された状態のアンカー固着部が負担する荷重 F は、式(4.6)で表される。

$$F = T^* + k\delta \quad (4.6)$$

式(4.5)および式(4.6)を式(4.4)に代入すると、引張荷重 P と引張変位 δ の関係が式(4.7)により求まる。

$$P = (k + k_T)\delta \quad (4.7)$$

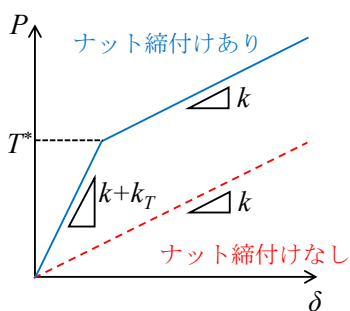


図 4-23 初期の荷重-変位曲線の模式図

図 4-23 に示すように、ナットを締め付けて引張試験を行った場合の荷重-変位曲線の傾きは、締め付けを行わずに引張試験を行った場合の傾きと比べて k_T 大きくなる。この範囲は、ナット締め付けによって弾性変形した母材コンクリート表面が元の位置に戻るまでと考えられる。そして、 $P > T^*$ の領域となり、ナットが座面から離れて $T = 0$ となった時点で $k_T = 0$ となり、ナット締め付けなしの場合と同じ傾きにな

ると考えられる。

上述のことを確認するために、設計基準強度 $18\text{N}/\text{mm}^2$ のレディーミクストコンクリートを母材コンクリートに用いた厚さ 300mm の試験体に、表 4-13 に示す試験ケース（ナット締付けなし、トルク $106\text{N}\cdot\text{m}$ （用いたアンカーボルトの標準締付けトルクの約 1.6 倍）でナット締付け）、設置条件で金属拡張アンカー（M16、全長 160mm 、外径 21.7mm 、ステンレス製のスリーブ打込み式アンカー）を設置し、引張試験を行ったところ、図 4-24 に示す荷重-変位曲線が得られた（コーン状破壊耐力）。初期変位部を拡大した図 4-25 より、 $106\text{N}\cdot\text{m}$ でナットを締め付けたケースの方が初期変位部の傾きが大きくなっており、初期軸力を超過した引張荷重が作用した時点以降は、締付けなしのケースと同等の傾きとなったことが確認された。なお、ナットを締め付けたケースの各曲線において、傾きの変化する荷重が異なった。初期軸力の大きさが異なったと考えられるが、初期軸力のばらつきについては、4.5.2（1）に記載する。

表 4-13 ナットの締付けトルクを変えた引張試験の検討ケース

ナットの 締付けトルク ($\text{N}\cdot\text{m}$)	アンカー ボルトの ねじの呼び	アンカー設置条件			試験数
		穿孔径 (mm)	穿孔深さ (mm)	埋込み長さ l (mm)	
0	M16	22	68	60	3
106					4

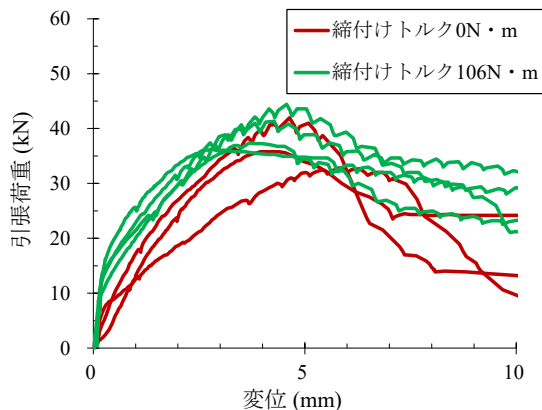


図 4-24 締付けトルクを変化させた場合の荷重-変位曲線

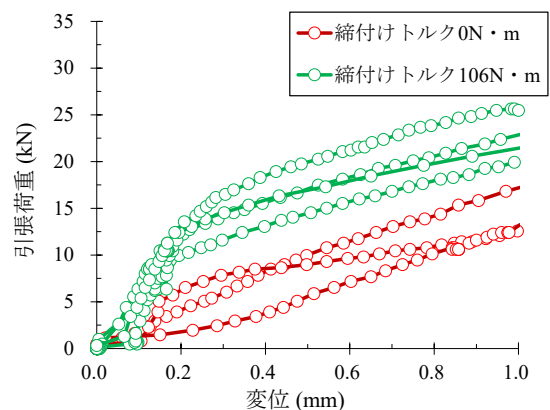


図 4-25 荷重-変位曲線の初期変位部拡大図

4.5.2 初期軸力の実態に関する検討

ナット締付けによってアンカーに初期軸力が導入されるが、前項のように大きな引張荷重が作用する他に、何らかの理由で軸力が 0 となるとナットが座面から離れ、吊り金具を固定している複数のアンカーの間で荷重が適切に分配されないなどの不具合が生じる可能性がある。このため、締付けによる初期軸力は適切なものである必要があるが、トルクレンチによる締付けトルクの管理で導入される初期軸力にはばらつきが大きいことも指摘されている^{4,7)}。また、軸力の経時変化についても知見が十分でないことから、これらの確認を行った。

(1) 初期軸力のばらつき

軸力測定のためにひずみゲージを埋め込んだ M16 のスリーブ打込み式アンカー（写真 4-10）を作製し、表 4-7 に示す配合のレディーミクストコンクリートを用いた図 4-26 に示す縦 1,000mm×横 1,000mm×厚さ 300mm の試験体に 8 本設置した。ここで用いた M16 アンカーのカタログに記載されているナット締付けトルクは 68N・m である。ひずみゲージは、図 4-27 に示すように、アンカー先端の固着部からナットまでの伸縮範囲（38.3mm）に位置するように埋め込んである。

この中で、No.3～No.8 の 6 本のアンカーを対象に、締付けトルク 23N・m、45N・m、68N・m でナットの締付けを行って導入される初期軸力を測定した。なお、初期軸力の測定は、68N・m でナットを締め付けた後にナットを弛め、再び 23N・m、45N・m、68N・m でナットの締付けを行い、繰返し初期軸力を測定した。測定回数は、ねじのかじりが生じた No.7 が 8 回、その他は 10 回とした。



写真 4-10 ひずみゲージ埋込みアンカー (M16)

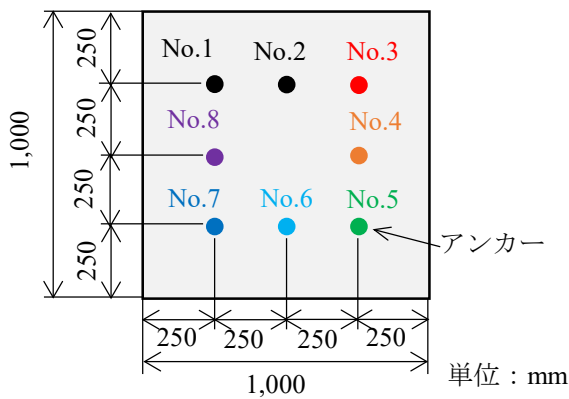


図 4-26 ひずみゲージ埋込みアンカー 8 本を設置した試験体 (平面図)

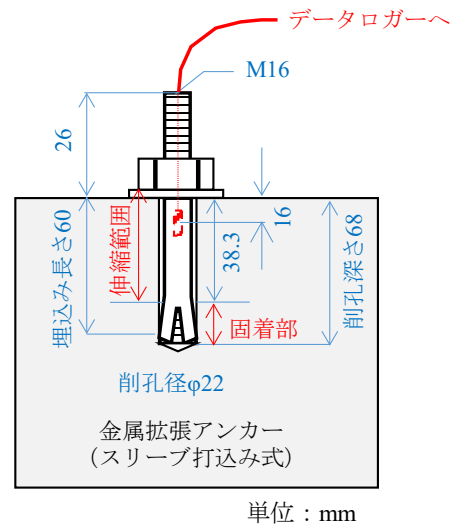


図 4-27 ひずみゲージ埋込みアンカーのひずみゲージ位置と伸縮範囲

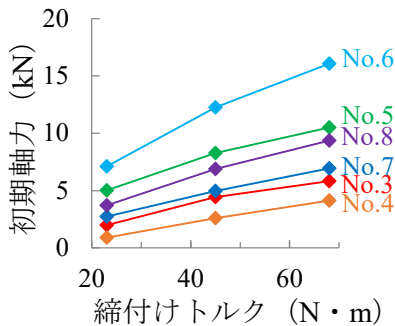


図 4-28 ナット締付けトルクと初期軸力 (平均値) の関係

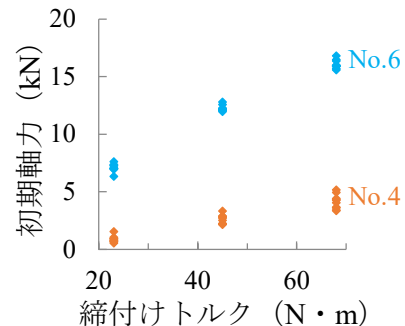


図 4-29 ナット締付けトルクと複数回測定した初期軸力の関係の例

図 4-28 にナット締付けトルクと初期軸力（平均値）の関係を示すが、締付けトルクが大きくなるほど、導入される初期軸力が大きい。また、締付けトルクが同じでも、アンカーによって初期軸力が大きく異なり、初期軸力の最も小さな No.4（平均 4.1kN）と最も大きな No.6（平均 16.1kN）では約 4 倍の差が生じている。

一方、図 4-29 にナット締付けトルクと 10 回測定した初期軸力の関係の例（No.4,6）を示すが、同一のアンカーにおいては、ナットの締付けと弛めを繰り返しても、同じ締付けトルクで導入された初期軸力のばらつきは比較的小さかった。他のアンカーについても同様であった。

これらのことから、同一条件で締付けを行っても、個々のアンカーによって初期軸力が大きく異なりうる。同じように施工しても、設置位置が異なるため、アンカー先端部の削孔状態や粗骨材の分布などの母材コンクリートの状態が異なること、また、式(4.3)に示すように、締付けトルクは軸力の他、座面の摩擦やねじの摩擦に消費されるが、座面やねじの摩擦係数等の条件が、完全に同一ではないことが影響していると考えられる。

同じトルクでナットを締め付けても、アンカーによって初期軸力の大きさが異なりうるが、安全性について確認した。4.4 に記載したように、16 本のアンカーでジェットファン（質量 2,300kg^{4.6}）等の静荷重を支えた場合は、アンカー1 本あたりの負荷は 1.5kN 程度になる。仮に、今回の試験で最も初期軸力が小さかった No.4 のアンカー（M16）で静荷重 1.5kN を軸引張のみで支える場合、No.4 の初期軸力の 10 回測定における最小値は 3.4kN であり、静荷重 1.5kN より大きいため、ナットが座面から離れずに済むと考えられる。ただし、現場においては径の大きな M24 のアンカーが一般的に用いられるが、初期軸力の値が今回の試験よりも小さくなるアンカーがある可能性も考えられるため、ターンバックルやジェットファンを吊り下げた際に、ナットの弛みや浮きが無いか、施工時に確認すべきと考えられる。

（2）軸力の経時変化（金属拡張アンカー）

図 4-26 の試験体に設置した No.7 と No.8 のアンカーについて、68N・m でナットを締め付けて初期軸力を導入し、350 日間の経時変化を測定した。また、図 4-26 の試験体は室温の変化する室内に静置している。アンカーに埋め込んだひずみゲージは温度の変化で出力値が変わるため、軸力を導入していない No.1 と No.2 についても測定を行い、No.7 および No.8 の出力値から、No.1 と No.2 の出力値の平均値を減じることによって、350 日間の経時変化量を求めた。その結果を図 4-30 に示す。

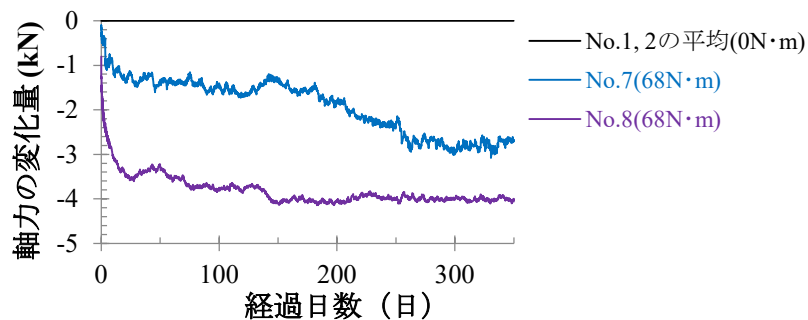


図 4-30 軸力の経時変化量（No.1, 2 の平均値を基準とした場合の変化量）

No.7 および No.8 の軸力は、締付け後から軸力が低下した。特に初期（25 日程度）に大きく低下し、その後の変化は緩やかとなる傾向を示している。350 日後には、No.7 は 2.7kN 程度、No.8 は 4.0kN 程度初期軸力から低下した。図 4-28 より、No.7 の初期軸力は 6.9kN 程度、No.8 の初期軸力は 9.3kN 程度だったため、350 日後の軸力はそれぞれ 4.2kN、5.3kN 程度まで低下した。

今回の試験における軸力の経時的な低下について、(1) と同様に 16 本のアンカーでジェットファン等の静荷重（質量 2,300kg）を負担した場合の安全性を確認した。アンカー 1 本あたりの負荷は 1.5kN 程度であるから、350 日経過後の No.7 および No.8 の軸力はこれを上回っており、これらのアンカーの場合は 1 年程度ではナットは弛まないものと考えられる。ただし、アンカーごとのばらつきを考慮すると、初期軸力が小さなアンカーも想定する必要があること、また、軸力の低下は初期に大きいことを考慮すると、ジェットファン取付け後 1 ヶ月程度以内に一度ナットの弛みや浮きの確認を行った方が良いと考えられる。また、トンネルジェットファンの点検が 5 年に 1 度であるとする、点検時にナットの弛みや浮きを確認することは重要と考えられる。

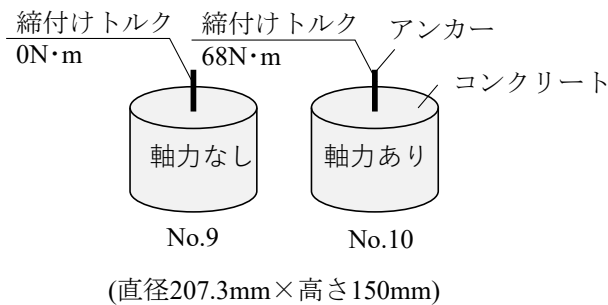


図 4-31 軸力の経時変化確認用試験体（恒温恒湿環境）

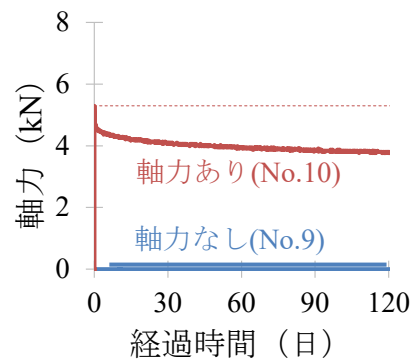


図 4-32 アンカーの軸力の経時変化

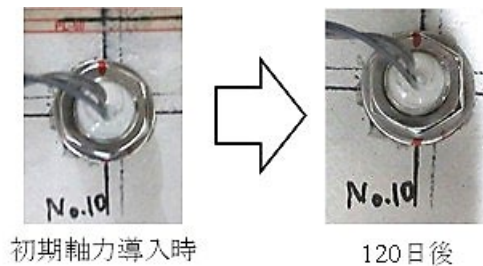


写真 4-11 アンカーNo. 10 の初期軸力導入時と 120 日後のナットの状況

次に、軸力の経時的な低下が生じる要因について、検討を行った。図 4-26 の試験体は室温の変化する環境に静置しており、温度変化による母材コンクリートやアンカーの繰返し寸法変化の影響が軸力に影響を及ぼした可能性も考えられた。そこで、図 4-26 の試験体と同じコンクリートを用い、同時に製作した図 4-31 に示す円柱型の試験体に、写真 4-10 のひずみゲージ埋込みアンカー（M16）を設置したもの

を 2 つ準備し、室温 20°C、相対湿度 60%の恒温恒湿室内に設置した。1 つはナット締付けのないもの (No.9)、もう 1 つは 68N・m でナットを締め付けて初期軸力を導入したもの (No.10) とし、120 日間軸力の経時変化を確認した。

図 4-32 に 120 日間の軸力の経時変化状況を示す。No.10 の初期軸力は約 5.3kN だったが、導入後から軸力の低下が確認され、120 日後に約 3.8kN まで低下した。特に初期 (3 日程度) に大きく低下し、その後の変化は緩やかとなる傾向を示した。写真 4-11 に No.10 の初期軸力導入時と 120 日後のナットの状況を示すが、合いマーク (赤いマーカ) の位置に変化はなく、目視や触診ではナット弛みは確認されなかった。この結果より、温度一定環境においても軸力の経時的低下が生じることが確認された。

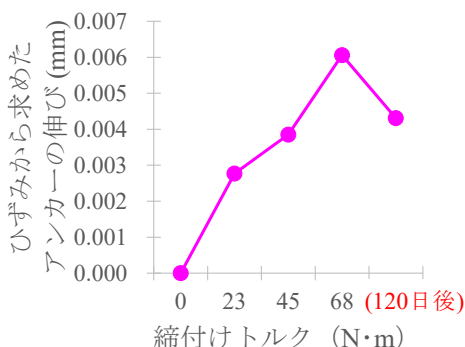


図 4-33 ひずみから求めたアンカー伸縮範囲の伸び

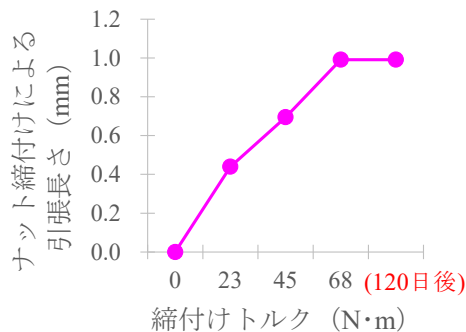


図 4-34 ナット締付けによる引張長さ

ここで測定している軸力は、アンカー内のひずみゲージから求めたものであり、ナット締付け後に経時的に図 4-27 のアンカー伸縮範囲 (38.3mm の部分) が収縮したと言い換えられる。ひずみから求めたアンカーの伸縮範囲の伸びを図 4-33 に示すが、68N・m のトルクでナットを締め付けた段階で 0.006mm 程度であった。また、アンカーボルトのねじは M16 並目ねじ (ピッチ 2mm) であり、座金・母材コンクリート表面の変形量を無視した場合、ナット締付け 1 回転で、アンカーは 2mm 引き伸ばされる。ナット回転角から求めた引張長さを図 4-34 に示すが、68N・m のトルクでナットを締め付けた段階で 1mm 程度であった。図 4-33 のアンカー伸縮範囲の伸び量と比べて 164 倍程度大きい。このことから、金属拡張アンカーでは、ナット締付け時のアンカー引張長さの大部分は、アンカー伸縮範囲の伸び以外 (例えば、固着部のすべりや座金・母材コンクリート表面の変形など) が占めると考えられる。また、軸力の低下として測定されるアンカー伸縮範囲の収缩量は、120 日後の時点で 0.002mm 程度と非常に小さい。ナットがほぼ弛んでいなかったことから、収縮の要因として、軸力の持続的作用によるアンカー固着部の微小なすべりや、母材コンクリートの微小なクリープ変形などが推測される。

(3) 軸力の経時変化（その他のアンカー・弛み止め防止機能付きナットの影響）

表 4-14 母材コンクリートの配合、フレッシュ性状、圧縮強度

水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)					スランプ (cm)	空気量 (%)	材齢 28 日 圧縮強度 (N/mm ²)
		水	普通ポルトランドセメント	細骨材	粗骨材	混和剤			
56.0	43.1	164	293	786	1068	3.14	10.0	5.8	21.1

軸力の経時的な低下は、金属拡張アンカー（スリーブ打込み式）以外でも生じるのか、接着系アンカー、先付けアンカーでも確認を行った。また、金属拡張アンカーのカタログでは、弛み止め機能付きナットの使用が推奨されているため、これを用いた場合についても確認した。表 4-14 に示す配合のレディーミクストコンクリートを用いた試験体（厚さ 300mm）を準備し、材齢 28 日以降に図 4-35 に示す固着方法の異なる 3 種類のアンカーを設置した。試験ケースは表 4-15 に示すとおりである。いずれもアンカーボルトのねじの呼びは M16 である。また、軸力測定用のひずみゲージを埋め込んでいる。ここで、埋込可能なひずみゲージの寸法の都合上、アンカーボルトの伸縮可能な長さを軸力測定可能な分確保する必要があるため、ひずみゲージ埋込み位置にビニールテープを巻いて母材コンクリートおよび接着剤との固着を防ぎ、軸力が測定できるようにしている。アンカー設置間隔（アンカーピッチ）は、図 4-26 と同様、250mm とした。

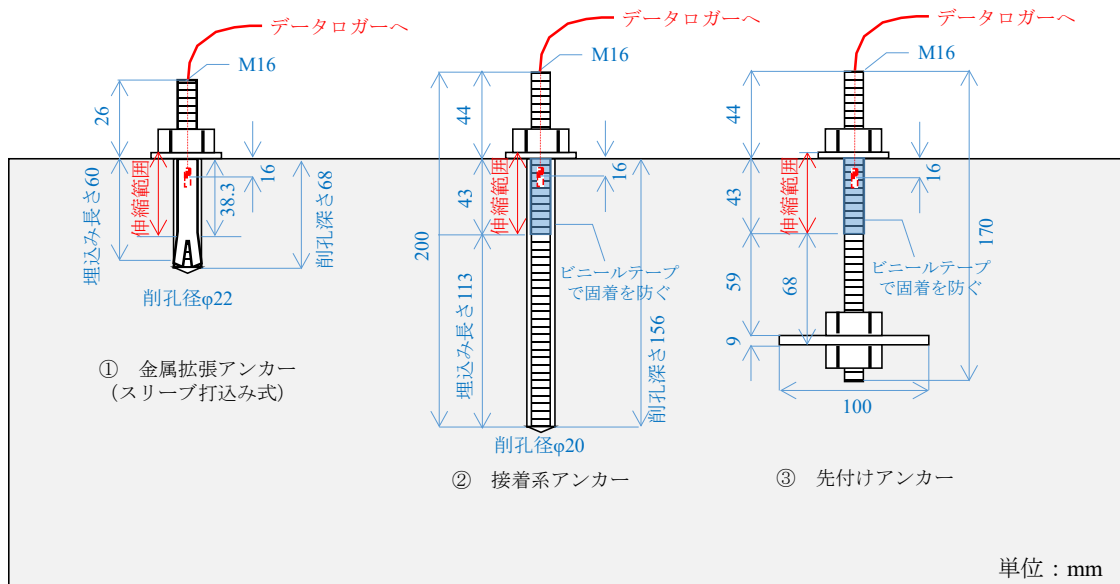


図 4-35 固着方法の異なるひずみゲージ埋込みアンカーの設置状況

表 4-15 固着方法の異なるひずみゲージ埋込みアンカーと試験ケース

ひずみゲージ埋込みアンカーの種類		固着方法等	No.	ナットの種類	締付けトルク (N・m)
あと施工アンカー	①金属拡張アンカー	スリーブ打込み式	1	通常	0
			2~4		68
			5~7	弛み止め	68
	②接着系アンカー	注入式無機系接着剤	1	通常	0
			2~4		68
			③先付けアンカー		1
2~4	68				
		5~7	弛み止め	68	

図 4-36 に、固着方法の異なる各アンカーの軸力の経時変化を示す。なお、初期軸力の値は点線で示したが、(2) の試験と同様に、ねじおよび座面の摩擦が完全に同一でないため、金属拡張アンカーのみならず、接着系アンカーと先付けアンカーでも初期軸力の大きさはアンカーごとに異なっている。

①金属拡張アンカーについては、弛み止め機能付きナットを用いた場合でも、軸力が経時的に低下した。(2) の試験の写真 4-11 に示したとおり、通常のナットで弛みが確認できなかった場合でも軸力が低下したため、弛み止め機能付きナットの場合も同様の結果が得られている。

固着部のすべりが生じにくいと考えられる②接着系アンカーおよび③先付けアンカーについては、①金属拡張アンカーと同様に軸力が経時的に低下した。このことから、軸力が経時的に低下する要因として、(2) で示した固着部のすべり以外の、母材コンクリートの微小なクリープ変形などが推測される。

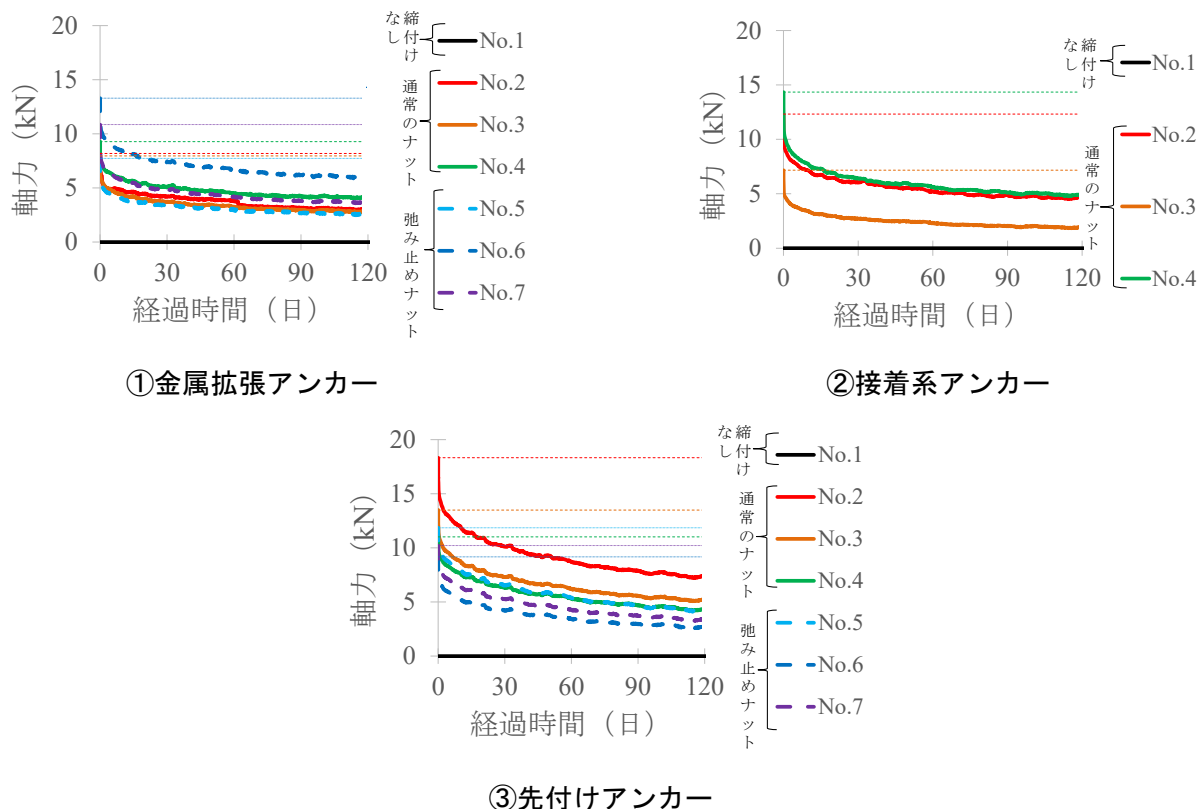


図 4-36 固着方法の異なる各アンカーの軸力の経時変化 (No. 1 を基準とした場合の変化量)

ここで、**図 4-36** の①金属拡張アンカーについては、120 日後に軸力が最も小さかった No.5 の軸力は 2.5kN 程度であった。(1)と同様に 16 本のアンカーでジェットファン等の静荷重 (質量 2,300kg^{4.6}) を負担した場合 (アンカー1 本あたりの負荷 1.5kN 程度) の安全性を確認すると、M16 の No.5 のアンカーでも 120 日程度ではナットは弛まない (弛み止めナットのため、正しくは浮かない) と考えられるが、点検が 5 年に 1 度である場合は、ナットの浮きに注意する必要があると考えられる。

(4) ナットの再締付けの影響

(2) と (3) で、軸力の経時的な低下が生じることを記述したが、定期的に所定のトルクでナットを再締付けした場合の影響について確認した。**図 4-26** に示す試験体で、No.1~No.6、No.8 のアンカーを対象に、68N・m のトルクでナットを締め付けて初期軸力を導入し、120 日ごとに 68N・m でナットの再締付けを行った。再締付けは試験開始から 480 日後の 4 回目まで行った。

各アンカーの軸力の経時変化 (軸力を導入しない No.7 のアンカーを基準とした値) を **図 4-37** に示す。横軸には、開始からの経過日数を示している。ナット締付けから 120 日後に軸力は低下するが、同日行った 1 回目の再締付け後に、概ね初期軸力の値まで軸力が回復した。次の 120 日後 (開始から 240 日後) については、最初の 120 日後と比べて、軸力の経時的低下量は少なく、徐々に軸力の経時変化は緩やかになる傾向を示した。

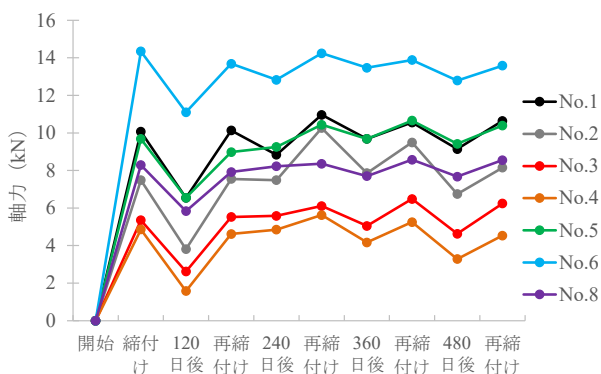


図 4-37 120 日ごとに再締付けを繰り返した No. 1~No. 6、No. 8 の軸力の経時変化 (No. 7 を基準とした場合の値)

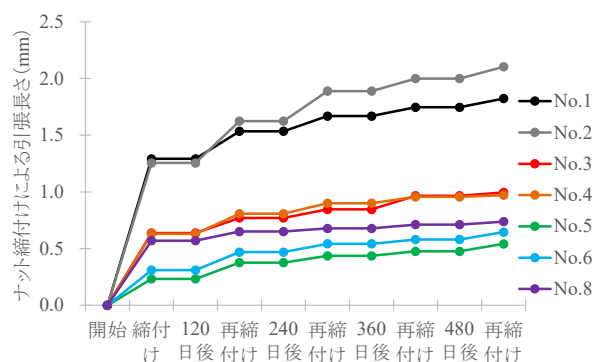


図 4-38 No. 1~No. 6、No. 8 のナット締付けによるアンカーの引張長さの変化

次に、締付け時のナット回転角から求めた、ナット締付けによるアンカーの引張長さ (ナット締付け 1 回転あたり、アンカーは 2mm 引き伸ばされる) を **図 4-38** に示す。120 日ごとの再締付けでアンカーの引張長さは徐々に増加するが、その増加量は徐々に低下していく傾向を示している。試験開始から 480 日後の 4 回目の再締付け時点で最も大きな No.2 のアンカーの引張長さが 2.1mm であるが、このアンカーの埋込み長さ 60mm に対して小さい。

これらの結果から、ナットの再締め付けを繰り返すことで、軸力の経時変化は徐々に収束するため、数回の再締付けで軸力が安定するようになると考えられる。また、**図 4-24** に示すように、同じ M16 ア

ンカーのコーン状破壊耐力に比べても小さいことから、再締付けにより軸力が増大してコーン状破壊に至る危険性は少ないと考えられる。再締付け時のアンカーの引張長さについても徐々に収束する傾向があることから、再締付けによってアンカーが引き抜けてしまう危険性も少ないと考えられる。

4.6 あと施工アンカーの耐荷力特性のまとめ

本章では主に金属拡張アンカー（スリーブ打込み式、ステンレス製）を対象とした、あと施工アンカーの設置条件や母材コンクリートの品質等を変化させて行った引張試験を行い、基本的な耐荷力特性を確認した。その結果より得られた知見や留意点を以下まとめる。

- (1) 母材コンクリートに設置したあと施工アンカーの耐荷力特性（最大引張荷重等）を評価する試験方法の確認のため、種々の寸法の孔の開いた反力板を試験体表面に設置することで支点間隔を変化させ、試験を行った。その結果、支点間隔が $2l$ 以下では支点間隔が小さくなるほど最大引張荷重が大きな値として測定され、 $4l \sim 6l$ では反力板に拘束されないコンクリートの範囲が広がるため、最大引張荷重はほぼ同等の値であった。これは、日本建築あと施工アンカー協会が示している引張試験の反力台間隔の条件（ $3.5l$ 以上）^{4.1)} とほぼ同等であった。本研究で行った試験条件で引張試験を行う場合は、試験結果が支点間隔の影響を受けて最大引張荷重が高く評価されないようにするためには、支点間隔は $4l$ 以上確保するのが良い。
- (2) 金属系アンカーは様々な種類のものがあるが、アンカーボルト（接合筋）のねじの呼び径が同じであっても、種類によって先端の形状や固着方法が異なるため、最大引張荷重やコーン状破壊時の水平投影面積、最大荷重時の変位などが異なった。特に、金属系アンカーでは、固着部の大きさの違いが最大引張荷重に大きく影響を及ぼすことに留意する必要がある。なお、現状ではジェットファンの取付けには金属拡張アンカー（スリーブ打込み式、ステンレス製）が一般的に用いられている。
- (3) ジェットファンを取付ける場合は、吊り金具を複数のアンカーで固定する。このような群配置の場合、アンカーピッチが $60 \sim 180\text{mm}$ の範囲の引張試験において、ピッチが大きくなるほど最大引張荷重が大きくなった。なお、実験では設計で想定する 45° のコーンよりも大きいコーンで破壊し、一体化した大きなコーンで破壊したため、土木学会や日本建築学会などの基準類が示す設計コーン状破壊耐力の算定式による計算値よりも大きくなった。
- (4) 土木学会や日本建築学会などの基準類が示す現行の設計基準では、へりあきが小さく設計で想定する 45° コーンが母材コンクリートの端部から突出する場合は、その部分を減じた有効水平投影面積を用いて、設計を行うこととなっている。しかし、実際に試験を行うとより大きなコーンで破壊するケースが多いため、 45° コーンの水平投影面積を示す円が母材コンクリート端部に接する場合でも、コーンが分断されてコーン状破壊耐力の値が小さくなることを確認した。また、割裂破壊が確認され、他の破壊モードが確認された。その場合でも、最大引張荷重の実測値は、設計

コーン状破壊耐力の算定式による計算値よりも大きかったが、意図せぬ破壊モードを防ぐためにもへりあき寸法に余裕を確保することが望ましい。

- (5) 現場で一般的なアンカー（M24）よりも厳しい条件として径の小さなアンカー（M16）を用い、実際のジェットファン取付けの際にアンカー1本に作用する静荷重よりも8倍程度大きな荷重（試験に用いたM16アンカーの最大引張荷重の2割程度の静荷重）を約1年間持続载荷し、その後引張試験を行ったところ、持続载荷を行っていないアンカーと最大引張荷重は大きく変わらなかった。実際のジェットファン取付けにおける静荷重の持続载荷が最大引張荷重に及ぼす影響は少ないと考えられる。
- (6) 母材コンクリートに設置したアンカーに吊り金具を設置する際に、所定のトルクでナット締付けを行うが、このときアンカーには初期軸力が導入される。アンカーによって、固着部の状況や母材コンクリートの座面の摩擦、ねじの摩擦が完全に同一ではないことから、初期軸力は、アンカーによって大きさが異なることに留意する必要がある。ただし、16本のアンカーで2,300kgのジェットファンを吊り下げる場合を想定すると、1本が負担する静荷重は、本研究で用いたM16のアンカーで最も初期軸力の小さかったものよりも値が小さかった。なお、実際の現場では、試験に用いたアンカーよりも径の大きなM24のアンカーが用いられるが、導入される軸力はさらにばらつきが大きいおそれもあるため、ジェットファン等の取付け時にナットの弛みや浮きの確認を行い、必要に応じて所定のトルクで再度締付けを行うのが良い。
- (7) ナット締付けによってアンカーに導入される軸力は、経時的に低下する。その低下量は初期（3～25日程度）に大きく、その後の低下は緩やかとなる傾向がある。また、軸力低下後に所定のトルクで再締付けを行うと、概ね初期軸力の値まで回復することを確認した。定期的な再締付けを繰り返すと、回復する軸力の大きさが単調に増大することはなく、ほぼ初期軸力の値まで回復したため、アンカー一部が破壊する可能性は低いと考えられる。さらに、徐々に軸力の経時的低下量が小さくなり、収束する傾向を示した。これらの知見から、特に初回の点検等の際に、所定のトルクでナットの再締付けを行うのが良い。

参考文献

- 4.1) 社団法人日本建築あと施工アンカー協会：製品認定用 あと施工アンカー標準試験法・同解説、pp.18～23
- 4.2) 川上明大・中村英佑・渡辺博志：非拘束引張試験における接着系あと施工アンカーの耐荷挙動、コンクリート構造物の補修、補強、アップグレード論文報告集、Vol.15、pp.185～188、2015
- 4.3) 一般社団法人日本建築学会：各種合成構造設計指針・同解説、pp.207～292, 318～328、2010.11
- 4.4) 公益社団法人土木学会：コンクリートのあと施工アンカー工法的设计・施工・維持管理指針(案)、コンクリートライブラリー160、pp.1～118、2022.1
- 4.5) 公益社団法人土木学会：コンクリートのあと施工アンカー工法的设计・施工・維持管理指針(案)、

コンクリートライブラリー160、p.59、2022.1

- 4.6) 社団法人日本道路協会：道路トンネル技術基準（換気編）・同解説、平成 20 年改訂版、p.136、2008.10
- 4.7) 一般社団法人日本建築あと施工アンカー協会：あと施工アンカー点検・診断要領（案）－取付物固定用－、p.付録 7-3、2019

5. 施工の不具合があと施工アンカーの耐荷力特性に及ぼす影響

第3章で示したように、道路トンネル内のジェットファン等の附属物の多くは、あと施工アンカー等の取付部材により覆工コンクリートに固定される。あと施工アンカーの施工は穿孔や埋込み作業を伴い、これら各施工段階において留意すべき事項を取りまとめるため、アンカーの引張試験を実施し、施工の不具合があと施工アンカーの耐荷力特性に及ぼす影響を評価した。

5.1 あと施工アンカーの施工の影響

5.1.1 穿孔径の影響

(1) 単独のアンカーでの検討

あと施工アンカーを設置する孔の径が最大引張荷重に及ぼす影響を評価するため、穿孔径を変化させた引張試験を実施した。試験の概要を図5-1に、試験ケースを表5-1に示す。試験に使用したアンカーは、ねじの呼びがM16の金属拡張アンカー（スリーブ打込み式）で、その外径は21.7mmであり、メーカーが推奨する穿孔径は22.5mmである。本試験では、穿孔径を22mmとした標準ケースに対し、穿孔

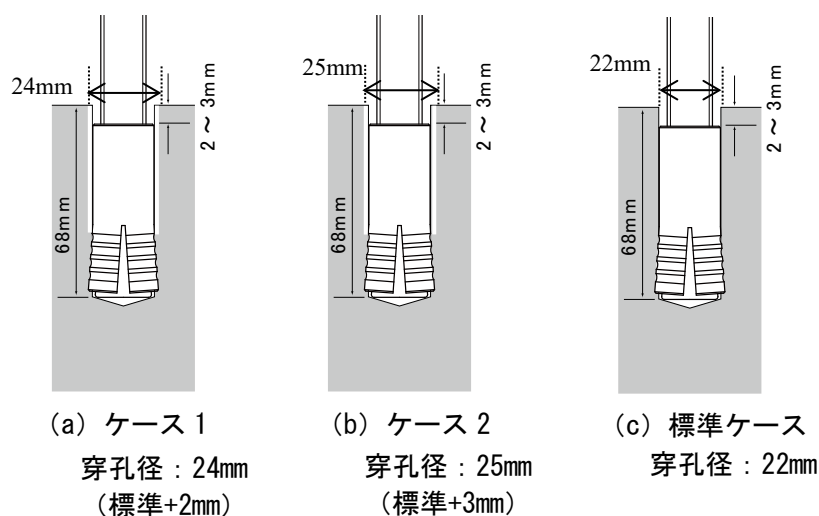


図 5-1 穿孔径を変化させた試験の概要

表 5-1 試験ケース

ケース	穿孔径 (mm)	試験数	母材コンクリートの圧縮強度 (N/mm ²)
1	24 (標準+2)	3	24.6
2	25 (標準+3)	3	
標準	22	6	26.8

径を 24mm (標準+2mm) としたケース 1、穿孔径を 25mm (標準+3mm) としたケース 2 について、試験体を作製し、引張試験を実施した。なお、穿孔深さは 68mm とし、スリーブの上端がコンクリート表面の 2~3mm 下となるまで、スリーブの打込みを行った。別途作製した強度管理用供試体 (φ100mm×h200mm) の圧縮試験により、引張試験実施時の母材コンクリートの圧縮強度は 24.6N/mm² であった。標準ケースでの母材コンクリートの圧縮強度は 26.8 N/mm² であり、各ケースの結果を比較する上で、コンクリート強度の差異は十分に小さいと考えた。

引張試験時の荷重-変位曲線を図 5-2 に示す。また、同図より最大引張荷重を抽出して図 5-3 に示す。まず、穿孔径を 25mm (標準+3mm) としたケース 2 であるが、荷重がほぼゼロのままアンカーが引き抜けた。アンカーのスリーブと母材コンクリートの間で、必要な摩擦力が確保されなかったと考えられる。次に、穿孔径を 24mm (標準+2mm) としたケース 1 であるが、標準ケースに比較して荷重-変位曲線は不規則な変動を示し、全体としては緩やかな勾配で推移した。ケース 1 においては、ケース 2 以

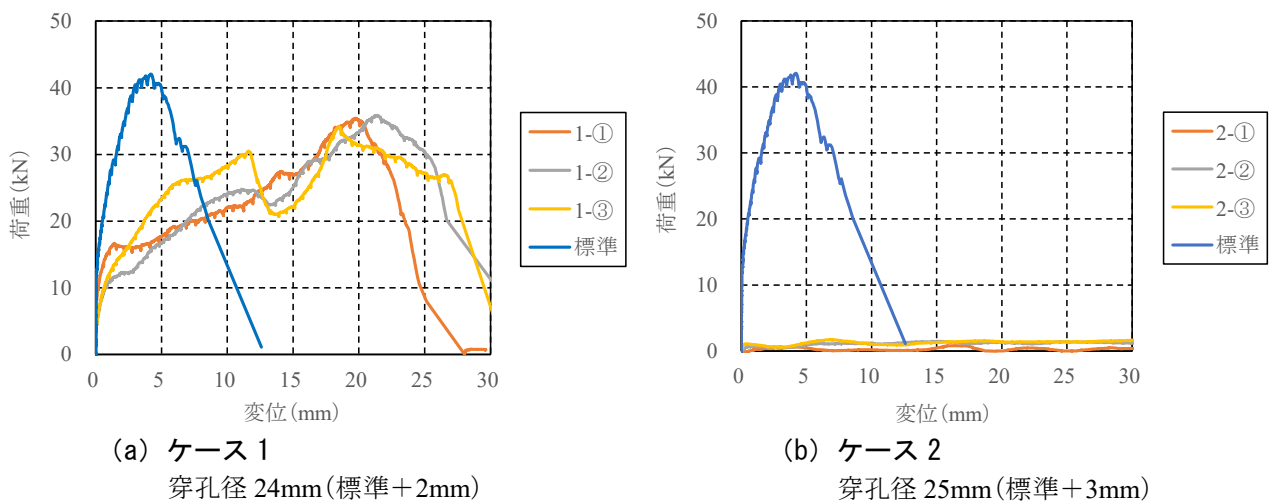


図 5-2 荷重-変位曲線

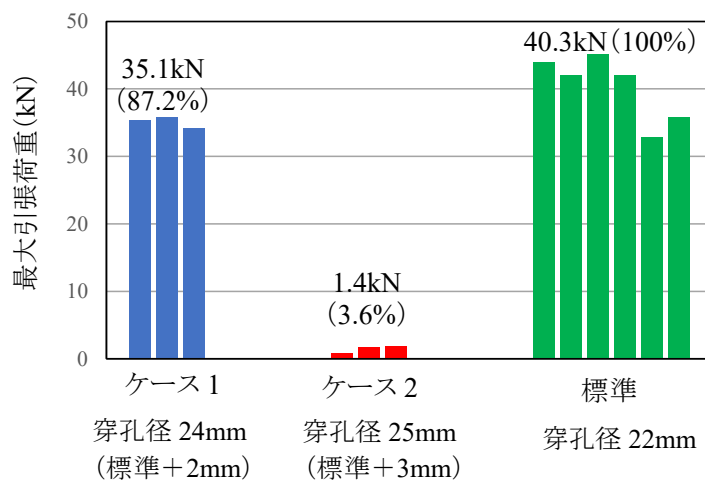


図 5-3 各ケースの最大引張荷重

上の摩擦力は確保されたが、引張荷重に対して大きな変位が発生し、ケース1の最大引張荷重は標準ケースから13%低下した。

試験対象とした金属拡張アンカー（スリーブ打込み式）では、アンカーのスリーブと母材コンクリートの摩擦により定着力を得ている。このため、穿孔径が最大引張荷重や引張時に発生する変位に大きな影響を及ぼすことを確認した。穿孔径は使用するアンカーの仕様に合致させるため、確実な施工管理が必要である。

（2）群配置のアンカーでの検討

道路トンネル換気用ジェットファンの取付けでは金属拡張アンカーが群配置で用いられることが一般的であるが、群配置された金属拡張アンカーの一部に耐荷力特性が低いものが含まれる際の影響については明確ではない。そこで、4本の金属拡張アンカーを群配置した場合を想定し、一部の穿孔径が過大で適切な耐荷力特性を有していないアンカーが含まれたときの影響を引張試験で確認した。

表5-2に示す配合、性状のレディーミクストコンクリートを母材コンクリートに用いて、厚さ300mmの試験体を作製した。試験体は、材齢7日まで湿潤養生、その後材齢28日まで試験室内に静置した。材齢28日以降に表5-3に示す条件で金属拡張アンカー（M16、全長160mm、外径21.7mm、ステンレス製のスリーブ打込み式アンカー）を設置し、引張試験を行った。なお、この金属拡張アンカーの標準的な穿孔径は22mmであるが、過大な穿孔径の孔が含まれた状況を模擬するために、穿孔径24mmの孔を0、1、2、4本分としたケースで引張試験を行った。引張試験は、4.2.1（1）と同じ方法で行った。引張試験の実施状況を写真5-1に示す。

表5-2 母材コンクリートの配合、フレッシュ性状、圧縮強度

水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m ³)					スランブ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度(N/mm ²)	
		水	普通ポルトランドセメント	細骨材	粗骨材	混和剤			材齢28日	引張試験時
52.5	43.3	159	303	792	1068	3.24	8.0	4.4	35.2	39.2

表5-3 群配置の過大な穿孔径の個数を変えた引張試験の検討ケースとアンカー設置条件

試験ケース	アンカーピッチ (mm)	アンカー寸法、設置条件				反力板孔直径 (mm)	試験数
		アンカーボルトのねじの呼び	アンカー外径 D_a (mm)	穿孔径 (mm)	埋込み長さ l (mm)		
4本群配置	90 (1.5 l 、 $<5D_a$)	M16	21.7	22(4本)、24(0本)	60	735	2
				22(3本)、24(1本)			3
				22(2本)、24(2本)			3
				22(0本)、24(4本)			3

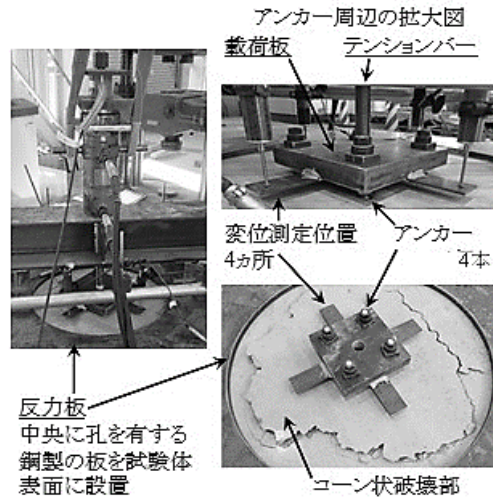


写真 5-1 引張試験の状況（群配置した場合の荷重と変位の測定）

穿孔径が過大なアンカーが含まれる場合の最大引張荷重を図 5-4 に示す。

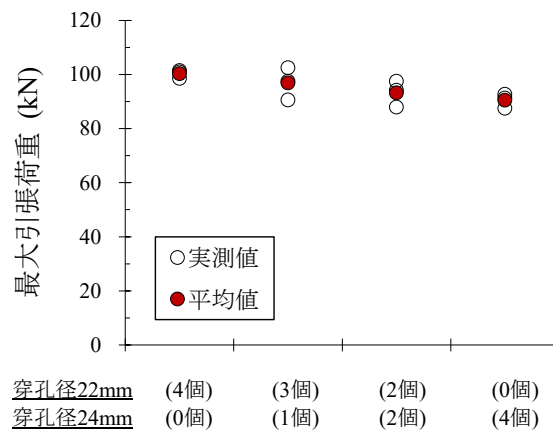
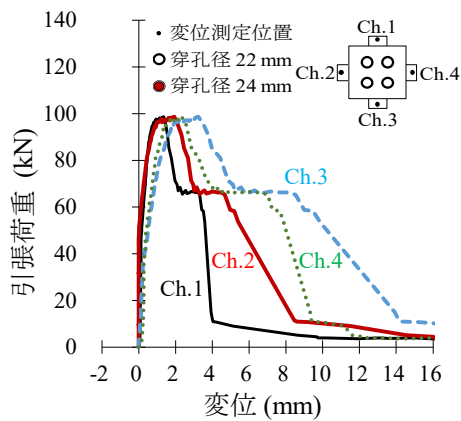


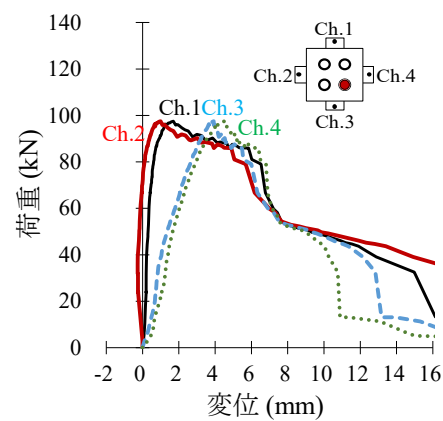
図 5-4 過大な穿孔径（24mm）の数と最大引張荷重の関係

最大引張荷重は、穿孔径が過大なアンカーが増えるほど小さくなった。群配置されたアンカーの最大引張荷重は、複数のアンカーによって分担して負担されるが、一部に過大な穿孔径の孔が含まれると最大引張荷重が低下するため、適切な穿孔作業は重要である。

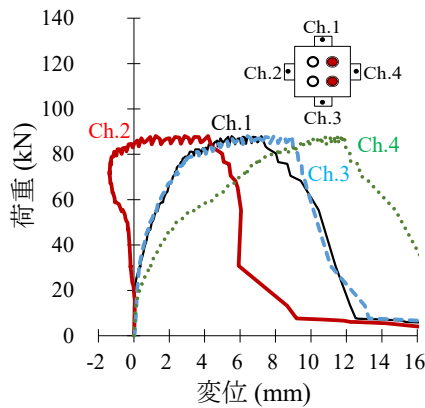
次に、アンカー設置用の孔に過大な穿孔径の孔が含まれる場合の荷重－変位曲線の例を図 5-5 に示す。この図には、4 ヲ所で測定した荷重－変位曲線を示し、各アンカーの孔の穿孔径と変位の測定位置を併記した。また、この図の荷重は、写真 5-1 に示したテンションバーに作用させた引張荷重である。



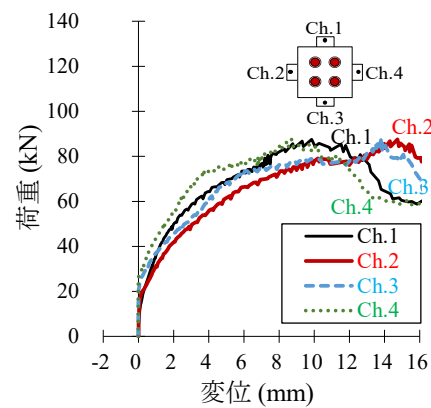
(a) 過大な穿孔径なし



(b) 1箇所過大な穿孔径



(c) 2箇所過大な穿孔径



(d) 4箇所過大な穿孔径

図 5-5 アンカー設置用の孔に過大な穿孔径の孔が含まれる場合の荷重－変位曲線の例

全ての孔の穿孔径を 22 mm としたケース (図 5-5(a)) と過大な 24 mm としたケース (図 5-5(d)) では、他のケースと比較して、最大荷重時まで 4 箇所の変位-荷重曲線の差が小さかった。しかし、図 5-5(d) では、図 5-5(a) と比較して、最大荷重時の変位が大きくなった。スリーブが母材コンクリートの孔壁に適切に固着されず、荷重作用時のアンカーの引抜き量が大きくなったと考えられる。

一方、穿孔径 24 mm の孔の数を 1 個あるいは 2 個とした図 5-5(b) と図 5-5(c) では、穿孔径 24 mm の孔に近い位置の変位計の値が大きくなった。すなわち、図 5-5(b) では Ch.3 と Ch.4、図 5-5(c) では Ch.4 の変位が大きくなった。群配置されたアンカーで一部の設置用の孔の穿孔径が過大となると、この孔の周辺で変位が大きくなり、引張荷重が偏心して各アンカーに作用する可能性があると考えられる。この結果からも、スリーブ打込み式の金属拡張アンカーを使用する際には、設置用の孔の穿孔作業を適切に行うことは重要である。

5.1.2 穿孔深さの影響

あと施工アンカーの施工において、穿孔時の穿孔深さが最大引張荷重に及ぼす影響を評価するため、穿孔深さを変化させた引張試験を実施した。試験の概要を図 5-6 に、試験ケースを表 5-4 に示す。試験に使用した M16 の金属拡張アンカー（スリーブ打込み式）のスリーブ長は 60mm であり、この場合、メーカーが推奨する穿孔深さは 68mm である。本試験では、穿孔深さを 68mm とした標準ケースに対し、穿孔深さを 48mm（標準-20mm）としたケース 1、穿孔深さを 88mm（標準+20mm）としたケース 2 について試験体を作製し、引張試験を実施した。別途作製した強度管理用供試体（φ100mm×h200mm）の圧縮試験により、引張試験実施時の母材コンクリートの圧縮強度は 24.6N/mm² であった。標準ケースでの母材コンクリートの圧縮強度は 26.8 N/mm² であり、各ケースの結果を比較する上で、コンクリート強度の差異は十分に小さいと考えた。

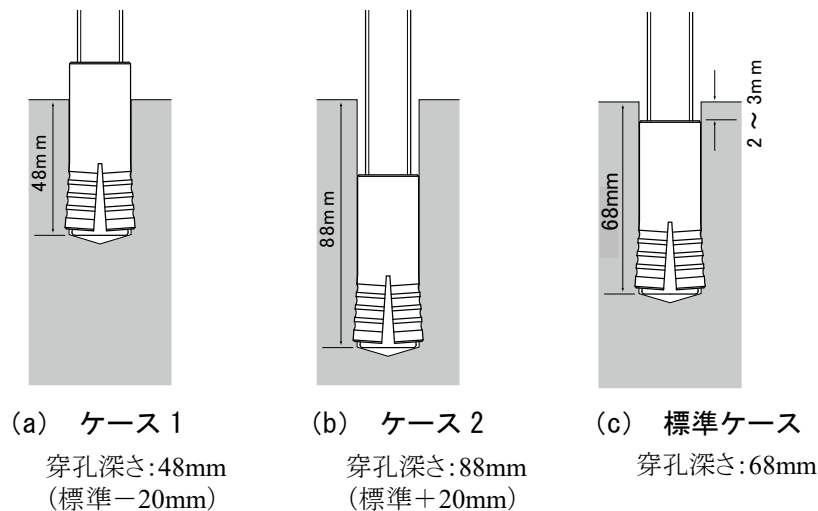


図 5-6 穿孔深さを変化させた試験の概要

表 5-4 試験ケース

ケース	穿孔長 (mm)	試験数	母材コンクリートの 圧縮強度 (N/mm ²)
1	48 (標準-20)	4	24.6
2	88 (標準+20)	4	
標準	68	6	26.8

引張試験により得られた荷重-変位曲線を図 5-7 に示す。また、同図より最大引張荷重を抽出して図 5-8 に示す。図 5-7 より、荷重-変位曲線における勾配は、ケース 1、2 とともに標準ケースと比較して有意な差は無いと言える。一方、図 5-8 より最大引張荷重に着目すると、ケース 1 の最大引張荷重は標準ケースに比較して 37%低下した。逆に、ケース 2 の最大引張荷重は標準ケースを 32%上回った。穿孔深

さが大きいほど、コーン状破壊面の有効水平投影面積が大きくなり、その結果、最大引張荷重が増加したためと考えられる。

以上、試験対象とした金属拡張アンカー（スリーブ打込み式）では、最大引張荷重と穿孔深さ、すなわち埋込み長が正の相関関係にあることが確認された。ただし、穿孔深さを標準よりも長くすることで、スリーブの打込みの精度が低下してスリーブが十分に拡張されず、母材コンクリートとの定着に不具合が生じる可能性も考えられる。メーカーが推奨する標準の穿孔深さで穿孔し、スリーブを確実に定着させることを原則とすべきであると考えられる。

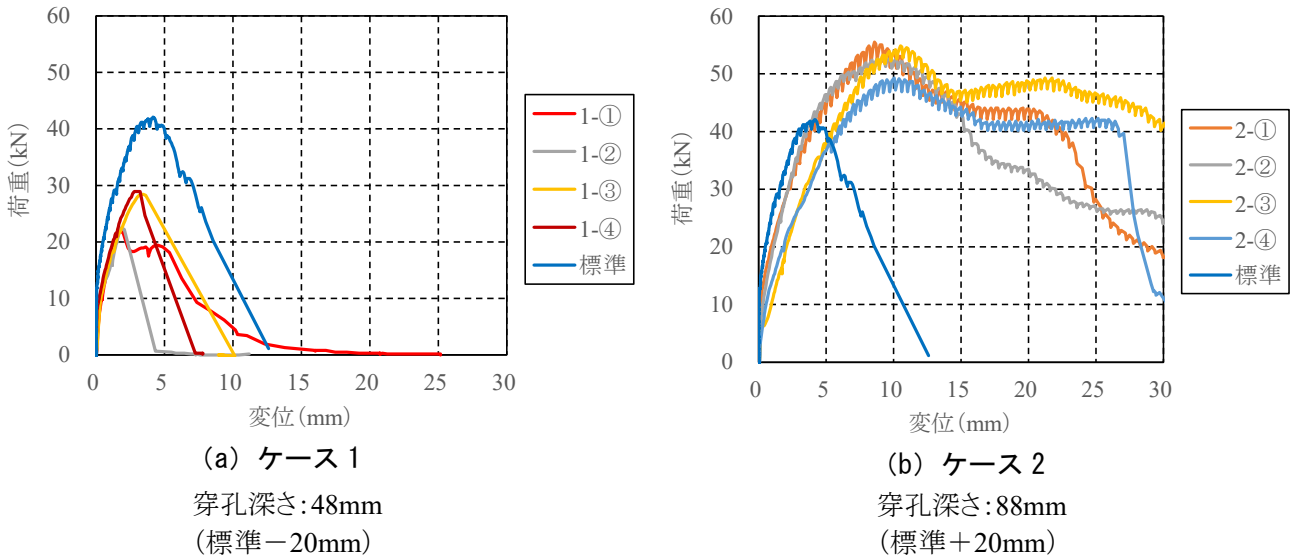


図 5-7 荷重－変位曲線

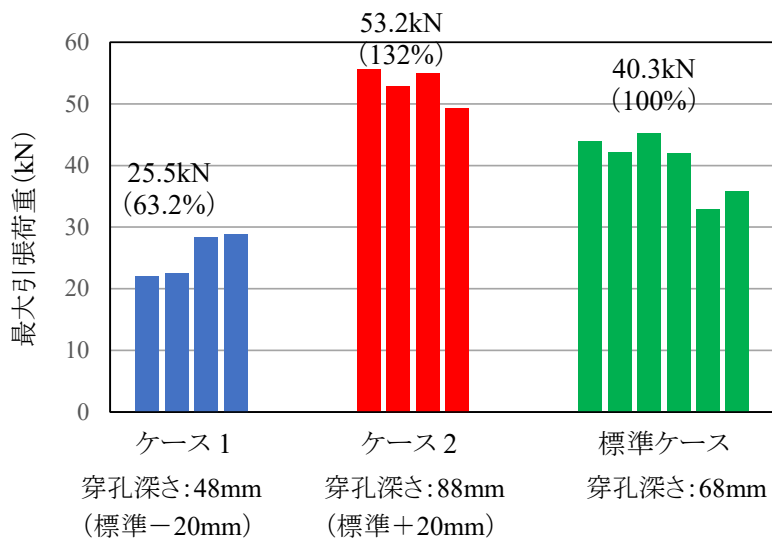


図 5-8 最大引張荷重

5.1.3 アンカーの埋込み不足の影響

あと施工アンカーの施工において、金属拡張アンカーのスリーブの埋込み不足が最大引張荷重に及ぼす影響を評価するため、埋込み長さを変化させた引張試験を実施した。試験の概要を図 5-9 に、試験ケースを表 5-5 に示す。M16 の金属拡張アンカー（スリーブ打込み式）の場合、標準の穿孔深さ 68mm まで穿孔した後、アンカーを孔に設置し、スリーブ上端がコンクリート表面から 2～3mm 程度下方となるまでアンカーを埋め込む。これに対し、本試験では、コンクリート表面から 5mm 程度スリーブが突出した状態で埋込みを終了した。なお、このときアンカーを触診したところぐらつきが確認された。別途作製した強度管理用供試体（φ100mm×h200mm）の圧縮試験により、引張試験実施時の母材コンクリートの圧縮強度は 26.8N/mm²であった。同時期に標準ケースの引張試験を行っており、母材コンクリートの強度に差異は無かったと考えられる。

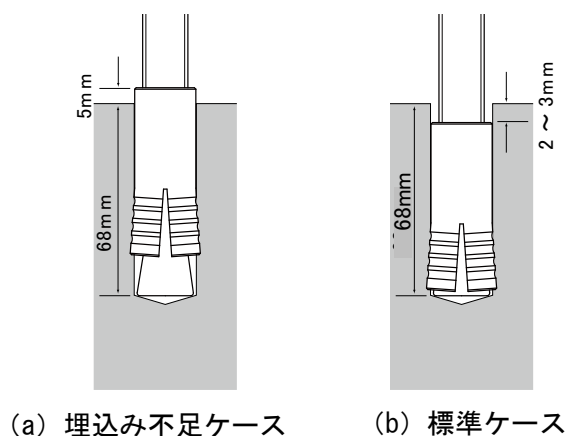


図 5-9 埋込み長さを変化させた試験の概要

表 5-5 試験ケース

ケース	スリーブの上端位置	試験数	母材コンクリートの圧縮強度(N/mm ²)
埋込み不足	コンクリート表面 +5mm	3	26.8
標準	コンクリート表面 -2～3mm	6	26.8

引張試験により得られた荷重-変位曲線を図 5-10 に示す。また、同図より最大引張荷重を抽出して図 5-11 に示す。図 5-10 より、標準ケースに比較して、埋込み不足のケースでは、荷重-変位曲線の勾配が緩慢となり、これはスリーブが十分に拡張していないため、スリーブとコンクリート間で滑りが生じたためと考えられる。一方で、試験後のアンカーの状態を確認すると、アンカーボルト先端部のコーンはスリーブの内部に潜り込んでいた。引張载荷に伴い、アンカーボルト先端部がスリーブに潜り込むようにスリーブを拡張させ、最終的にスリーブは十分に拡張したものと考えられる。ただし、図 5-11 に

示す通り、埋込み不足のケースの最大引張荷重は、標準のケースに比較して20%程度低下した。スリーブが十分に拡張するまでに、スリーブの下端が上昇するため、コーン状破壊面の水平投影面積が小さくなり、最大引張荷重の低下につながったものと考えられる。

以上、試験対象とした金属拡張アンカー（スリーブ打込み式）では、アンカーの埋込みが不足することで、最大引張荷重が低下することが分かった。また、スリーブが母材コンクリートから突出することで、例えばジェットファンの取付けに用いられる吊り金具の設置の妨げとなる恐れが考えられる。アンカーが十分に埋め込まれるよう、確実な施工管理が必要である。なお、埋込みが不十分な場合、触診によりアンカーのぐらつきが認められた。よって実際の点検の現場では、触診により同様の施工の不具合を検知できる可能性があると考えられる。

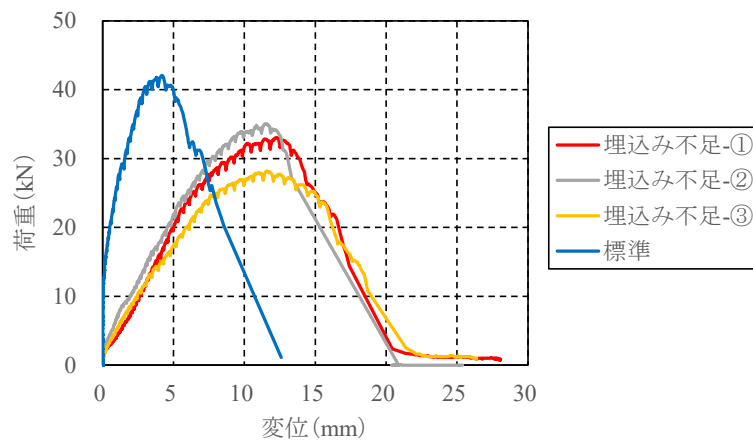


図 5-10 荷重－変位曲線

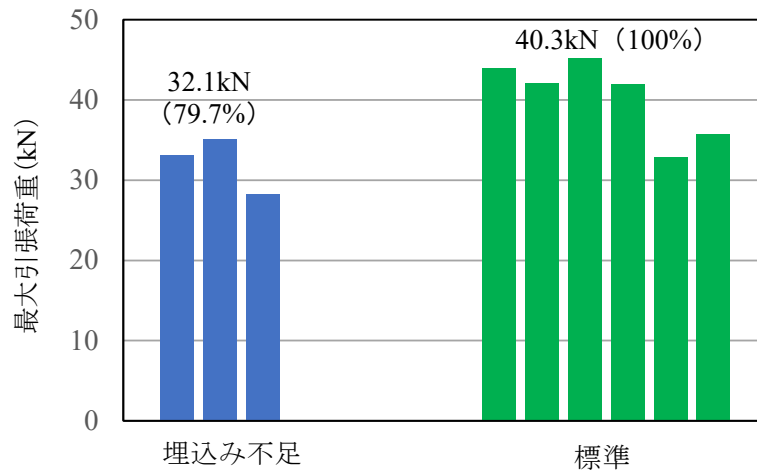


図 5-11 最大引張荷重

5.1.4 孔内の清掃不足の影響

あと施工アンカーの施工において、穿孔作業後に孔内を十分清掃してから、アンカーを設置する必要がある。ここで、穿孔作業後の孔内清掃が不十分であった場合、最大引張荷重に及ぼす影響を評価するため、穿孔作業後に孔内の清掃を十分に行った場合と全く行わなかった場合で引張試験を実施した。試験の概要を図 5-12 に、試験ケースを表 5-6 に示す。M16 の金属拡張アンカー（スリーブ打込み式）の場合、標準の穿孔深さは 68mm である。母材コンクリートと同配合のレディーミクストコンクリートで同時に別途作製した強度管理用供試体（φ100mm×h200mm）の圧縮試験により、引張試験時の母材コンクリートの圧縮強度は 33.8 N/mm² であった。

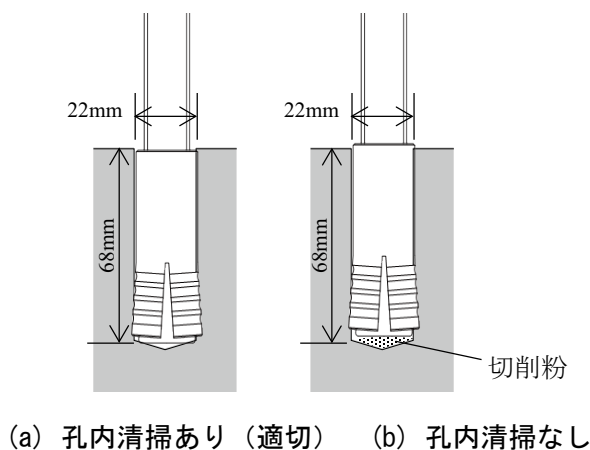


図 5-12 孔内清掃の有無による試験の概要

表 5-6 試験ケース

ケース	試験数	母材コンクリートの 圧縮強度 (N/mm ²)
孔内清掃あり	4	33.8
孔内清掃なし	4	33.8

引張試験により得られた荷重－変位曲線を図 5-13 に示す。また、同図より最大引張荷重を抽出して図 5-14 に示す。図 5-13 より、清掃ありの場合と比較して、清掃なしの場合では、荷重－変位曲線の勾配はほとんど同等であった。ただし、図 5-14 に示す通り、清掃なしの場合の引張耐力は、清掃ありの場合と比較して 23%程度低下した。写真 5-2 に例示したように、清掃なしの場合には、穿孔作業時に生じた切削粉が孔内の底に蓄積しており、アンカー先端のスリーブが孔内に適切に挿入されず、母材コンクリート表面に突出した状態であった。この結果、アンカー先端部の位置が浅くなり、すなわち埋込長さ l や有効埋込長さ l_e が小さくなり、最大引張荷重が低下したと考えられる。

以上、試験対象とした金属拡張アンカー（スリーブ打込み式）では、5.1.3 と同様に、スリーブの打込みが不足することで、最大引張荷重が低下することが分かった。スリーブが十分に打ち込めるよう、確実な施工管理が必要である。

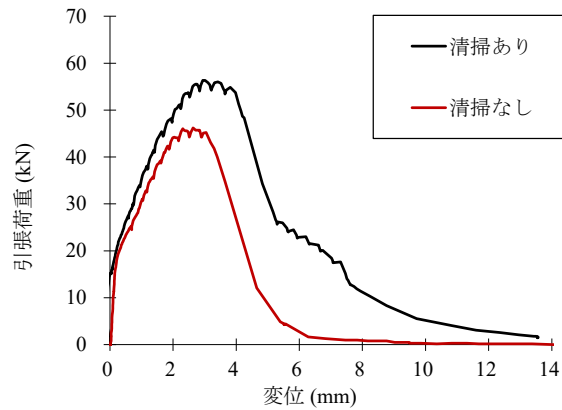


図 5-13 荷重—変位曲線

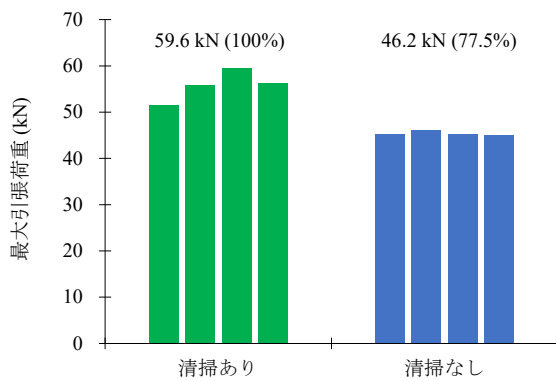


図 5-14 最大引張荷重

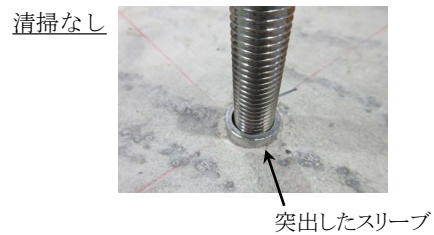
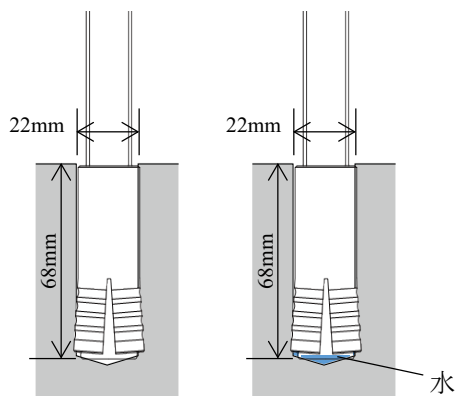


写真 5-2 アンカー設置状況の例

5.1.5 孔内の湿潤の影響

あと施工アンカーの施工において、孔内が水で浸された場合、最大引張荷重に及ぼす影響を評価するため、孔内の清掃を十分に行った後に孔内に水がない場合と水で完全に浸した場合で引張試験を実施した。試験の概要を図 5-15 に、試験ケースを表 5-7 に示す。M16 の金属拡張アンカー（スリーブ打込み式）の場合、標準の穿孔深さは 68mm である。母材コンクリートと同配合のレディーミクストコンクリートで同時に別途作製した強度管理用供試体（φ100mm×h200mm）の圧縮試験により、引張試験時の母材コンクリートの圧縮強度は 33.8 N/mm² であった。



(a) 孔内乾燥 (適切) (b) 孔内湿潤

図 5-15 孔内湿潤の有無による試験の概要

表 5-7 試験ケース

ケース	試験数	母材コンクリートの 圧縮強度 (N/mm ²)
孔内湿潤なし	4	33.8
孔内湿潤あり	4	33.8

引張試験により得られた荷重－変位曲線を図 5-16 に示す。また、同図より最大引張荷重を抽出して図 5-17 に示す。図 5-16 より、孔内乾燥の場合と比較して、孔内湿潤の場合では、荷重－変位曲線の勾配はほとんど同等であった。また、図 5-17 に示す通り、孔内湿潤の場合の最大引張荷重は、孔内乾燥の場合と同程度であった。今回の試験の結果からは、孔内が湿潤の状態であっても最大引張荷重は低下せず、影響はほとんど確認されなかった。

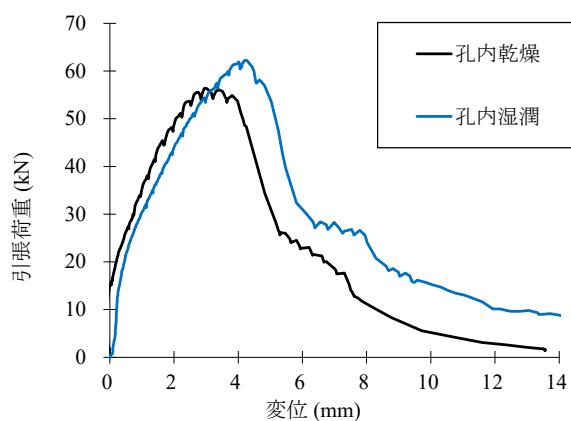


図 5-16 荷重－変位曲線

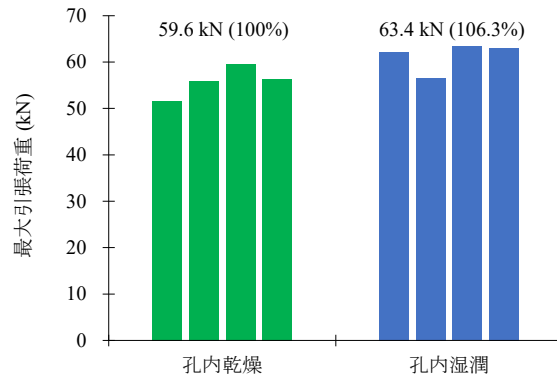


図 5-17 最大引張荷重

5.2 母材コンクリートの影響

5.2.1 母材コンクリート強度の影響

母材コンクリートに設置したあと施工アンカーに引張荷重を与えた際、破壊モードがコーン状破壊の場合は、式(2.2)または式(2.5)にも示すように、コンクリートの設計基準強度の関数となっていることから、母材コンクリート強度が増加すると、コーン状破壊耐力も増加する傾向を示す。ただし、表 5-8 に示すように、各基準類で母材コンクリートに求められる設計基準強度の範囲が定められている^{5.1), 5.2), 5.3), 5.4), 5.5)}。また、金属拡張アンカーの場合は、高強度コンクリートの場合は拡張部が拡張しにくくなり、打込み不足になることが報告されている^{5.1), 5.4), 5.5)}。さらに、他の破壊モードで破壊する場合も考えられる。そこで、母材コンクリートの強度が最大引張荷重に及ぼす影響を評価するため、母材コンクリートの強度を変化させて引張試験を実施した。試験ケースを表 5-9 に示す。試験には M16 の金属拡張アンカー（スリーブ打込み式）を用いた。また、母材コンクリートの圧縮強度は、同じコンクリートで別途作製した円柱供試体を用いて、引張試験と同時に測定したものである。

表 5-8 母材コンクリートに求められる設計基準強度

母材コンクリート	使用骨材		設計基準強度 (N/mm ²)		
	粗骨材	細骨材	土木学会	日本建築学会	日本建築あと施工アンカー協会
普通コンクリート	砂利、碎石	砂、砕砂	18 以上 ただし 36 超は要確認	18~30	18~36 (実強度 16~40 程度)

表 5-9 試験ケース

ケース (母材コンクリートの圧縮強度 (N/mm ²))	試験数
17.7	3
23.8	3
23.9	3
31.3	3
39.2	4
39.4	4

引張試験により得られた、母材コンクリート圧縮強度（引張試験時）と最大引張荷重の関係を図 5-18 に示す。

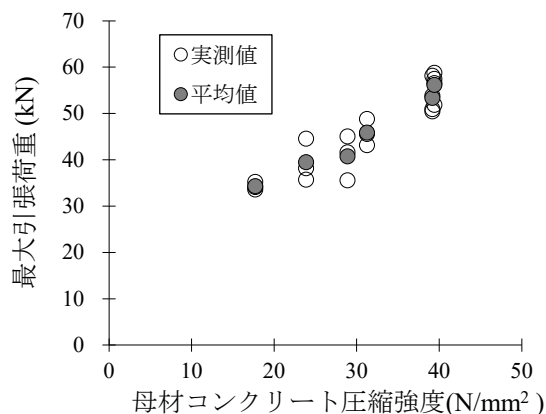


図 5-18 母材コンクリート圧縮強度と最大引張荷重の関係

今回の試験では、母材コンクリートの圧縮強度が表 5-8 の範囲外となるものも含まれたが、この範囲から大きく外れるものではなかった。その結果、今回の試験の範囲では問題なく、スリーブを打込み、アンカーを固着することができた。また、全てのアンカーの破壊モードはコーン状破壊であった。そのため、図 5-18 より、母材コンクリート圧縮強度が増加すると、最大引張荷重が増加した。

母材コンクリートの圧縮強度が表 5-8 の範囲から大きく外れる場合については今回確認できなかったが、先述したように、例えば強度が大きくなりすぎるとアンカーの拡張部が拡張しにくくなって打込み不足になることが報告されているため、注意が必要である。

5.2.2 コンクリート骨材の偏りの影響

母材コンクリートの骨材の偏りがアンカーの最大引張荷重に及ぼす影響を評価するため、コンクリートの粗骨材量を変化させた室内引張試験を行った。コンクリートの配合は標準の 18-12-40-N としたが、粗骨材を密にした試験ケースでは、写真 5-3 に示すように、アンカーの設置予定箇所付近に粗骨材のみを 70kg 投入し、残りを標準のコンクリートで埋め、表面が豆板に見えない程度になるまで軽くバイブレータをかけた。粗骨材を疎にした試験ケースでは、写真 5-3 に示すように、コンクリート打設時、20mm のふるいを用いて粗骨材を 265kg 撤去し、標準配合より 65%少ない状態とした。その後、両ケースとも M16 の金属拡張アンカー（スリーブ打込み式、スリーブ長 60mm）を打設した。穿孔深さは 68mm を標準としてきたところ、上述の特殊な方法でコンクリートを打設したため、容易に引き抜けないよう、本試験では 100mm とした。また、引張試験の実施日に円柱形のコンクリート強度管理用供試体の圧縮試験を実施した結果、その圧縮強度は 20N/mm²であった。以上より、この骨材の偏りに着目した引張試験では、標準ケース（穿孔深さ：68mm、コンクリート強度：27N/mm²）と条件が異なるため、標準ケース

の最大引張荷重との比較は行わない。

両ケースとも3本のアンカー（①、②、③）を用いて引張試験を実施し、それにより得られた荷重－変位曲線を図5-19に示す。同図より、粗骨材が密なケースは、粗骨材が疎なケースよりも最大引張荷重が大きくなる傾向が認められた。ただし、粗骨材を密としたケースのアンカー②では、載荷直後に変位が大きく生じており、アンカーが抜け出したものと考えられる。粗骨材が密集した箇所では部分的に空隙が生じており、当初、アンカーとコンクリートの間で十分な摩擦が確保されておらず、拡張部が粗骨材に当たるまでの間、抜け出したものと想定される。

粗骨材を疎にした試験ケースでは、密にした試験ケースに比較し、最大引張荷重が小さかった。また、疎にしたケースでは、設置したアンカーを触診すると、3本ともぐらつきがあった。粗骨材が少ないことで、穿孔時やスリーブ打込み時、細粒分が削られ、緩みが生じたものと想定される。また、触診により、このような異常が把握できる可能性が考えられた。

以上、標準の配合よりも粗骨材を密にしたケース、疎にしたケースともに、最大引張荷重の低下やアンカーの抜け出しの要因となり得ることが認められた。よって適切な配合でコンクリートを打設し、確実な締固めを行うことが重要であると言える。

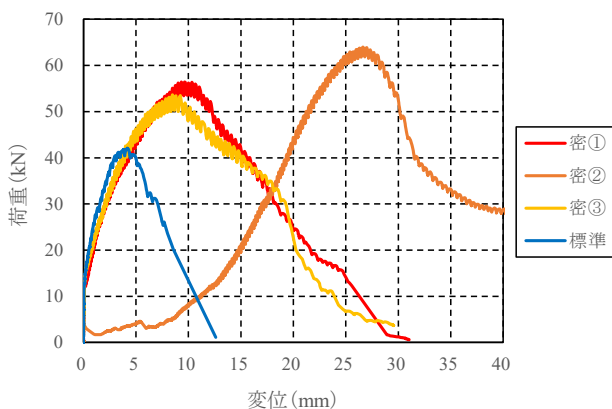


(a) 粗骨材：密

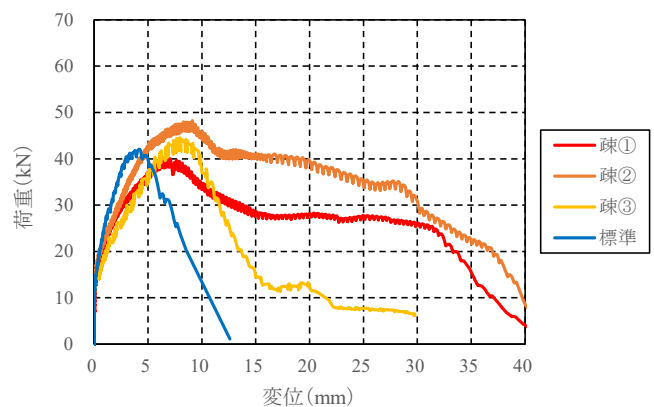


(b) 粗骨材：疎

写真 5-3 骨材の偏りを模擬したコンクリートの打設状況



(a) 粗骨材：密



(b) 粗骨材：疎

図 5-19 荷重－変位曲線

5.3 施工の不具合があと施工アンカーの耐荷力特性に及ぼす影響に関するまとめ

本章では主に現状でほとんどのジェットファンの取付けに用いられている金属拡張アンカー（スリーブ打込み式）を対象に、種々の施工の不具合を模擬した条件で引張試験を行い、施工の不具合が金属拡張アンカーの耐荷力特性に及ぼす影響を評価した。その結果を以下に整理し、施工上の留意事項について記述する。

- (1) 穿孔径が当該アンカーの所定の値よりも大きくなることで（本実験では 2～3mm 過大とした）、アンカーのスリーブ拡張部とコンクリート間の摩擦が不十分となり、引張荷重にほぼ抵抗することなくアンカーが引き抜ける状況等が確認された。穿孔径は所定の値を超過しないよう留意する必要がある。さらに、群配置した 4 本のアンカーのうち、一部の穿孔径を過大とし、アンカー群の引張試験を実施した結果からは、穿孔径を過大としたアンカーの本数が増えるにつれて最大引張荷重が低下したり、穿孔径を過大としたアンカーの引抜き量が大きくなって荷重が偏心して作用したりする傾向が確認された。
- (2) 穿孔深さが所定の長さより短くなることで、アンカーのコーン状破壊面の有効水平投影面積が減少し、最大引張荷重が低下した。一方、穿孔深さが所定の長さより長くなることで、最大引張荷重が増大したが、スリーブの打込みの精度の低下や維持管理段階でのアンカー抜出しの発見の遅れが懸念される。穿孔深さは所定の長さとなるよう留意する必要がある。
- (3) スリーブの打込みが不十分で、アンカーが埋込み不足となる場合、引張載荷時の荷重－変位曲線の勾配が緩慢となり、最大引張荷重が 2 割程度低下した。これはスリーブが十分拡張されず、固着が不十分となったためと考えられた。スリーブを確実に打ち込むよう留意する必要がある。また、本試験において、コンクリート面からのスリーブの突出の有無を近接目視で確認したり、アンカーのぐらつきを触診で確認したりすることで、アンカーの埋込み不足の有無が把握された。アンカーの点検において、スリーブの突出やアンカーのぐらつきに着目して、近接目視・触診を行うことは、アンカーの埋込み不足を確認する上で有効かつ重要である。
- (4) 穿孔作業後の孔内の清掃が不十分な場合、切削粉が孔内底部に残存したため、アンカーの埋込み不足が生じ、最大引張荷重の低下が生じた。また、残存した切削粉により壁面の摩擦が低下した可能性も考えられた。穿孔作業後は清掃を適切に行なわなければならない。
- (5) 母材コンクリートの圧縮強度を 18～40N/mm² とした、ここでの引張試験では、圧縮強度とアンカーの最大引張荷重の間で正の相関が認められた。一方、例えば「コンクリートのあと施工アンカー工法の設計・施工・維持管理指針（案）」等では、コンクリートの圧縮強度が高い場合、あと施工アンカーが適切に固着できず、想定した耐力を得ることができないことがあると記されており、

留意する必要がある。

- (6) 母材コンクリートの粗骨材の分布を偏らせ、過度に密または疎とした場合、いずれも最大引張荷重の顕著な低下は認められなかったものの、引張荷重に伴う変位が増大する傾向が認められた。粗骨材が密な場合、部分的に空隙が生じて摩擦が得られないことや、粗骨材が疎な場合、穿孔やスリーブの打込み時、細骨材が削られてアンカーに緩みが生じたものと想定された。今回実施した実験条件においては発生しなかったが、母材コンクリートの粗骨材密度の偏りは、疎・密ともに、特にアンカーの引抜き破壊の発生の可能性を高めるものと考えられるため、適切な配合でコンクリートを打設し、締固めに際しては材料分離しないよう留意する必要がある。

参考文献

- 5.1) 公益社団法人土木学会：コンクリートのあと施工アンカー工法の設計・施工・維持管理指針（案）、コンクリートライブラリー160、pp.44～47、2022.1
- 5.2) 一般社団法人日本建築あと施工アンカー協会：あと施工アンカー施工指針（案）、【接着系/カプセル方式】、pp.17～18、2019.10
- 5.3) 一般社団法人日本建築あと施工アンカー協会：あと施工アンカー施工指針（案）、【接着系/注入方式/カートリッジ型】-ミキシングノズル式（有機系）-、p.17、2019.10
- 5.4) 一般社団法人日本建築あと施工アンカー協会：あと施工アンカー施工指針（案）、【金属系】、p.16、2019.10
- 5.5) 一般社団法人日本建築学会：各種合成構造設計指針・同解説、2010年改訂版、p.321、2010.11

6. 供用開始後の不具合があと施工アンカーの耐荷力特性に及ぼす影響

6.1 母材コンクリートの不具合がアンカーの耐荷力特性に及ぼす影響

6.1.1 ジェットファン等附属物の取付け部近傍での覆工コンクリートのひび割れの実態

前章では、アンカーや母材コンクリートとなる覆工について、施工段階での不具合がアンカーの耐荷力特性に及ぼす影響を引張試験により評価した一連の結果を示した。一方、覆工では、供用開始後に外力や材質劣化によってひび割れ等の変状が発生し、ひび割れ幅や長さが進展する場合もある。表 6-1 に示すように、覆工の主な変状原因は外因と内因に分類され、それらの変状原因が複合的に作用して変状が発生し、顕在化する場合が多いとされている。

トンネル内附属物の設置時には、設置箇所の覆工に不具合が無いことが注意深く確認されるものと考えられる。一方、上述の通り、供用開始後に覆工にひび割れ等が生じる可能性があり、道路トンネル定期点検要領^{6.2)}の附属物の異常判定区分に関する留意点においても「アンカーボルト付近に生じた覆工コンクリートのひび割れが脱落の原因のおそれがあることに留意する」との記述がある。

一方、母材コンクリートのひび割れがアンカーの耐荷力特性に及ぼす影響の程度については、未解明な点が多く、点検・診断を困難なものとしていることが考えられる。そこで、ひび割れやひび割れ補修工を模擬したコンクリート試験体を作製し、引張試験によりそれらがアンカーの耐荷力特性に及ぼす影響を評価した。

表 6-1 覆工の変状原因^{6.1)}

			変状原因
外因	外力	地形・地質	緩み土圧, 膨張性土圧, 編土圧・斜面のクリープ, 地すべり, 支持力不足
		地下水	水圧, 凍上圧
		その他	近接施工, 地震, 地殻変動等
	環境	経年	経年劣化(中性化), 鋼材腐食
		地下水	漏水, 凍害
		劣化促進	塩害, 有害水
		その他	火災等
内因	材料	骨材, セメント	セメントの異常凝結, 水和熱(温度応力), 低品質骨材, 反応性骨材等
		コンクリート	ブリーディング, 乾燥収縮等
	施工	コンクリートの施工	打込み不良, 締固め不足, 養生不良, 巻厚不足, 背面空洞残存等
		鉄筋組立て	配筋の乱れ, かぶり不足等
		型枠	型枠変形, 早期脱型, 支保工の沈下等
	設計		インバートなし, 地すべり対策, 支持力対策等への考慮不足

6.1.2 母材コンクリートのひび割れがアンカーの耐荷力特性に及ぼす影響

(1) 試験概要

母材コンクリートのひび割れがアンカーの耐荷力特性に及ぼす影響を評価するため、ひび割れの幅及びアンカー設置位置～ひび割れの離隔をパラメータとした引張試験を実施した^{6.3)}。試験ケースを表 6-2 及び表 6-3 に示す。アンカー設置位置から離隔をとってひび割れを導入した状況を写真 6-1 に示す。使用したアンカーは、4 章及び 5 章で示した引張試験でも使用した M16 の金属拡張型アンカー（スリーブ打込み式、スリーブ長 60mm）である。ひび割れは、セリ矢を打ち込むことにより導入し、アンカーを設置した後、ひび割れ幅が 1.5mm となるまでクラックスケールにより管理しながら追加の打込みを行った。母材コンクリートの圧縮強度はいずれのケースでも 34N/mm² 程度であった。

表 6-2 ひび割れ幅をパラメータとした試験ケース

ケース	導入するひび割れ幅の目標値	ひび割れ幅実測値(mm)	試験数
1	ひび割れ無し	—	4
2	0.2mm 未満	0.10～0.20	6
3	0.5mm 程度	0.40～0.60	6
4	1.0mm 程度	0.90～1.10	6
5	1.5mm 程度	1.30～1.50	6

表 6-3 アンカー設置位置～ひび割れの離隔をパラメータとした試験ケース

ケース	アンカー設置位置～ひび割れの離隔 (ひび割れ幅: 1.5mm)	試験数
1	ひび割れ無し	4
6	30mm	6
7	60mm	6

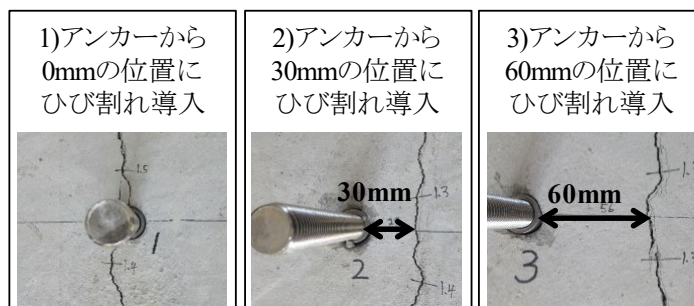


写真 6-1 アンカー設置位置から離隔を取ったひび割れの導入状況

(2) ひび割れ幅の影響

ひび割れ幅をパラメータとした引張試験において、得られた代表的な荷重－変位曲線を図 6-1 に示す。ひび割れ幅が大きいケースほど荷重－変位曲線の勾配が緩やかとなった。同図より最大引張荷重を抽出し、アンカーの最大引張荷重とひび割れ幅の関係を図 6-2 に示す。ばらつきを有する試験結果ではあるが、ひび割れ幅が大きくなるにつれて、最大引張荷重が低下する傾向が認められた。また、母材コンクリートの破壊状況を写真 6-2 に示すが、ひび割れ幅が 0.2mm 未満のケースでは、ひび割れの両側でコーン状破壊が生じたのに対し、ひび割れ幅が 1.0mm 程度以上のケースでは、ひび割れの片側のみでコーン状破壊が生じることが多くあった（以降、半コーン状破壊と称する）。以上より、本節で示した試験条件においては、特にひび割れ幅が 1.0mm 程度以上となる場合、アンカーのスリーブ部と母材コンクリート間での摩擦が低下し、母材コンクリートの引張抵抗がひび割れの左右両側で均等に得られ難くなり、アンカーの最大引張荷重の低下が顕著となることが分かった。

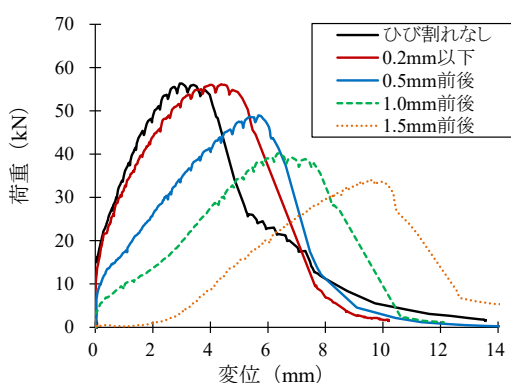


図 6-1 荷重－変位曲線

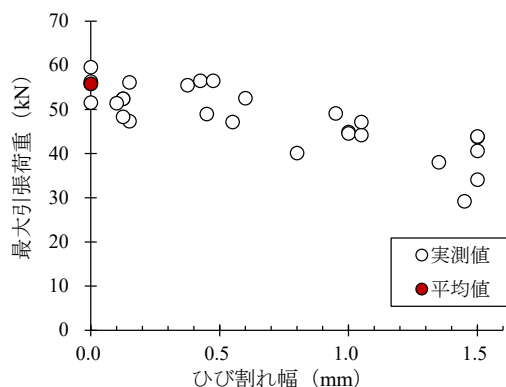
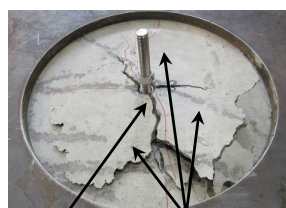
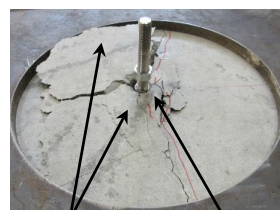


図 6-2 アンカーの引抜き耐力とひび割れ幅の関係



導入したひび割れ コーン状破壊

(a) ひび割れ幅:0.2mm 以下



コーン状破壊 導入したひび割れ

(b) ひび割れ幅:1.0mm 程度

写真 6-2 母材コンクリートの破壊形状

(3) アンカー設置位置とひび割れの離隔の影響

アンカー設置位置とひび割れの離隔をパラメータとした引張試験において、得られた代表的な荷重－変位曲線を図 6-3 に示す。同図より最大荷重を抽出し、アンカーの最大引張荷重とひび割れとの離隔の関係を図 6-4 に示す。同図には、各ケースでの最大引張荷重の平均値と、母材コンクリートにひび割れが無いケースでの最大引張荷重の平均値 (55.8kN) を 100%としたときの比率を示した。ばらつきを有する試験結果ではあるが、ひび割れがアンカーの設置位置にあるケース、アンカーの設置位置から離れた位置にあるケースともに、最大引張荷重が 3～4 割低下することが分かった。離隔が 30mm のケース 6 での母材コンクリートの破壊状況の一例を写真 6-3 に示すが、導入したひび割れの影響を受けて、半コーン状破壊となっていたことが分かった。ひび割れがコーン状破壊の有効水平投影面の内側にある場合、コンクリートの引張抵抗が確保できず、最大引張荷重を低下させ得るものと考えられた。以上、アンカーの設置位置にひび割れが認められない場合でも、アンカーの周囲にひび割れが生じていれば最大引張荷重が低下することから、附属物の取付状態の点検において、アンカー周辺のひび割れの有無についても入念に点検されるべきであると言える。

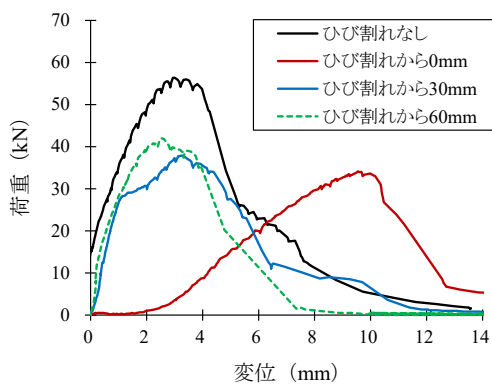


図 6-3 荷重－変位曲線

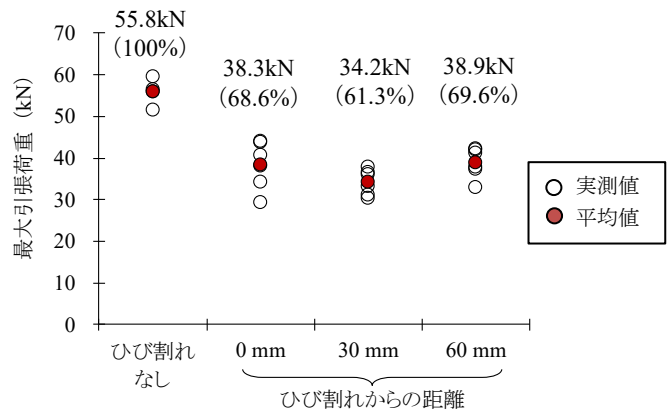
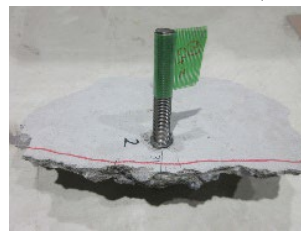


図 6-4 アンカーの最大引張荷重とひび割れからの離隔の関係



コーン状破壊 導入したひび割れ

(a) 視点:上方



(b) 視点:側方

写真 6-3 アンカー設置位置とひび割れの離隔が 30mm のケースでの母材コンクリートの破壊状況

6.2 トンネルの補修・補強工がアンカーの耐荷力特性に及ぼす影響

維持管理段階にあるトンネルでは、点検及び診断の結果に基づいて措置（対策と監視）が施される。対策には、大別して外力対策工とはく落対策工があり、外力対策工はトンネルの構造安定性確保の観点から覆工の耐荷力の向上（あるいは外力の作用の軽減）を図るもので、はく落対策工は利用者の安全性の確保の観点からコンクリート片の落下を防ぐものである。ここでは、ひび割れへの対策として適用されることの多いひび割れ注入工（はく落対策工に属する）と繊維シート接着工（外力対策工及びはく落対策工に属する）に着目し、それぞれの施工状況を模擬した試験体を作製した。アンカーの引張試験を実施し、対策工がアンカーの耐荷力特性に及ぼす影響について考察した。

6.2.1 ひび割れ注入工の影響

ひび割れの補修に多用されるひび割れ注入工を模擬した試験体を作製し、アンカーの引張試験を行った。試験概要を図 6-5 に示す。実施した試験ケースを表 6-4 に示す。ひび割れは 6.1.2 と同様にセリ矢の打込みにより導入し、ひび割れ直上にあつて施工アンカーを設置した後、ひび割れ幅が約 0.3mm となるように追加でセリ矢の打込みを行った。ひび割れ注入工では、はじめにシール用接着剤でひび割れを被覆し、インジェクターを使用して注入材をひび割れ内部に注入した。試験体の作製状況を写真 6-4 に示す。母材コンクリートの強度は、強度管理用に作製した円柱型供試体（φ100mm×h200mm）の圧縮試験より 26.5N/mm² 程度であった。

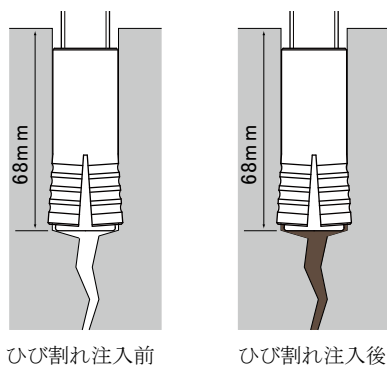
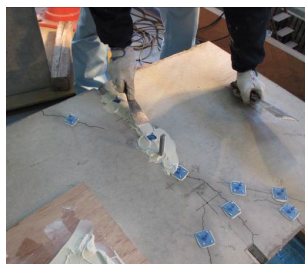


図 6-5 試験概要

表 6-4 試験ケース

ケース	ひび割れ (幅0.3mm)	ひび割れ注入	試験数
1	有り	無し	5
2	有り	有り	5
標準	無し	— (無し)	6



(a) ひび割れのシール処理



(b) インジェクターによる
注入材の注入



(c) ひび割れ注入完了

写真 6-4 ひび割れ注入工の実施状況

引張試験により得られた荷重－変位曲線を図 6-6 に示す。図 6-7 では、各ケースの最大引張荷重の平均値と、ひび割れの無い標準ケースでの最大引張荷重を 100%としたときの比率を記した。ひび割れを導入したケース 1 の最大引張荷重は、標準ケースの最大引張荷重に対して 5%程度の低下であり、これは本試験でのひび割れ幅が 0.3mm と微細であったためと考えられる。ひび割れ注入工を施したケース 2 の最大引張荷重は、ケース 1 のみならず、標準ケースの最大引張荷重をも上回った。また、荷重－変位曲線における勾配も、ケース 1 及び標準ケースよりも大きかった。これは、注入材によりひび割れが接着され、アンカーも強固に固定されたことによるものと考えられる。ただし、5 回の引張試験のうち 1 回（試験 5）では、荷重約 38kN において一旦荷重が低下するとともに変位が急増する現象が見られた。アンカーとコンクリートの孔壁間にまで注入材が浸透し、このときその付着切れが生じたものと推測された。このように、注入した注入材が金属拡張アンカーの固着に影響を及ぼす可能性についても留意が必要である。なお、本試験では注入材は下向きの注入となり、注入材は重力により自然流下したと考えられるが、実際の補修・補強現場ではトンネルの天端やアーチ部のひび割れに対し、上向きに注入材を注入する。このような点からも、ひび割れ注入工によるひび割れの接着効果が、常にここでの試験結果ほどに発揮されると期待すべきではない点について留意が必要である。

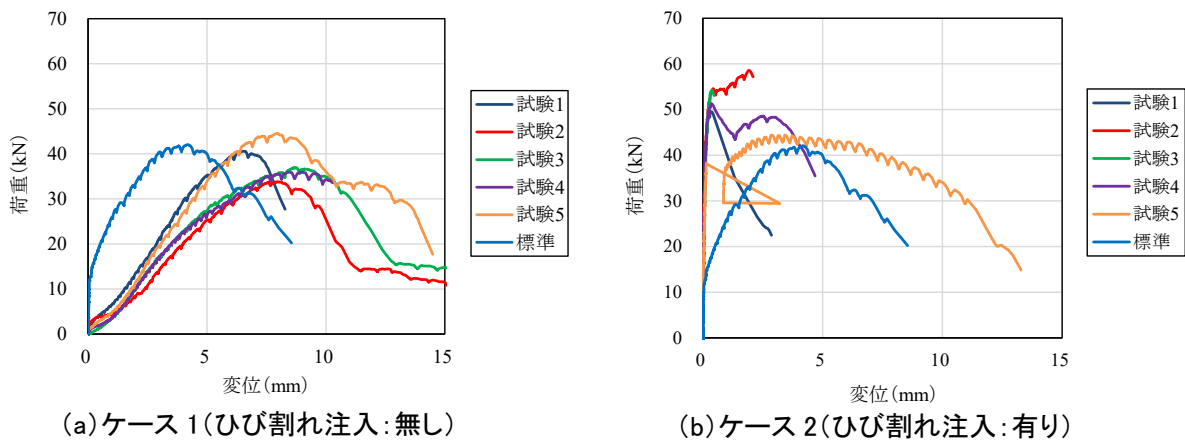


図 6-6 荷重－変位曲線

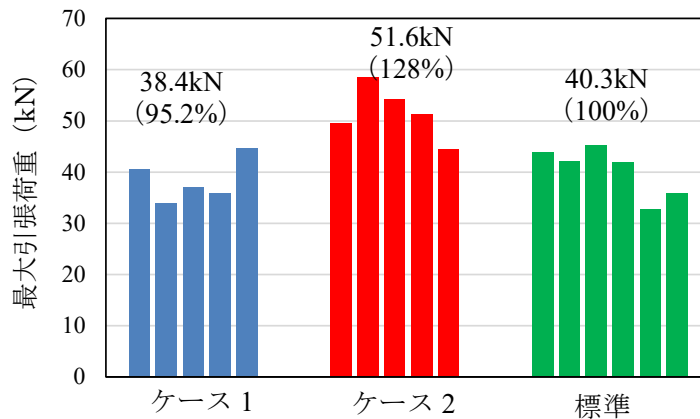


図 6-7 各ケースの最大引張荷重

6.2.2 繊維シート接着工の影響

ひび割れの補修・補強に多用される繊維シート接着工を模擬した試験体を作製し、アンカーの引張試験を行った^{6.4)}。試験ケースを表 6-5 に示す。ひび割れは 6.1.2 と同様にセリ矢の打込みにより導入し、ひび割れ直上にあと施工アンカーを打設した後、ひび割れ幅が約 1.5mm となるように追加でセリ矢を打ち込んだ。アンカー近傍及びひび割れの表層には粘土等の間詰め材を設置し、プライマーや接着剤がひび割れに浸透しないように配慮した。その後、プライマー及び接着剤を塗布し、炭素繊維シート（織

表 6-5 試験ケース

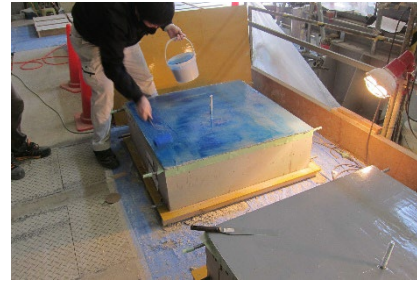
ケース	ひび割れの導入	繊維シート接着工	試験数	試験年度	
1	無し	有り	3	2019	
2	2-1	有り (幅1.5mm)	無し	3	2020
	2-2			3	2019
3	3-1	有り (幅1.5mm)	有り	3	2020
	3-2			3	2019
標準	無し	無し	—	—	



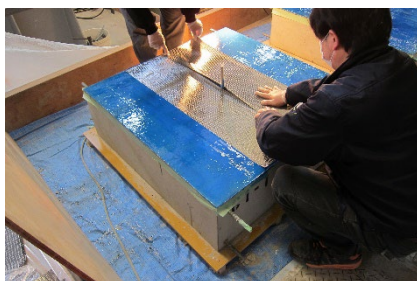
ひび割れの導入及びアンカーの打込み



下地材の塗布



接着剤の塗布



繊維シートの貼付け



引張試験の状況

写真 6-5 試験体の作製状況

維目付 200g/m²、引張強度 3,400N/mm²、引張弾性率 2.45×10⁵N/mm²) を接着した。施工状況を写真 6-5 に示す。ケース 2-1 及びケース 3-1 については、ひび割れを跨ぐように π 型変位計 (標点距離 100mm) を設置し、引張に伴うひび割れの開口挙動を計測した。この一連の試験では、ひび割れを導入しない標準ケースの引張試験は実施しなかった。一方、既往の実験データの蓄積により、母材コンクリートの圧縮強度とアンカーの最大引張荷重の間で良好な相関関係が認められることから、ケース 1~3 の試験時の母材コンクリートの圧縮強度 29.2N/mm² (強度管理用に作製した円柱型供試体 (φ100mm×h200mm) を用いて測定) より、図 6-8 に従って最大引張荷重を 41.9kN と想定した。

アンカーの引張試験により得られた荷重-変位曲線を図 6-9 に示す。図 6-10 では、各ケースの最大引張荷重の平均値と、標準ケースの最大引張荷重として想定した 41.9kN を 100%としたときの最大引張荷重の比率を示した。

ひび割れを導入せずに繊維シートを接着したケース 1 の最大引張荷重は、標準値を 1 割程度上回った。引張試験による結果のばらつきを考慮すると有意な差とは考えられず、繊維シートの接着がアンカーの最大引張荷重に及ぼす影響は小さいものと考えられた。一方、最大荷重以降では、繊維シートが剥離、破断しながら 5~10kN の荷重が残存する挙動が認められた。維持管理段階にあるトンネルにおいて、万一、アンカーでコーン状破壊が生じた場合も、繊維シートによって覆工からの吊り金具の

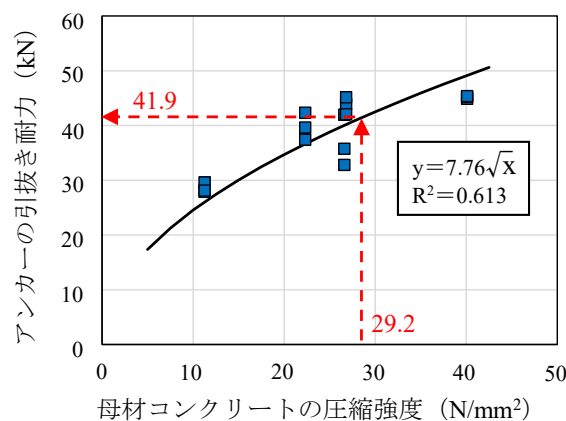


図 6-8 アンカーの引抜き耐力と母材コンクリートの圧縮強度の関係

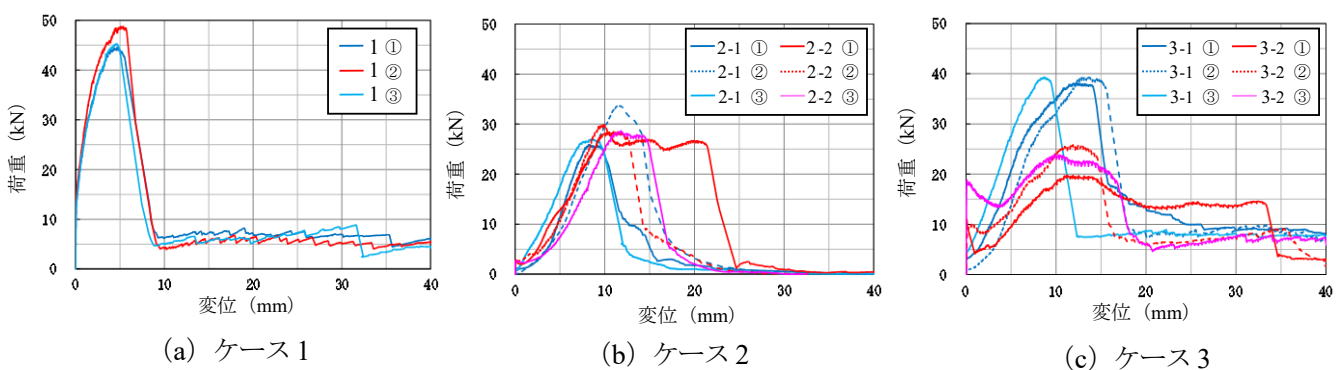


図 6-9 荷重-変位曲線

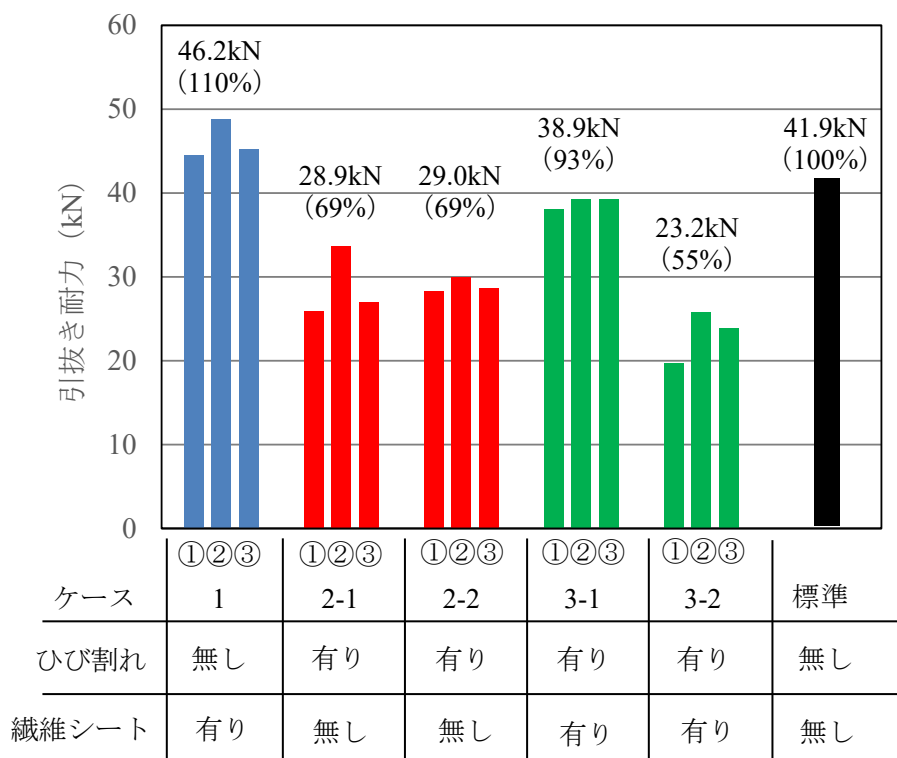


図 6-10 各ケースにおける引抜き耐力

脱落が一時的に阻止される可能性があると言える。しかし、トンネル安全対策工法研究会^{6.5)}がコンクリート塊の剥落現象を対象に指摘したように、繊維シートに作用する荷重は、押抜きせん断試験では静的な変位制御型であるのに対し、実際の落下現象では動的な荷重制御型となる。そして、このときシートの剥離が安定的に進展し、耐荷力が発揮されるかは未解明である。この繊維シートによる残存荷重を、万一、アンカーでコーン状破壊が発生した際のバックアップとして考慮できるかについては、更なる検討が必要であると考えられる。

ケース 2 の試験結果からは、6.1.2 で示した試験結果と同様に、アンカーがひび割れ（幅 1.5mm）と交差する場合、3 割程度の耐力低下となることが再確認された。

繊維シートを接着したケース 3 については、ケース 3-1 とケース 3-2 で同様に試験体を作製し、引張試験を実施したにも関わらず、ケース 3-1 の最大引張荷重は標準値の 9 割程度となり、ケース 3-2 は標準値の 55%と小さな値となった。ここで、 π 型変位計によるひび割れの開口挙動の計測結果について、アンカーの最近傍である左右 30mm の位置での開口変位と荷重の関係を図 6-11 に示す。同図より、ケース 3-1 のひび割れの開口量はケース 2-1 の 4 割程度に抑制されていたことが分かる。ケース 3-1 では、繊維シートによるひび割れの開口抑制効果により、アンカーのスリーブ部とコンクリートの摩擦力がより高く保持され、標準値に近い最大引張荷重となったものと考えられる。

一方、ケース 3-2 の最大引張荷重が小さかった原因を説明すべく、引張試験後のアンカーの状態を確認したところ、ケース 3-1 では軸部のコーンの先端がスリーブの内側まで潜り込んでスリーブが拡径さ

れていた（写真 6-6 (a) 参照）。これに対し、ケース 3-2 ではコーンの先端はスリーブの外側に留まっており、引張荷重に伴うスリーブの拡張の進行が認められなかった（写真 6-6 (b) 参照）。それに加え、スリーブに付着物が認められ、これは固化したプライマーであった可能性が考えられた。また、図 6-9 (c) より、ケース 3-2 の 3 試験では、荷重開始時、ほとんど変位が生じず、荷重が 10~20kN となった際、アンカーが急に抜け出す挙動が認められた。ここで、当初スリーブはプライマーを介してコンクリートの孔壁に付着した状態にあり、一定の荷重に達した際にその付着が切れたものと推定された。以上より、繊維シートを接着する際、アンカー打設孔の表面部をシーリング材により間詰めしたが、ケース 3-1 に比較してケース 3-2 ではその処置が十分でなく、アンカーの内部（軸部とスリーブの隙間）及び周辺部（スリーブと孔壁の隙間）がプライマーで充填された可能性が考えられた。アンカーは、本来、引き抜かれることでスリーブの拡張が進み、スリーブとコンクリートの孔壁間の摩擦力が高まると想定される。これに対してケース 3-2 では、はじめにスリーブとコンクリートの孔壁間でプライマーの付着切れが生じ、その後は軸部とスリーブが一体となって引張られたことが、最大引張荷重の低下要因となった可能性が考えられた。そして、コンクリートが引張抵抗を発揮する面積が比較的小さな状況で破壊に至ったものと考えられた。以上より、実際の現場において繊維シート接着工を施す際も、プライマーや接着剤がアンカーの内部および周辺部に充填されることのないよう留意が必要であると考えられる。

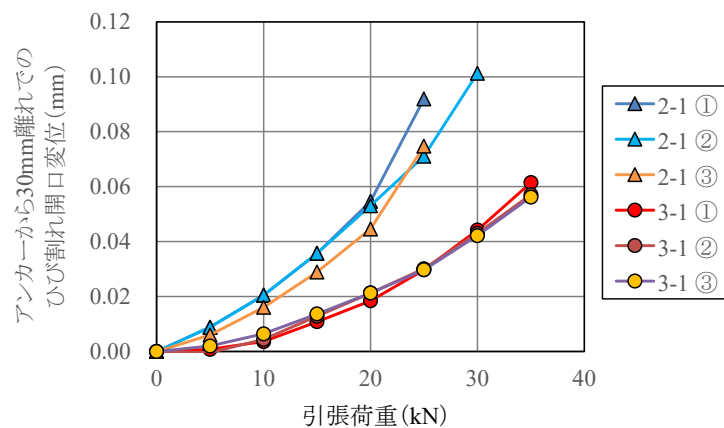


図 6-11 ひび割れ開口変位と引張荷重の関係

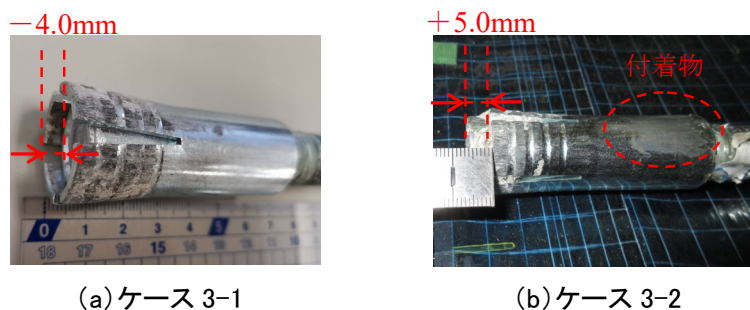


写真 6-6 引張試験後のアンカー軸部とスリーブの位置関係

6.3 あと施工アンカーの供用開始後の不具合に関するまとめ

本章では主に金属拡張アンカー（スリーブ打込み式）を対象に、種々の供用開始後の不具合や補修・補強工を模擬した条件で引張試験を行い、金属拡張アンカーの耐荷力特性に及ぼす影響を評価した。その結果を以下に整理し、維持管理上の留意事項について記述する。

(1) 維持管理段階で発生し得る不具合として母材コンクリートのひび割れに着目し、ひび割れ（ひび割れ幅 1.5mm）を導入した試験体を作製し、アンカーの引張試験を実施した。

(a) アンカーの設置位置にひび割れが交差する場合、アンカーと母材コンクリート間の摩擦力が減少することで、ひび割れが無い場合に比較してアンカーの最大引張荷重が 3～4 割程度低下した。また、ひび割れ幅が大きくなるほど、アンカーの最大引張荷重は低下し、最大荷重時の変位も大きくなった。アンカーの点検時は、ひび割れの有無及びひび割れ幅に留意する必要がある。

(b) アンカー設置位置とひび割れとの間に一定の離隔がある場合も、ひび割れがアンカーのコーン状破壊面の有効水平投影面内及びその近傍にあることで、コンクリートの引張抵抗が減少し、アンカーの最大引張荷重が 3～4 割程度低下した。アンカーの点検時は、アンカーと交差するひび割れのみならず、アンカー近傍のひび割れにも留意する必要がある。

(2) コンクリートに発生したひび割れの補修・補強工を模擬した試験体を作製し、アンカーの引張試験を実施した。アンカーに交差するコンクリートのひび割れ（ひび割れ幅 0.3mm）をひび割れ注入工によって補修すると、ひび割れが接着されたり、アンカーが母材コンクリートに固着されることで、最大引張荷重は総じて増大した。一方、引張荷重の過程で過大な変位が発生した試験ケースもあったことや、実際の補修現場では上向きの注入となり、難度の高い施工となるため、本試験結果の取扱いには留意が必要である。

(3) アンカーに交差するコンクリートのひび割れ（ひび割れ幅 1.5mm）に対し、繊維シート接着工を施すと、繊維シートによりひび割れの開口が抑制され、アンカーの最大引張荷重が一定程度回復したケースがあった。その一方で、最大引張荷重が顕著に低下したケースも認められた。後者のケースでは、繊維シートを接着するためのプライマーが、アンカーの内部及び周辺部に充填され、アンカースリーブの拡張が阻害されていた可能性が考えられた。プライマーや接着剤がアンカーの内部及び周辺部に浸透しないようにシール材を用いて間詰めする等、各作業がアンカーの固着機構に悪影響を及ぼさないよう留意する必要がある。

参考文献

- 6.1) 公益社団法人 日本道路協会：道路トンネル維持管理便覧【本体工編】令和 2 年版、pp.44～47、2020.8
- 6.2) 国土交通省 道路局：道路トンネル定期点検要領、pp.21、2019.2
- 6.3) 中村英佑・日下敦・古賀裕久：あと施工アンカーの耐荷力の低下要因に関する基礎的考察、土木技術資料、60-8、pp.24～27、2018.8
- 6.4) 小泉悠・日下敦・巽義知：繊維シート接着工があと施工アンカーの引抜き耐力に及ぼす影響に関する載荷実験、トンネル工学報告集、Vol.31、I-18、pp.1～7、2021.11
- 6.5) トンネル安全対策工法研究会 編：FRP によるトンネル覆工剥落対策マニュアル、山海堂、pp.45-55、2003

7. あと施工アンカーの設計・施工・維持管理における留意点

本研究では、換気用ジェットファン等のトンネル内附属物の取付けに用いられるあと施工アンカー等の取付部材を対象に、既往の文献・指針類等に示される知見を整理し、アンカーの引張試験等、各種試験・計測を実施した。アンカー等の信頼性向上に資する知見を蓄積し、設計・施工・維持管理の各段階での留意点を取りまとめた。

本章では、以降、前章までで得られた設計・施工・維持管理における基本的な知見や留意点を示す。実施した試験・計測の詳細については、第3章～第6章を参照されたい。また、実トンネルにおいて、ジェットファンの吊下げには、主に金属拡張アンカー（スリーブ打込み式、M24、スリーブ長 140mm、ステンレス製）が用いられる。これに対し、本研究におけるアンカーの引張試験等では、試験設備の規模の制約から、主に金属拡張アンカー（スリーブ打込み式、M16、スリーブ長 60mm、ステンレス製）を使用した。試験結果の傾向はアンカーの大きさに過度に依存しないと考えられるが、実務に展開する上で留意頂きたい。

7.1 設計上の留意点

主に金属拡張アンカー（スリーブ打込み式、ステンレス製）を対象とした、あと施工アンカーの設置条件や母材コンクリートの品質等を変化させて行った引張試験の結果より得られた、アンカー設置部の設計における基本的な知見や留意点を以下にまとめる。

【室内試験】あと施工アンカーの設計に必要な耐荷力特性を評価する試験方法として、あと施工アンカー標準試験法・同解説を参考に、引張試験を実施した。

- ・ アンカーの引張試験の試験条件（支点間隔）（4.1.2 参照）： あと施工アンカーの設計に必要な耐荷力特性を評価する際、コーン状破壊が発生する可能性がある場合は、**支点間隔（反力板の孔の直径）が小さいと、反力板がコーン状破壊を抑制することによりアンカーの最大引張荷重が大きな値として測定されるため、留意する必要がある。**本研究における実験においては、支点間隔がアンカー埋込み長さ l の4～6倍の範囲では、アンカーの最大引張荷重に有意な差が認められなかったため、支点間隔は l の4倍以上とするのが良い。
- ・ コーン状破壊耐力の実測値と基準類の示す設計値の比較（4.2.1 参照）： 母材コンクリートやアンカーが健全な状態において、上記の引張試験で求めた最大引張荷重の実測値は、土木学会や日本建築学会などの基準類が示す設計コーン状破壊耐力の計算値よりも大きいことがほとんどであった。この原因としては、実際に試験を行うと、設計で想定している45°コーンよりも大きなコーンで破壊することが多かったことが考えられる。

- 金属系アンカーの種類による耐荷特性の違い (4.1.3 参照)： 金属系アンカーは様々な種類のものがある。アンカーボルト（接合筋）のねじの呼び径が同じであっても、種類により先端の固着部の形状や大きさが異なるため、最大引張荷重や最大荷重時の変位が異なった。**特に固着部の大きさが最大引張荷重に大きく影響することに留意する必要がある。**なお、現状ではジェットファンの取付けでは金属拡張アンカー（スリーブ打込み式、ステンレス製）が用いられている場合がほとんどである。
- 群配置のピッチについて (4.2.1 参照)： ジェットファン取付けに用いる吊金具をアンカーで固定する場合のように、複数本のアンカーを用いる場合（群配置）、引張試験で求めた最大引張荷重の実測値は、土木学会や日本建築学会などの基準類が示す設計コーン状破壊耐力の計算値よりも大きくなった（ピッチが60～180mmの範囲の実験結果）。実際に実験を行うと、設計で想定している45°コーンよりも大きなコーンで破壊することが多く、一体化した大きなコーンで破壊したためと考えられる。
- へりあき寸法（アンカーと母材コンクリート端部までの長さ）について (4.3.1 参照)： 土木学会や日本建築学会などの基準類が示す設計コーン状破壊耐力は、45°コーンで破壊することを想定している。へりあき寸法が小さく、45°コーンが母材端部から逸脱するような場合は、その分を減じて設計することになっている。つまり、へりあき寸法がアンカー埋込み長さと等しいなど、45°コーンが母材端部から逸脱しない場合は通常通りの設計で良いことになっているが、実際に試験を行うとより大きなコーンで破壊するため、端部でコーンが分断され、最大引張荷重が低下した。その場合でも、最大引張荷重は設計コーン状破壊耐力よりも大きくなるが多かった。ただし、設計で想定していない破壊モード（割裂破壊）が生じる場合もあったことから、**へりあき寸法はできる限り、埋込み長さ以上とするなど余裕を確保し、少なくとも45°コーンが部材端部にかからないように配慮することが望ましい。**
- 静荷重の持続载荷について (4.4 参照)： 16本のアンカー（M16）でジェットファンを取付けた場合（一般にM24のアンカーを用いる現場より厳しい条件）を想定し、アンカー1本が支える静荷重の8倍程度大きな静荷重（最大引張荷重の2割程度）を1年間持続载荷したところ、埋込み長さ60mmに対して0.9～1.2mm程度の変位が生じた。また、引張試験を行ったところ、持続载荷をしない場合と最大引張荷重の値が大きく変わらなかった。実際のジェットファン吊り下げの状況では、持続载荷の影響はほとんどないと考えられる。

【現地計測】ジェットファン（重量：約20kN）を支持する取付部材への作用荷重を把握するため、道路トンネルにおいて現地計測を実施した。ターンバックル6本にひずみゲージを設置し、ジェットファン設置以降、ターンバックルに発生する軸力を計測した。

- ・ ジェットファン据付け時のターンバックル発生軸力 (3.3.3 (1) 参照)： ジェットファンの据付け時、計測された発生軸力は、ジェットファン本体の静荷重及び吊り角度から計算される想定軸力と比較し、最大で5割程度の乖離が認められた。
- ・ ジェットファンの起動に伴うターンバックルの軸力変動 (3.3.3 (2) 参照)： ジェットファンの起動に伴うターンバックルの軸力変動は最大で0.6kN程度であり、ジェットファン本体の静荷重による常時の引張力に対し、十分に小さいものと把握された。
- ・ 大型車両の通行に伴うターンバックルの軸力変動 (3.3.3 (3) 参照)： 大型車両の通行に伴うターンバックルの軸力変動は最大で0.1kN程度であり、ジェットファン本体の静荷重による常時の引張力に対し、十分に小さいものと把握された。
- ・ 地震動に伴うターンバックルの軸力変動 (3.3.3 (4) 参照)： 対象トンネル付近で震度4が観測された地震に伴うターンバックルの軸力変動は最大で0.24kN程度であり、ジェットファン本体の静荷重による常時の引張力に対し、十分に小さいものと把握された。

【室内試験】吊り金具を斜め方向に引張り、4本のアンカーに発生する軸力を測定する載荷試験を実施した。

- ・ 複数のアンカーの荷重分担 (3.4 参照)： 引張荷重40kN以下、つまり、実際のトンネルでジェットファンを支持するターンバックルを想定した場合、4本のアンカーの荷重の分担率はほぼ均等であることが確認された。

【室内試験】ジェットファンの吊り構造を模擬した小型の模型を作製し、取付部材の破断時の軸力変動を計測する模型実験を実施した。

- ・ ターンバックル1本が破断した場合 (3.5.3 (2) 参照)： ジェットファンを支持する4本の吊り用ターンバックルのうち、1本が切断された場合、残存する3本のターンバックルのうち主として対角線上に残った2本のターンバックルがジェットファンを支持し、ジェットファンが大きく傾くことはなかった。
- ・ ターンバックル2本が破断した場合 (3.5.3 (3) 参照)： 2本のターンバックルが切断されても、対角線上の2本のターンバックルでジェットファンが支持されている場合は、バックアップ材には軸力が発生しない傾向が認められた。
- ・ バックアップ材に発生する軸力 (3.5.3 (3) 参照)： バックアップ材の設置方法、すなわちバックアップ材にたるみを持たせるか否か等によって、メインのターンバックルの切断後、バックアップ

材が負担する軸力の割合が変化した。

- ・ バックアップ材の設置によるジェットファンの傾き (3.5.3 (3) 参照) : バックアップ材を設置することで、メインのターンバックルが 1~2 本切断された場合でも、バックアップ材への荷重の受け替えにより、ジェットファンが大きく傾くことが阻止された。

7.2 施工上の留意点

金属拡張アンカー（スリーブ打込み式、M16、スリーブ長 60mm、ステンレス製）を対象に、アンカー及び母材コンクリートの施工時に発生し得る不具合を模擬した試験体を作製し、アンカーの引張試験を実施した。得られた知見及びアンカーの施工上の留意点を以下に示す。

【引張試験】アンカーの施工時に発生し得る不具合を模擬した試験体を作製し、アンカーの引張試験を実施した。

- ・ 不適切な穿孔径の影響 (5.1.1 参照)：穿孔径が当該アンカーの所定の値よりも大きくなることで（本実験では 2~3mm 過大とした）、アンカーのスリーブ拡張部とコンクリート間の摩擦が不十分となり、引張荷重にほぼ抵抗することなくアンカーが引き抜ける状況等が確認された。**穿孔径は所定の値を超過しないよう留意する必要がある。**さらに、群配置した 4 本のアンカーのうち、一部の穿孔径を過大とし、アンカー群の引張試験を実施した結果からは、穿孔径を過大としたアンカーの本数が増えるにつれて最大引張荷重が低下したり、穿孔径を過大としたアンカーの引抜き量が大きくなって荷重が偏心して作用したりする傾向が確認された。
- ・ 不適切な穿孔深さ (5.1.2 参照)：穿孔深さが所定の長さより短くなることで、アンカーのコーン状破壊面の有効水平投影面積が減少し、最大引張荷重が低下した。一方、穿孔深さが所定の長さより長くなることで、最大引張荷重が増大したが、スリーブの打込みの精度の低下や維持管理段階でのアンカー抜出しの発見の遅れが懸念される。**穿孔深さは所定の長さとなるよう留意する必要がある。**
- ・ 穿孔作業後の清掃不足 (5.1.4 参照)：穿孔作業後の孔内の清掃が不十分な場合、切削粉が孔内底部に残存したため、アンカーの埋込み不足が生じ、最大引張荷重の低下が生じた。また、残存した切削粉により壁面の摩擦が低下した可能性も考えられた。**穿孔作業後は清掃を適切に行なわなければならない。**
- ・ アンカーの埋込み不足の影響 (5.1.3 参照)：スリーブの打込みが不十分で、アンカーが埋込み不足となる場合、引張載荷時の荷重-変位曲線の勾配が緩慢となり、最大引張荷重が 2 割程度低下した。これはスリーブが十分拡張されず、固着が不十分となったためと考えられた。**スリーブを確実に打ち込むよう留意する必要がある。**また、本試験において、コンクリート面からのスリーブの突出の有無を近接目視で確認したり、アンカーのぐらつきを触診で確認したりすることで、アンカーの埋込み不足の有無が把握された。アンカーの点検において、スリーブの突出やアンカーのぐらつきに着目して、近接目視・触診を行うことは、アンカーの埋込み不足を確認する上で有効かつ重要である。

【引張試験】金属拡張アンカーの母材コンクリートの施工時に発生し得る不具合を模擬した試験体を作製し、アンカーの引張試験を実施した。

- ・ 母材コンクリートの圧縮強度 (5.2.1 参照) : 母材コンクリートの圧縮強度を $18\sim 40\text{N/mm}^2$ とした、ここでの引張試験では、圧縮強度とアンカーの最大引張荷重の間で正の相関が認められた。一方、例えば「コンクリートのあと施工アンカー工法の設計・施工・維持管理指針 (案)」等では、コンクリートの圧縮強度が高い場合、あと施工アンカーが適切に固着できず、想定した耐力を得ることができないことがあると記されており、留意する必要がある。
- ・ 母材コンクリートの粗骨材密度の偏り (5.2.2 参照) : 母材コンクリートの粗骨材の分布を偏らせ、過度に密または疎とした場合、いずれも最大引張荷重の顕著な低下は認められなかったものの、引張载荷に伴う変位が増大する傾向が認められた。粗骨材が密な場合、部分的に空隙が生じて摩擦が得られないことや、粗骨材が疎な場合、穿孔やスリーブの打込み時、細骨材が削られてアンカーに緩みが生じたものと想定された。今回実施した実験条件においては発生しなかったが、**母材コンクリートの粗骨材密度の偏りは、疎・密ともに、特にアンカーの引抜き破壊の発生の可能性を高めるものと考えられるため、適切な配合でコンクリートを打設し、締固めに際しては材料分離しないよう留意する必要がある。**
- ・ ナット締付けによってアンカーに生じる初期軸力のばらつきについて (4.5.2 (1) 参照) : アンカーに吊金具を取り付ける際は、所定のトルクでナット締付けを行い、その際にアンカーには軸力(初期軸力)が導入されるが、**アンカー設置位置の固着部の状態やねじ・座面の摩擦が完全に同一ではないためと考えられるため、初期軸力はアンカーによってばらつきが大きいことに予め留意する必要がある。**なお、例えば、実際の現場で一般的な M24 よりも径の小さい M16 のアンカー16 本で質量 2,300kg のジェットファンを取り付けた場合を想定すると、アンカー1 本が支える静荷重は十分小さく、本研究で最も初期軸力の小さかったアンカーでもナットの浮きや弛みは生じないと考えられる。ただし、現場等のアンカーによっては導入される軸力は、さらにばらつきが大きいおそれもあり、実際のジェットファン取付けの際は、ナットの浮きや弛みがないか確認し、必要に応じて所定のトルクで再度締付けを行うのがよい。

7.3 維持管理上の留意点

主に金属拡張アンカー（スリーブ打込み式、M16、スリーブ長 60mm、ステンレス製）を対象とし、覆工コンクリートのひび割れ等、供用開始後の不具合や補修・補強工を模擬した試験体を作製し、アンカーの引張試験を実施した。得られた知見及びアンカーの維持管理上の留意点を以下に示す。

【引張試験】維持管理段階で発生し得る不具合としてコンクリートのひび割れに着目し、ひび割れを導入した試験体を作製し、アンカーの引張試験を実施した。

- ・ アンカーに交差するひび割れがアンカーの耐荷力特性に及ぼす影響 (6.1.2 (2) (3) 参照)： アンカーの設置位置にひび割れが交差する場合、アンカーと母材コンクリート間の摩擦力が減少することで、ひび割れが無い場合に比較してアンカーの最大引張荷重が3~4割程度低下した。また、ひび割れ幅が大きくなるほど、アンカーの最大引張荷重は低下し、最大荷重時の変位も大きくなった。アンカーの点検時は、ひび割れの有無及びひび割れ幅に留意する必要がある。
- ・ アンカーの近傍に生じたひび割れがアンカーの耐荷力特性に及ぼす影響 (6.1.2 (3) 参照)： アンカー設置位置とひび割れとの間に一定の離隔がある場合も、ひび割れがアンカーのコーン状破壊面の有効水平投影面内及びその近傍にあることで、コンクリートの引張抵抗が減少し、アンカーの最大引張荷重が3~4割程度低下した。アンカーの点検時は、アンカーと交差するひび割れのみならず、アンカー近傍のひび割れにも留意する必要がある。

【引張試験】コンクリートに発生したひび割れの補修・補強工を模擬した試験体を作製し、アンカーの引張試験を実施した。

- ・ ひび割れ注入工がアンカーの耐荷力特性に及ぼす影響 (6.2.1 参照)： アンカーに交差するコンクリートのひび割れ（幅 0.3mm）をひび割れ注入工によって補修すると、ひび割れが接着されたり、アンカーが母材コンクリートに固着されることで、最大引張荷重は総じて増大した。一方、引張載荷の過程で過大な変位が発生した試験ケースもあったことや、実際の補修現場では上向きの注入となり、難度の高い施工となるため、本試験結果の取扱いには留意が必要である。
- ・ 繊維シート接着工がアンカーの耐荷力特性に及ぼす影響 (6.2.2 参照)： アンカーに交差するコンクリートのひび割れ（幅 1.5mm）に対し、繊維シート接着工を施すと、繊維シートによりひび割れの開口が抑制され、アンカーの耐荷力特性が一定程度回復したケースがあった。その一方で、耐荷力特性が顕著に低下したケースも認められた。後者のケースでは、繊維シートを接着するためのプライマーが、アンカーの内部及び周辺部に充填され、アンカースリーブの拡張が阻害されていた可能性が考えられた。プライマーや接着剤がアンカーの内部及び周辺部に浸透しないようにシール材を用いて間詰めする等、各作業がアンカーの固着機構に悪影響を及ぼさないよう留意する必要がある。

る。

- ・ アンカーの軸力の経時的低下について (4.5.2 (2) (3) (4) 参照)： ナット締付けによってアンカーに導入される軸力の大きさを一定期間測定した結果、経時的に低下した。その低下量を確認したところ、初期 (3~25 日程度) に大きかった。また、その後の低下は緩やかとなる傾向があった。次に、軸力低下後に所定のトルクで再度締付けを行うと、概ね軸力が初期軸力の値まで回復した。また、本研究による確認では、定期的に再締付けを繰り返しても軸力の大きさはほぼ初期軸力の値まで回復し単調に増大していかないこと、再締め付けを繰り返すと軸力の経時的な低下量が収束する傾向があった。定期的な再締め付けを繰り返しても、アンカー部が破壊する可能性は低いと考えられる。これらの知見から、特に初回の点検等の際に、所定のトルクでナットの再締付けを行うのがよい。

7.4 おわりに

本報告書は、換気用ジェットファン等のトンネル内附属物の取付けに用いられるあと施工アンカー等の取付部材を対象に、引張試験や現地計測等により蓄積された知見及びそれに基づく設計・施工・維持管理上の留意点を取りまとめたものである。

本研究の発端となったのは、平成 24 (2012) 年 12 月 2 日に発生した中央自動車道笹子トンネルでの天井板落下事故である。トンネルの維持管理において、本体工とともに、附属物の取付部材の設計・施工、取付状態の点検・診断と措置の重要性が指摘される中、研究を進め、既に一部の知見を「道路トンネル維持管理便覧【本体工編】令和 2 年度版」に反映することができた。

あと施工アンカーの設計・施工・維持管理については、本報告書内でも主に 2 章で概説したように、日本建築学会や土木学会から指針が既に発刊されており、それらの指針に従って、適切に設計・施工・維持管理されることが基本となると考えられる。一方、本研究では、故意に母材コンクリートにひび割れを導入した上で引張試験を実施し、アンカーの耐荷力特性に及ぼす影響を評価したり、道路トンネルでジェットファンを支持するターンバックルの発生軸力を現地計測するなど、ほとんど前例の無い様々な実験・計測に取り組んだ。引張試験では、試験設備の規模の制約により、一回りサイズの小さなアンカーが使用されていたり、データの蓄積が不十分な点もあるが、ここでの知見・留意点が活用され、道路利用者の安全・安心の向上に貢献することを期待する。

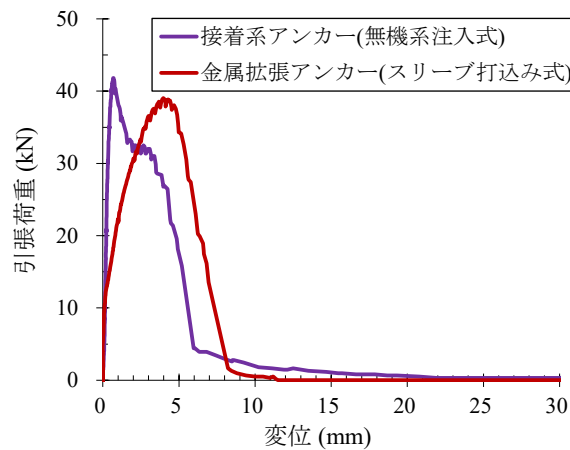
参 考 資 料

接着系あと施工アンカーの特性と寿命評価

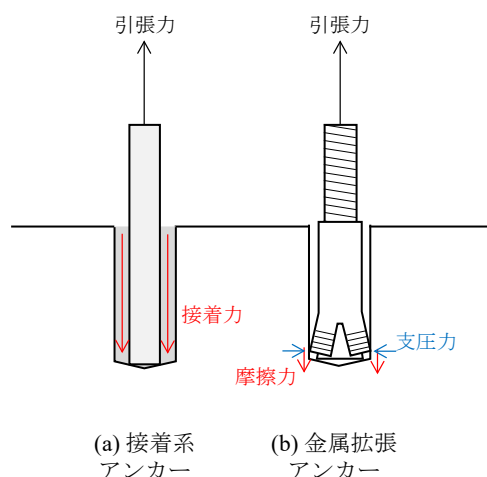
1. 接着系あと施工アンカーの特性と寿命評価

1.1 接着系あと施工アンカーの引張に対する力学特性

接着系あと施工アンカー（例：無機系接着剤、注入式）の引張試験時の耐荷挙動の特徴として、道路トンネルジェットファンの取付けに用いられる金属拡張アンカー（スリーブ打込み式）と比べて、最大引張荷重に至るまでの変位の増加量は小さい傾向がある（参考 図 1.1.1 参照）。これは、参考 図 1.1.2 に示すように、金属拡張アンカー（スリーブ打込み式）はスリーブの拡張部のみで孔内に固着し、支圧力と摩擦力でアンカーを支えているのに対し、接着系アンカーは孔内全体に接着剤を充填して孔壁に固着し、その接着力でアンカーを支えることから、金属拡張アンカーと比べて引張载荷時の変位（引抜き）が生じにくいためと考えられる。



参考 図 1.1.1 接着系アンカーと金属拡張アンカー（スリーブ打込み式）の引張試験結果（荷重-変位曲線）の例



参考 図 1.1.2 接着系アンカーと金属拡張アンカー（スリーブ打込み式）の固着メカニズムの違い

1.2 接着系あと施工アンカーの各種環境下での特性と寿命評価

1.2.1 アルカリ

(1) 概要

接着系あと施工アンカー（以降、接着系アンカーと称す）は比較的容易に設置が可能なことから、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、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を目的とし、接着系アンカーのアルカリ浸せき試験を行った。接着系アンカーの代表的な試験方法の一つである ACI 355.4-11^{参考1)}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、アンカーを設置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（KOH）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

(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^{参考2)}。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4種類を用いた。カプセル方式の製品は、カプセルをドリルで穿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」3種類（不飽和ポリエステル樹脂、ビニルエステル樹脂、ビニルウレタン樹脂）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を参考表 1.2.1.1 に示す。

参考表 1.2.1.1 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)	穿孔長 (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 回転・打撃型	VU	13.1	127	M12 ^{※3}	14	110	54.2	14.7
D	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、VU/ビニルウレタン樹脂

※2: 有効付着長（穿孔長－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

(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、外径 165 mm、高さ 150 mm の硬質塩化ビニル薄肉管（管厚約 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参考表 1.2.1.2 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。母材コンクリートへのアルカリ添加による劣化促進効果について検証するため、一部の実験ケースでは、pH 13.2~13.5 程度に調製した KOH 水溶液を練混ぜ水として用い母材コンクリートを作製した。

参考表 1.2.1.2 母材コンクリートの配合

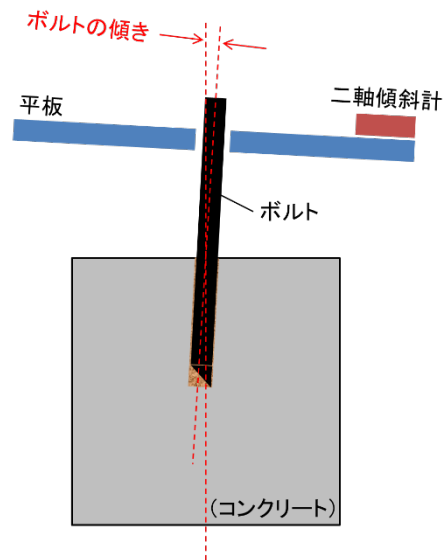
水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単体量 (kg/m ³)				混和剤 A	混和剤 B
		水	セメント	細骨材	粗骨材		
70	47	163	23.3	87.4	1001	セメント× 0.25%	セメント× 0.003%

(c) 試験片作製方法

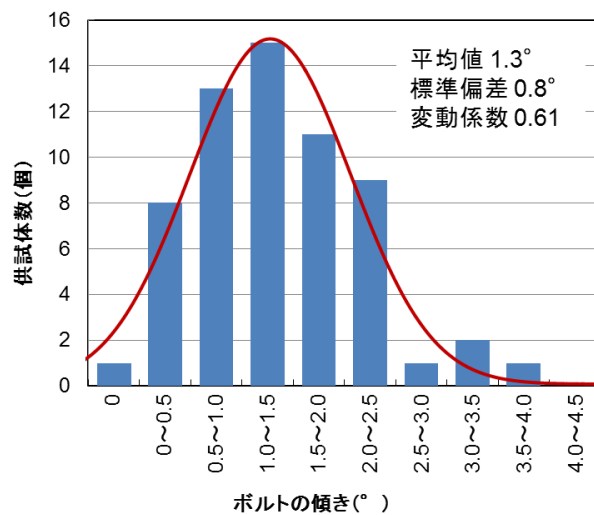
材齢約 15 週の母材コンクリート上面中央に、製造メーカーが指定する径、長さの孔をハンマードリルで設けてアンカーのカプセルを挿入し、製品 A、B、C については先端を斜め 45° にカットした全ねじボルト (M12) を挿入しながらカプセルに回転・打撃を与え、製品 D については先端が平らな全ねじボルト (M12) にハンマーで打撃を与えながら挿入し、施工した。

穿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、参考図 1.2.1.1 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。参考図 1.2.1.2 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、参考図 1.2.1.2 には正規分布もプロットしている。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穿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

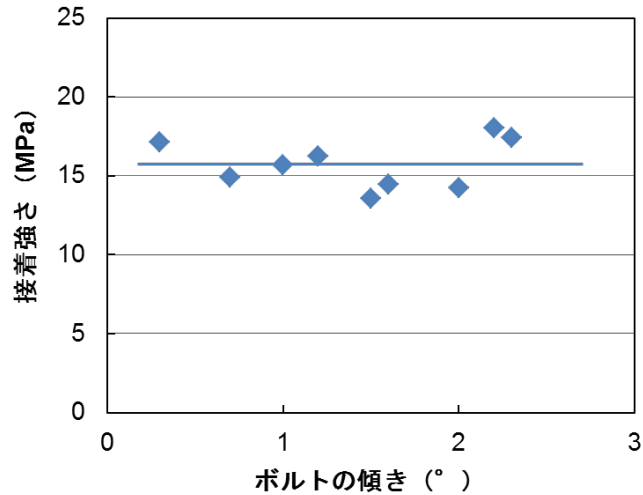
孔内でのボルトの傾きの和) は最大で 3.5° であったことから、ドリル孔内でのボルトの傾き (最大で $\pm 1.6^\circ$) を加味しても、60 個全ての供試体において ACI 355.4-11 を満足する精度でドリル穿孔ができたものと判断することができる。60 個の円柱供試体のうち任意の 10 個について、母材上面の鉛直方向に対するアンカーの引張試験を行い、アンカーの接着強さとボルトの傾きとの関係を調べたところ、接着強さはボルトの傾きによらず概ね一定範囲内の値をとることが明らかとなった (参考 図 1.2.1.3)。



参考 図 1.2.1.1 二軸傾斜計を用いたボルトの傾きの計測方法

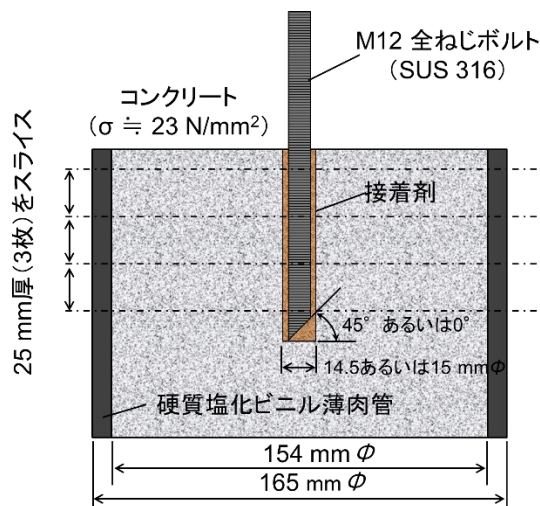


参考 図 1.2.1.2 60 個の供試体におけるボルトの傾きの分布



参考 図 1.2.1.3 ボルトの傾きと接着強さとの関係

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穿孔長に制約があり、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参考 図 1.2.1.4 に示す。



参考 図 1.2.1.4 接着系アンカー設置後のコンクリート断面と試験片採取方法の概略

(d) 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℃あるいは 40℃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参考写真 1.2.1.1 に示す。



参考写真 1.2.1.1 浸せき試験時の試験片設置状況

参考表 1.2.1.3 浸せき試験を行ったケース

製品 種別	KOH 水溶液 (pH 13.2~13.5) 浸せき		20℃、60%RH
	40℃	20℃	大気中
A	○/◎	○	○
B	○	—	—
C	○	—	—
D	○	—	—

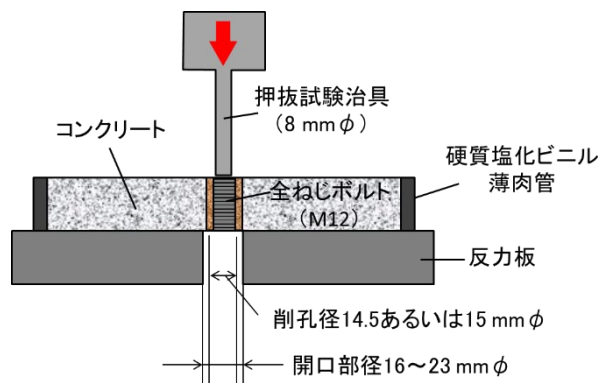
○：母材コンクリートへのアルカリ添加なし

◎：母材コンクリートへのアルカリ添加あり

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℃、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。浸せき試験を行ったケースを参考表 1.2.1.3 に示す。

(e) 押抜試験

押抜試験の概略図を参考図 1.2.1.5 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(参 1)により接着強さを求めた。



参考図 1.2.1.5 スライス試験片による押抜試験の概略図

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

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)

(f) 赤外線分光分析

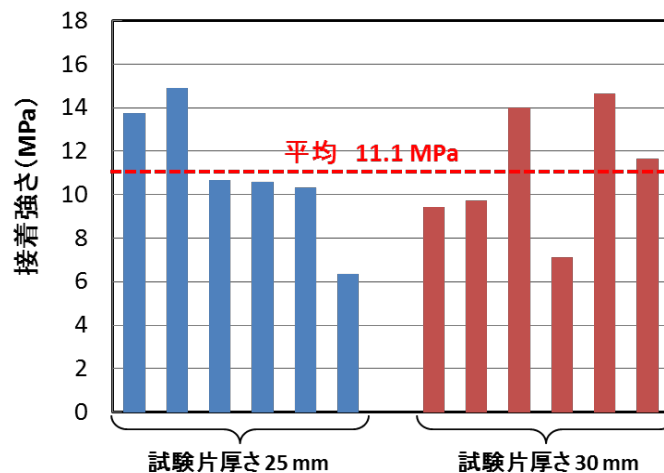
赤外線分光分析は、有機化合物の中の炭素同士や、炭素-酸素、炭素-水素などの化学結合の様々な振動による光の吸収が、赤外線域に現れることを利用した化学分析手法である。試料の赤外線(波数 800 ~ 4000 cm^{-1} 程度) 吸収スペクトルから、樹脂の種類や劣化の有無に関する情報が得られる^{参考 3)}。そこで、押抜試験後の接着剤の表面近傍(接着剤表面から深さ数 10 μm 程度までの範囲) から採取した少量の微粉状のサンプルについて赤外線分光分析を行い、薬液浸せき前後における接着剤の化学構造の変化について調べた。

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

(a) 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参考 図 1.2.1.6 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。

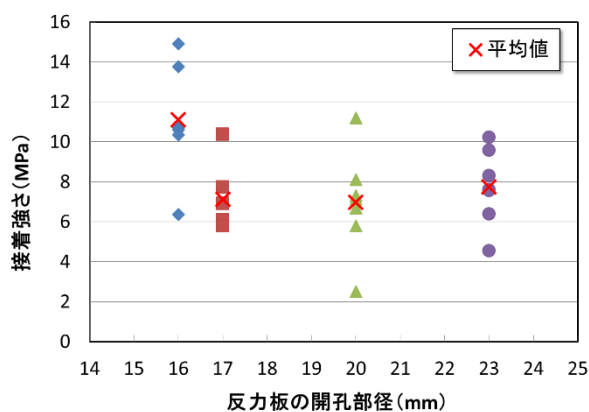


参考 図 1.2.1.6 押抜試験における試験片厚さの影響

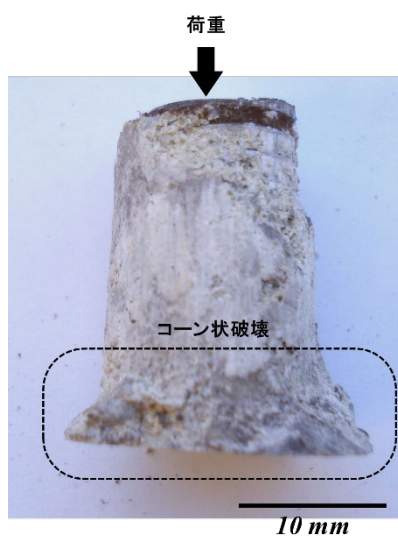
(b) 押抜試験における反力板の開孔部径の影響

ACI 355.4-11 では、押抜試験における反力板の開孔部径 (参考 図 1.2.1.5) 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。その結果を参考 図 1.2.1.7 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 7~8 MPa となった。開孔部径 17、20、23 mm で試験を行った場合、参考 写真 1.2.1.2 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拔せん断破壊が支配的であり、これが参考 図 1.2.1.7 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、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ため、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。



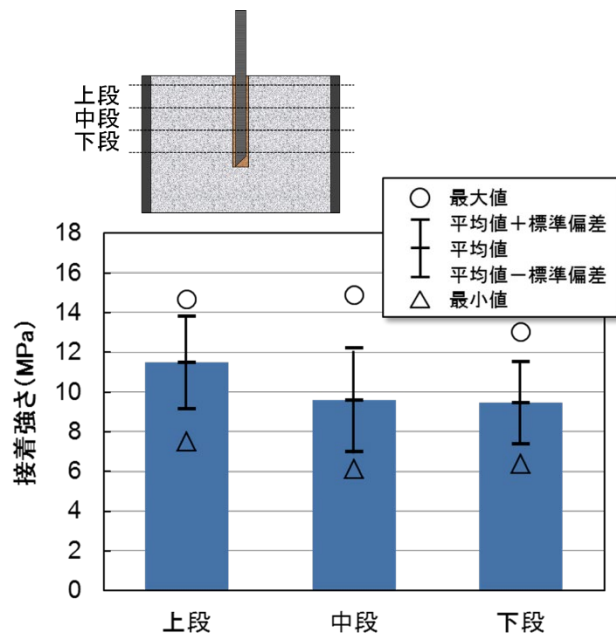
参考 図 1.2.1.7 押抜試験における反力板の開孔部径の影響



参考 写真 1.2.1.2 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)

(c) 試験片の採取部位の影響

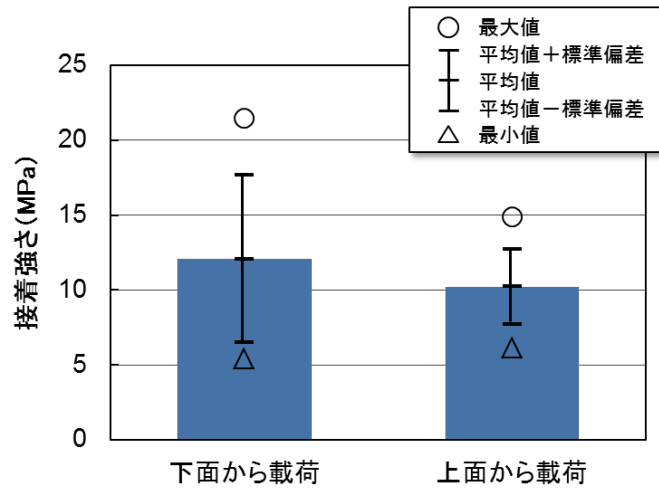
12体のコンクリート円柱から採取したスライス試験片（製品A）を用い押抜試験を実施した結果を、試験片の採取部位によって整理したところ、上段から採取した試験片では接着強さの平均値が11.5 MPaであるのに対し、中段は9.6 MPa、下段は9.5 MPaとなった（参考 図 1.2.1.8）。そこで、有意水準5%でF検定およびt検定を行ったところ、実験を行った範囲内では、平均値、ばらつきともに試験片採取部位による有意差は無いとの結果が得られた。



参考 図 1.2.1.8 押抜試験における試験片採取部位の影響

(d) 載荷方向の影響

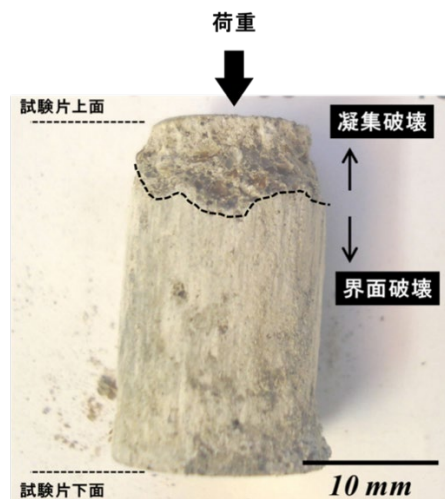
押抜試験において、スライス試験片の上面から載荷した場合と、試験片を上下反転させて下面から載荷した場合の結果の差異を、参考 図 1.2.1.9 に示す。結果はそれぞれ、10枚の試験片（製品A）について示している。有意水準5%でt検定を行ったところ、本実験の範囲内では、接着強さの平均値に載荷方向による有意差は認められなかった。しかしながら、試験片の下面から載荷した場合、変動係数は0.46であり、上面から載荷した場合に（変動係数0.24）に比べてばらつきが著しく大きい結果となった。試験後の試験片やアンカーの外観を観察したが、載荷方向による明確な差異は認められず、ばらつきに違いが生じた原因については特定できなかった。



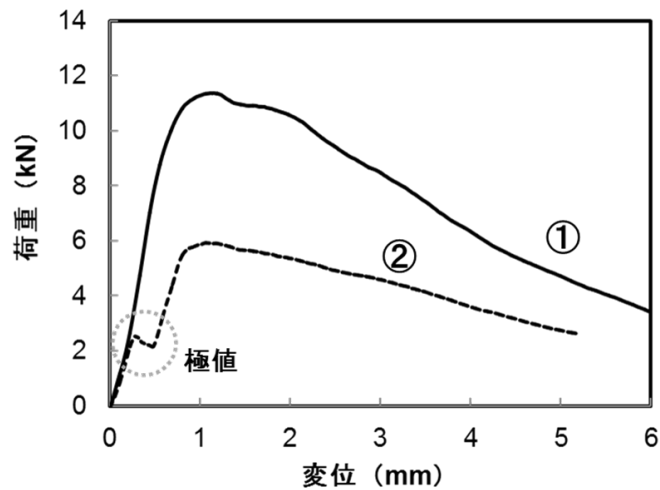
参考 図 1.2.1.9 押抜試験における载荷方向の影響

(e) 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(参考 写真 1.2.1.3)。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。

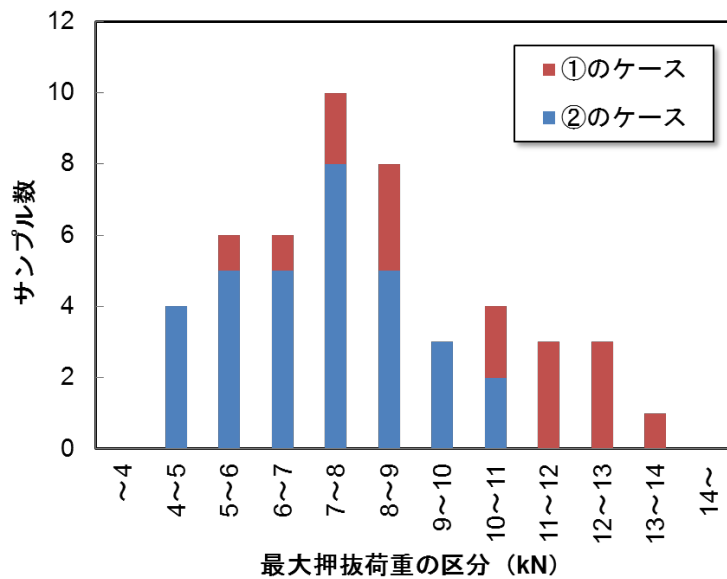


参考 写真 1.2.1.3 押抜試験後のアンカーの典型的な外観 (開孔部径 16 mm)



参考 図 1.2.1.10 押抜試験における典型的な荷重－変位曲線

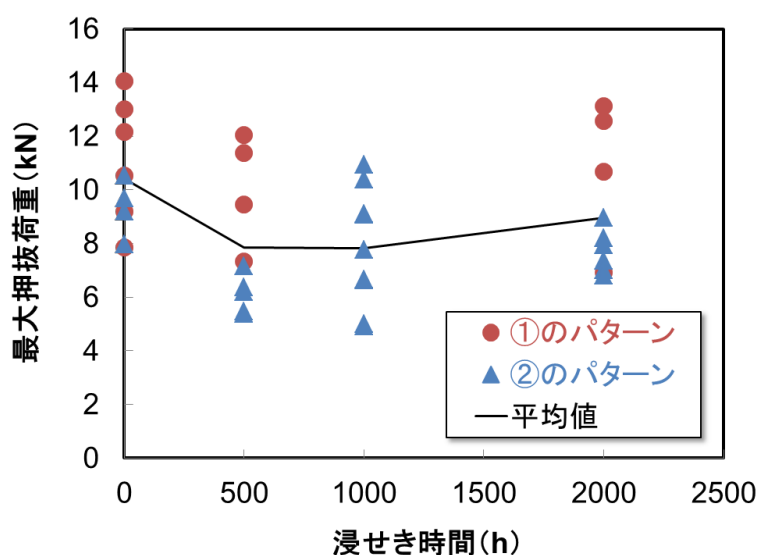
押抜試験で得られた典型的な荷重－変位曲線（参考 図 1.2.1.10）では、最大荷重に至るまで滑らかな曲線を示す①のパターンと、試験初期の比較的低い荷重で極値を示す②のパターンが見られた。②を示した試験片では、試験初期の比較的低い荷重で接着剤に局所的な破壊が生じたものと推察される。押抜試験で得られた全ての荷重－変位曲線を①②のパターンに分類し、最大荷重の区分毎に該当する試験片数をカウントした結果を参考 図 1.2.1.11 に示す。最大荷重が小さくなるにつれて②のパターンの荷重－変位曲線を示すものの割合が大きくなり、逆に最大荷重が 11 kN を超えたものについては全て①のパターンの荷重－変位曲線となった。



参考 図 1.2.1.11 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

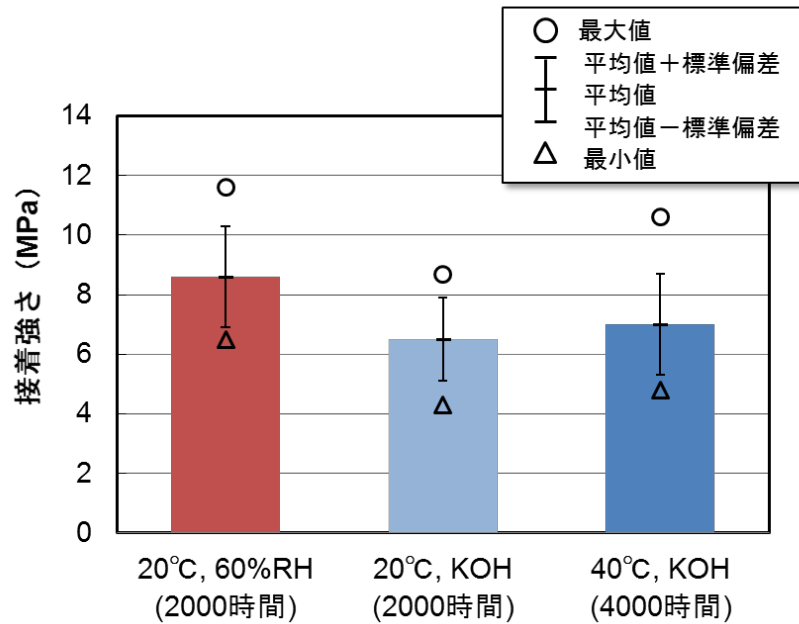
(f) KOH 浸せきにおける接着系アンカーの力学的変化

40°Cの KOH 水溶液に浸せきした時の、アンカー（製品 A）の最大押抜荷重の経時変化を参考図 1.2.1.12 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。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 時間浸せき後においていずれのサンプルとも参考図 1.2.1.10 における②になったが、その他は①と②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。



参考図 1.2.1.12 最大押抜荷重の経時変化 (40°C, pH13.2 KOH 水溶液浸せき)

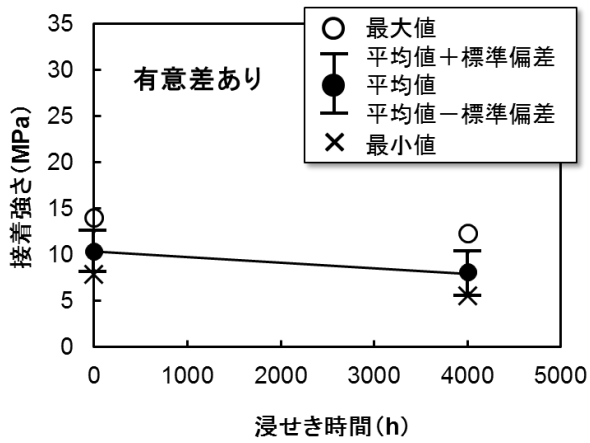
各環境条件下で所定の時間浸せき（暴露）後、押抜試験によりアンカー接着強さを求めた結果を参考図 1.2.1.13 に整理した。20°C、60%RH の気中に 2000 時間暴露した試験片では最も接着強さが大きく、平均で 8.6 MPa となった。一方で、KOH 水溶液に浸せきした場合には、20°C、2000 時間で平均 6.5 MPa、40°C、4000 時間で 7.0 MPa となり、環境液の温度や浸せき時間による差異は明確ではなかった。気中暴露の試験片でアンカー接着強さがやや高かったのは、前述のとおり、押抜試験時における試験片の物理的な状態の差異によるものであると考えられる。



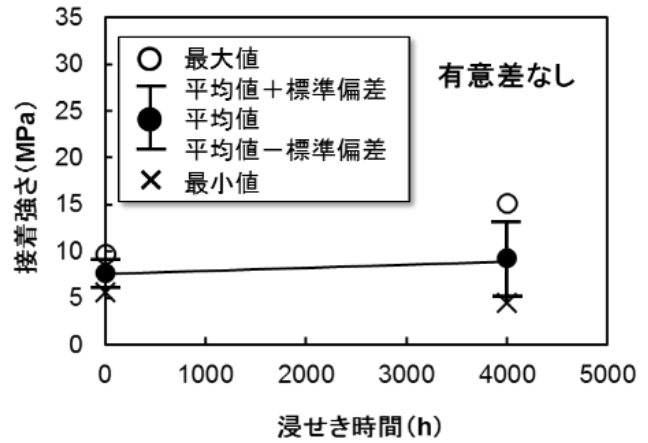
参考 図 1.2.1.13 各環境条件下で浸せき（暴露）後のアンカー（製品 A）の接着強さ

接着剤（樹脂）の種類や施工方法の異なる 4 種の接着系あと施工アンカーについて、40°C の KOH 水溶液に浸せきした時の、接着強さの経時変化を参考 図 1.2.1.14 に示す。いずれの実験ケースにおいても、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、変動係数は製品 A、B、C、D の順にそれぞれ 23%、18%、37%、13%となった。いずれの製品においても、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。接着強さの平均値に着目すると、4000 時間浸せき後には、製品 B を除きいずれもわずかながら低下が見られた。また、母材コンクリートにあらかじめアルカリを添加したケースでは、浸せきにより接着強さがわずかに増加した。

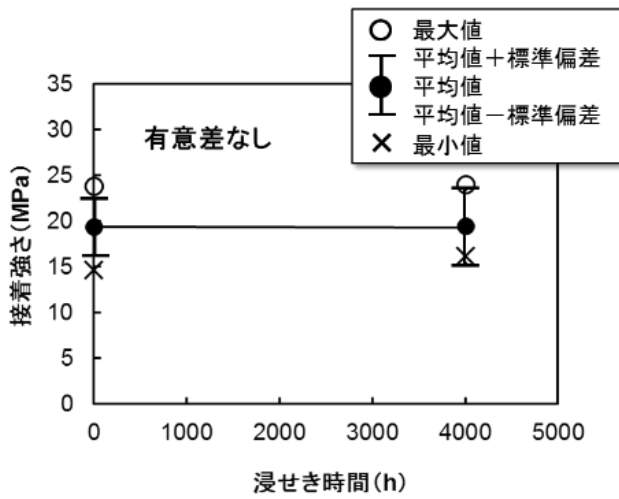
そこで、浸せき前と 4000 時間浸せき後の平均値について、有意水準 5% で F 検定および t 検定を行ったところ、製品 A（アルカリ添加なし）は有意差あり、製品 B、C、D および製品 A（アルカリ添加あり）については有意差は無いとの結果が得られた。



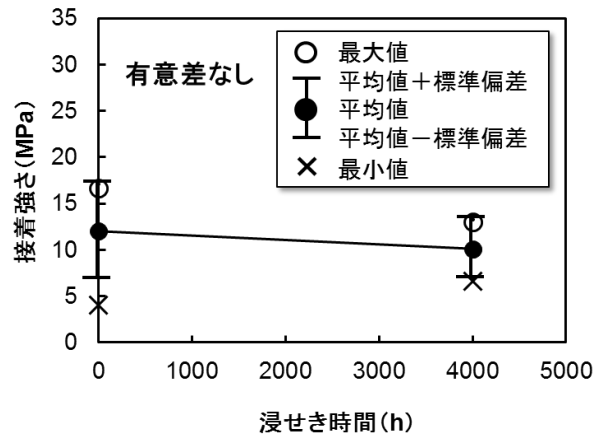
(a) 製品 A (母材コンクリートへのアルカリ添加なし)



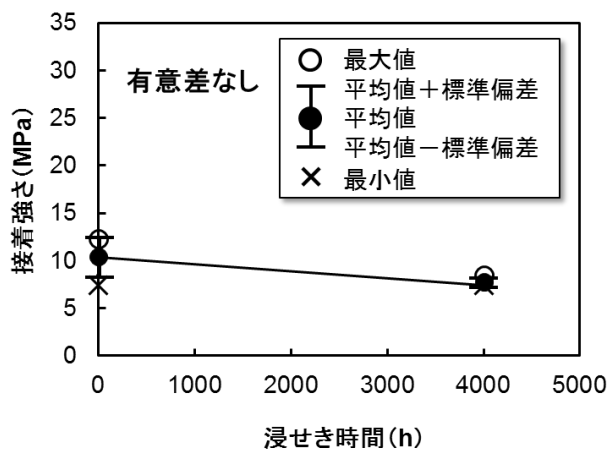
(b) 製品 A (母材コンクリートへのアルカリ添加あり)



(c) 製品 B



(d) 製品 C



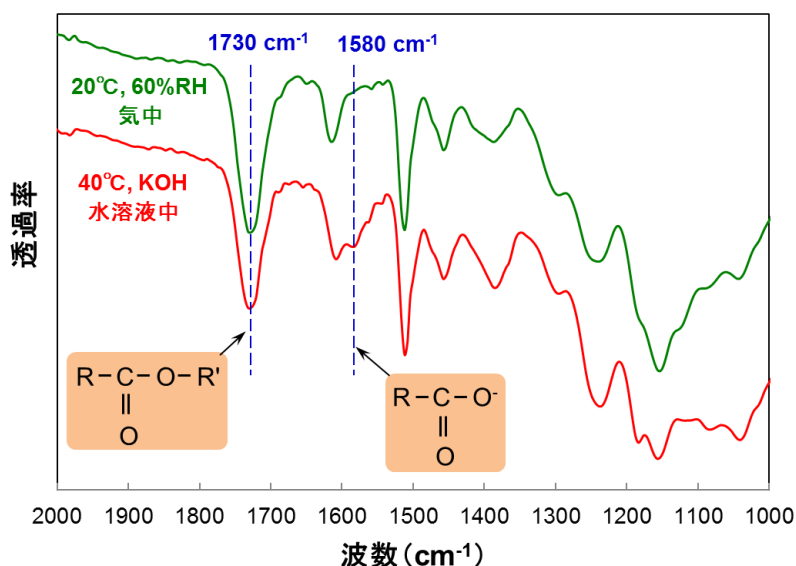
(e) 製品 D

参考 図 1. 2. 1. 14 接着系あと施工アンカーの接着強さの経時変化 (40°C、pH13.2 水酸化カリウム水溶液浸せき)

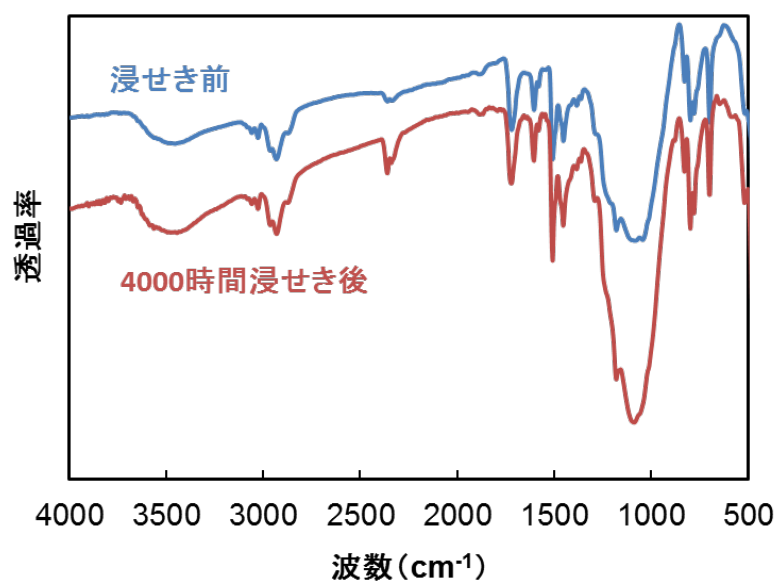
(g) KOH 浸せきにおける接着系アンカーの化学的变化

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。参考 図 1.2.1.15 は 20℃、60%RH の気中または 40℃の KOH 水溶液中で 2000 時間経過後の、接着剤（製品 A）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℃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^{参考 4.5)}。すなわち、参考 図 1.2.1.15 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。一方、製品 B、C、D については、アルカリ浸せきの前後で明確な赤外吸収スペクトルの変化は認められなかった（参考 図 1.2.1.16）。この結果から、製品 B、C、D については、実験を行った範囲内ではアルカリによる劣化は生じていないものと推察される。

既往の知見^{参考 4.5)}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、浸せきによる製品 A の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^{参考 6)}。

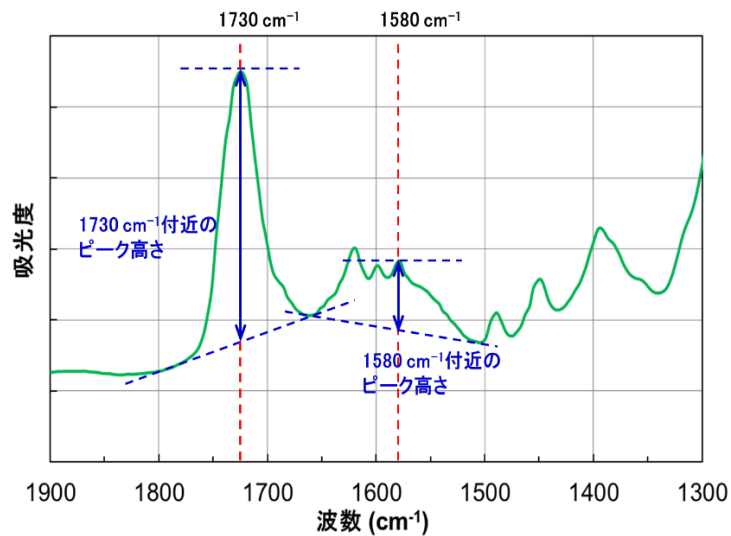


参考 図 1.2.1.15 接着剤表面の典型的な赤外吸収スペクトル（2000 時間経過後）



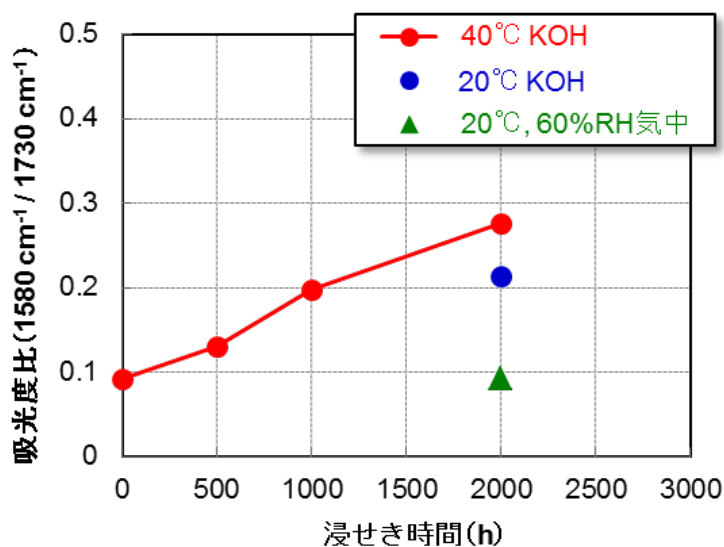
参考 図 1.2.1.16 アルカリ浸せき前後におけるアンカー接着剤の赤外吸収スペクトルの一例（製品 B）

- ① スペクトルを吸光度に換算して解析する。
- ② 1580cm^{-1} 付近および 1730cm^{-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（参考 図 1.2.1.17）。なお、 1580cm^{-1} 付近に明確な吸収ピークを持たない試料については、 1580cm^{-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。
- ③ 上記で求められる 1580cm^{-1} 付近／ 1730cm^{-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。（ 1580cm^{-1} ／ 1730cm^{-1} 比が大きいほど加水分解が進んでいることとなる。）



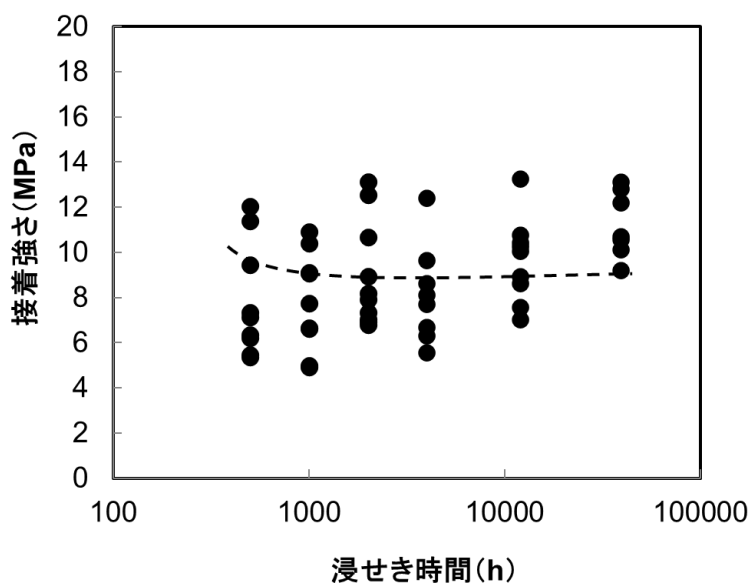
参考 図 1.2.1.17 赤外吸収スペクトルにおけるピーク高さの求め方

赤外吸収スペクトルの解析結果を参考 図 1.2.1.18 に示す。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。

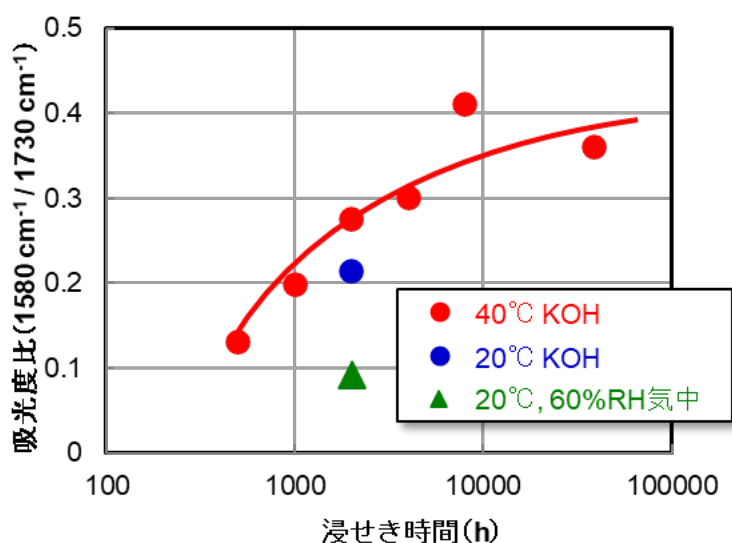


参考 図 1.2.1.18 赤外吸収スペクトルにおける吸光度比の経時変化（1580 cm⁻¹ 付近 / 1730 cm⁻¹ 付近）

そこで、さらに長時間浸せきした場合の挙動を把握するために、製品 A について浸せきを継続することとした。参考 図 1.2.1.19 および参考 図 1.2.1.20 はアルカリ浸せきを 39000 時間まで継続したときの、製品 A の接着強さおよび吸光度比（ 1580 cm^{-1} 付近 / 1730 cm^{-1} ）の経時変化を示している。接着強さは浸せき初期にわずかな低下を示したものの、その後はほぼ横ばいに推移し、39000 時間後においても初期と同等の水準を維持することがわかった。また、吸光度比の変化についても浸せき時間の増加に伴って徐々に緩やかとなることが明らかとなった。これらの結果から、加水分解による接着強さへの影響は、小さいことが示された。



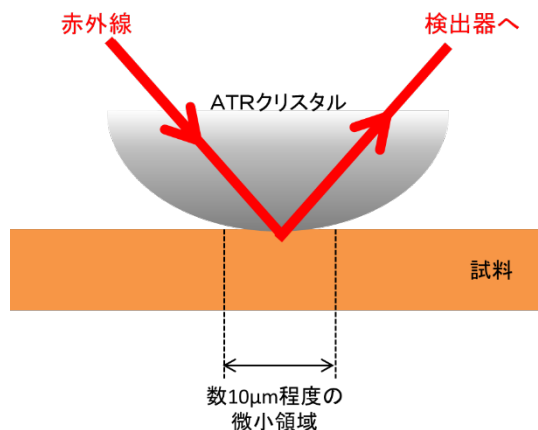
参考 図 1.2.1.19 製品 A における接着強さの経時変化（ 40°C 、 $\text{pH}13.2$ 水酸化カリウム水溶液浸せき）



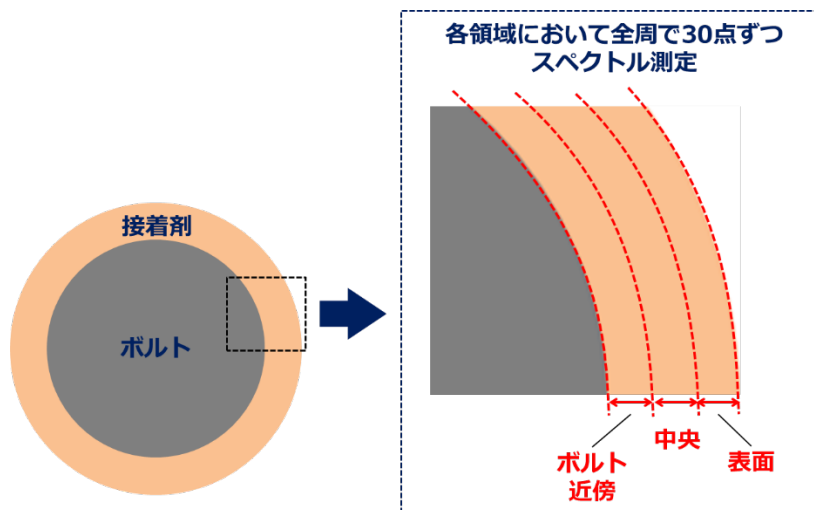
参考 図 1.2.1.20 赤外吸収スペクトルにおける吸光度比の経時変化（ 1580 cm^{-1} 付近 / 1730 cm^{-1} 付近）

(h) 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。



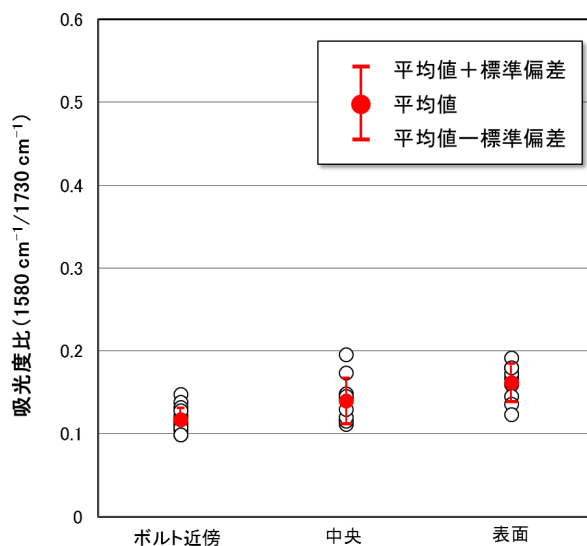
参考 図 1. 2. 1. 21 ATR 法の概略



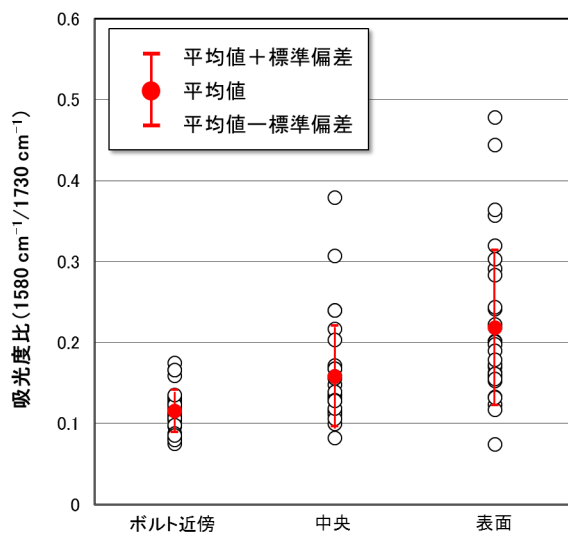
参考 図 1. 2. 1. 22 ATR 法による接着剤断面分析方法の概略

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 μ m の微小領域を非破壊で直接分析することができる（参考 図 1. 2. 1. 21）。試料表面は研磨はせず、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。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、参考図1.2.1.22に示した。



(a) 20°C, 60%RH 気中暴露



(b) 40°C, KOH 水溶液浸せき

参考図 1.2.1.23 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参考 図 1.2.1.23 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℃の KOH 水溶液に浸せきした試料については、ボルト近傍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。

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

本研究では、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、接着剤の成分として用いられることの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す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。しかしながら、これらの変化は浸せき時間が長期になるにつれて徐々に緩やかになること、接着強さへの影響は小さいことが示された。

1.2.2 持続荷重

(1) 概要

接着系あと施工アンカーに持続的な荷重が長時間作用する場合の耐力は、最大耐力に比べて明らかに低下することが知られている^{参考7)}。しかし、これらのデータは十分に蓄積されておらず、適切な設計が行えないのが現状である。特に、母材であるコンクリートに発生したひび割れなどに起因し、コンクリート／アンカーの接着面に水が滞留するような場合、持続荷重と水分との複合的な作用により接着系アンカーの耐久性が低下することが懸念されるが、その挙動については明らかにされていない。

そこで、接着系あと施工アンカーを施工したコンクリート供試体を水中に浸せきし、この状態でアンカーに持続荷重を負荷するクリープ試験を行い、湿潤環境下における接着系アンカーのクリープ挙動について検討した。

(2) 実験方法

(a) 実験材料

市販されている有機系および無機系のアンカーを選び、試験に供した（参考表 1.2.2.1）。有機系製品はガラス製のカプセルに接着剤（主剤、硬化剤）と骨材が封入されたタイプであり、これをドリル孔に挿入し回転・打撃を与えて施工する。また、無機系はカートリッジ内で攪拌したセメントモルタルをガンにて注入し施工するものである。母材となるコンクリートは、参考表 1.2.2.2 に示すものを用いた。このコンクリート円柱に、上記のアンカーをメーカーの指定する方法で設置し、これを供試体とした（参考図 1.2.2.1）。

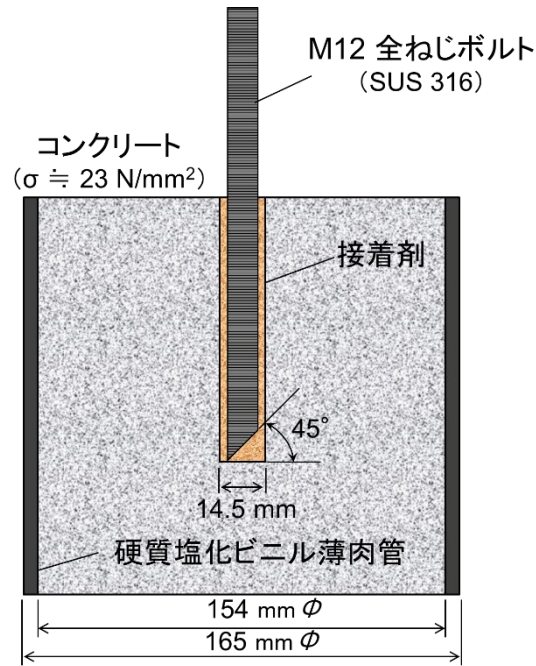
参考表 1.2.2.1 クリープ試験に用いた接着系あと施工アンカーの寸法と強度（製造メーカーの技術資料より）

アンカーのタイプ	接着剤	外径 (mm)	長さ (mm)	アンカー筋	ドリル径 (mm)	穿孔長 (mm)	最大引張荷重 (kN)	付着強さ* (MPa)	長期許容引張荷重 (kN)
カプセル方式 回転・打撃型	不飽和 ポリエステル	13	100	M12	14.5	100	57.4	17.3	11.7
注入方式 カートリッジ型	セメント系モ ルタル	—	—	M12	16	84~	(有効付着長に依存)		

※ 有効付着長（穿孔長－カット部長）により算出

参考表 1.2.2.2 母材コンクリートの配合

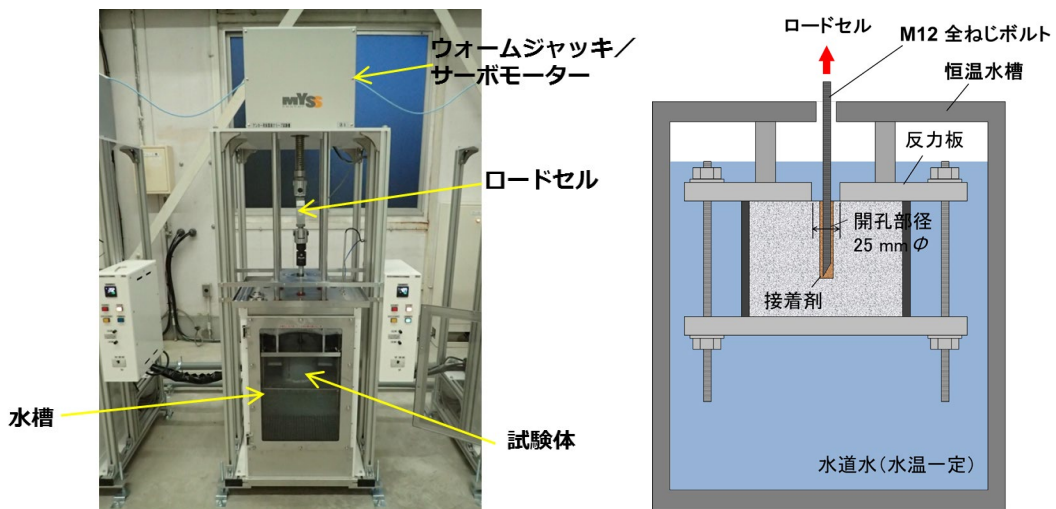
水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				混和剤A	混和剤B
		水	セメント	細骨材	粗骨材		
70	47	163	23.3	87.4	1001	セメント× 0.25%	セメント× 0.003%



参考 図 1.2.2.1 供試体の概略図

(b) 実験装置

クリープ試験機は、ロードセルによる荷重検出とサーボモータ駆動による張力ロッドの制御とを組み合わせたものである（参考 写真 1.2.2.1）。最大荷重は 50 kN、ウォームジャッキのストロークは 100 mm となっている。この試験機には恒温水槽が備わっており、常温～70℃の範囲で、供試体を一定水温の水中に浸せきしつつ、引張クリープ試験を行うことができる（参考 図 1.2.2.2）。



参考 写真 1.2.2.1 クリープ試験機の概観

参考 図 1.2.2.2 浸せきクリープ試験の模式図

(c) 実験方法

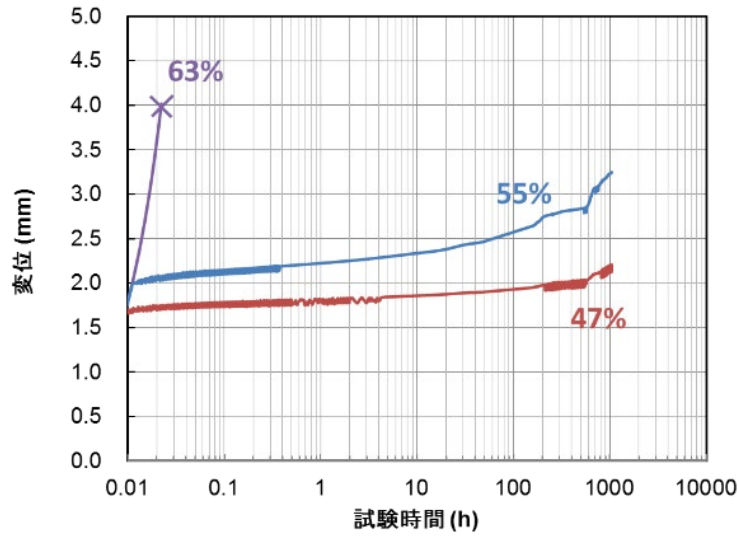
予備試験において万能試験機を用い有機系アンカーの最大引張荷重を求めたところ、49.7 kN であった。そこでクリープ試験においては、最大引張荷重の 80% (39.8 kN)、70% (34.8 kN)、60% (29.8 kN) の 3 水準の引張荷重を持続的にアンカーに負荷し、この時のアンカーの変位を測定した。一方、無機系アンカーについては、接着剤/コンクリート母材界面での付着破壊を生じさせるために、アンカーの埋込深さ(付着長)を標準よりも短い 60 mm とした。この場合の最大引張荷重は 53.3kN であり、最大荷重の 65~85%の引張荷重をアンカーに負荷し、クリープ挙動を調べた。

クリープ試験では、試験機の張力ロッドの変位をアンカーの変位とみなし、これを自動記録した。試験は、供試体を無負荷で所定の水温の水中に 1 週間浸せきした後に開始した。クリープ試験開始時には、およそ 60 秒で目標の荷重に達するよう徐々に載荷し、供試体への衝撃を回避した。浸せき水は槽内で十分に攪拌されており、水温は 25℃~65℃の範囲で設定した値に保たれている。比較として、供試体を室温(20~35℃程度、温度制御なし)大気中に設置した状態でのクリープ試験も行った。

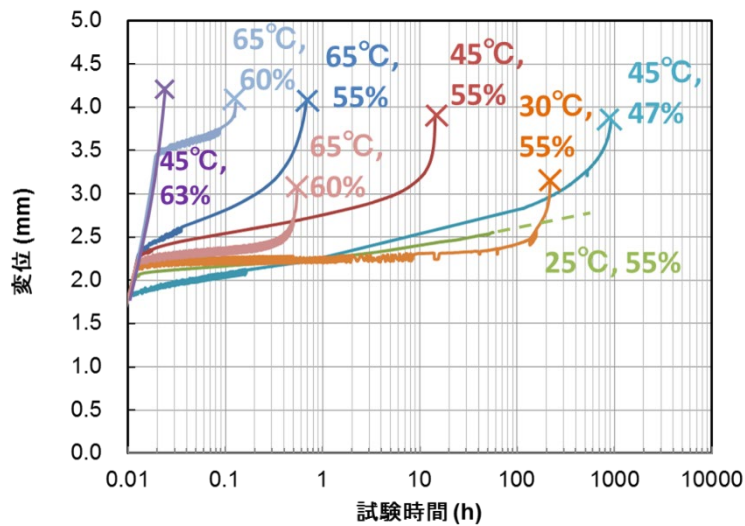
(3) 実験結果

クリープ試験における接着系アンカーの変位の経時変化を参考 図 1.2.2.3 に示す。負荷する荷重の増大に伴いアンカーのクリープ変形は速くなり、最大荷重の 63%を負荷した試験水準では、試験開始から数分のうちに引抜破壊(付着切れ)に至り、試験が終了した。最大荷重の 63%のケースでは、供試体により破壊までの時間に若干の差異があったものの、水中と大気中とで明確な違いは認められなかった。

水中に浸せきし、引張耐力の 55%を負荷したケースを比較すると、水温の上昇に伴いクリープ変形が速くなり、65℃では試験開始から 1 時間程度、45℃では 15 時間程度、30℃では 110 時間程度で破壊に至った。一方で、25℃のケースでは 1000 時間以降もクリープ変形の色度は緩やかであり、破断には至らなかった。大気中で引張耐力の 55%を負荷した結果と、同程度の温度(25℃)で水中で荷重を負荷した結果とを比較すると、載荷の初期に生じた変位は水中が大気中よりも大きく、また変位の経時変化は水中の方がやや速い結果となった。



(a) 室温大気中

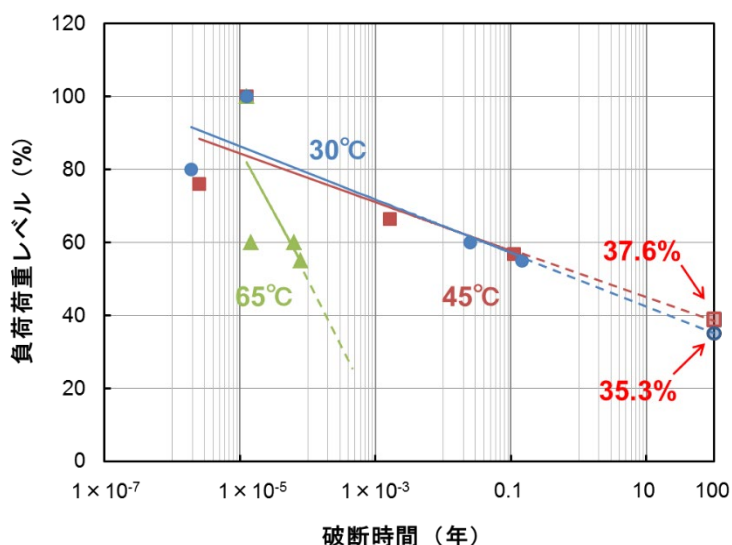


(b) 水中

参考 図 1.2.2.3 持続荷重下でのアンカー変位の経時変化

AASHTO TP 84-11 (2017)^{参考 8)}では、接着系あと施工アンカーのクリープ破断寿命を予測する方法として、3段階の負荷荷重レベル（100%、80～70%、70～60%）と破断時間との関係から得られる近似直線を外挿することにより、より低い荷重を荷重したときの破断時間求める手順が示されている。この方法に基づき、水中でのクリープ試験結果を整理したグラフを参考 図 1.2.2.4 に示す。30°Cおよび45°Cの近似直線には大きな差異は無く、破断時間100年を想定した時の許容負荷荷重レベルはそれぞれ35.3%、37.6%となった。製造メーカーの技術資料によると、試験に用いたアンカーの長期許容引張荷重

は接着系あと施工アンカーの設計式^{参考9,10)}を用いて算定されており、引張耐力のおよそ 20% (11.7 kN) に設定されている。すなわち、一般的な温度条件であれば湿潤環境であっても、100 年間でクリープ破断は生じない荷重レベルに設定されていることがわかった。一方、水温 65°C の高温になると、低い負荷荷重でも寿命が極端に短くなることが示され、使用荷重だけでなく、使用温度の許容値についても適切に設定する必要があることを把握した。



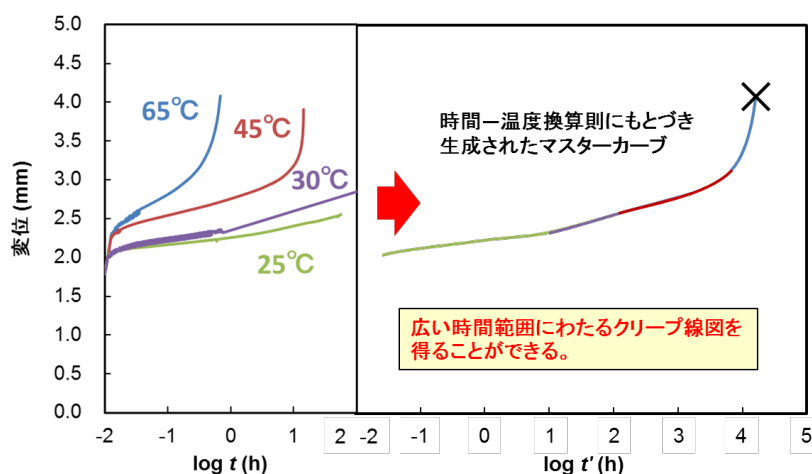
参考 図 1.2.2.4 線形外挿による有機系アンカーのクリープ破断寿命の予測 (水中)

多くの高分子材料は粘弾性を有しているために、時間依存性と温度依存性との間に相関関係があり、高温、長時間領域の現象と低温、短時間領域の現象とが同じであることが実験的に把握されている。すなわち、種々の温度環境下で測定されたクリープ曲線を時間軸に沿って水平移動させると、非常に広い時間範囲にわたるクリープ曲線 (マスターカーブ) が得られることが知られており、これを時間-温度換算則と称している^{参考7)}。任意の測定温度 T において物理時間 t で観察された現象と同じ現象を基準温度 T_0 において、(参 2) 式で表される換算時間 t' で観察することができる。

$$\log a_{to}(t) = \log t - \log t' \quad (\text{参 2})$$

ここで、 $\log a_{to}(t)$ は時間-温度移動因子 (シフトファクター) であり、測定温度 T と基準温度 T_0 によって決まるものである。

参考 図 1.2.2.5 は、最大引張荷重の 70%を負荷した実験ケースについて、各温度条件下で得られた実験データから、基準温度を 25℃として時間—温度換算則によってマスターカーブを作成した結果を示している。この結果から、25℃の湿潤環境下において最大引張荷重の 70%を負荷した場合、およそ 10000 時間（400 日）程度で破断に達することが予測される。



参考 図 1.2.2.5 クリープ変形曲線のマスターカーブ（最大引張荷重の 70%の負荷、基準温度 25℃）

マスターカーブを作成する際の、各温度条件下でのクリープ変形曲線のシフト量、すなわち $\log a_{T_0}(t)$ （シフトファクター）と、温度の逆数との関係を参考 図 1.2.2.6 に示す。図中の直線はシフトファクターをアレニウス式（(参 3) 式）で近似したものである。

$$\log a_{T_0}(t) = \frac{\Delta H}{2.303R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \quad (\text{参 3})$$

ここで、

ΔH : 活性化エネルギー (kJ/mol)

R : 一般ガス定数 8.314×10^{-3} (kJ/ K · mol)

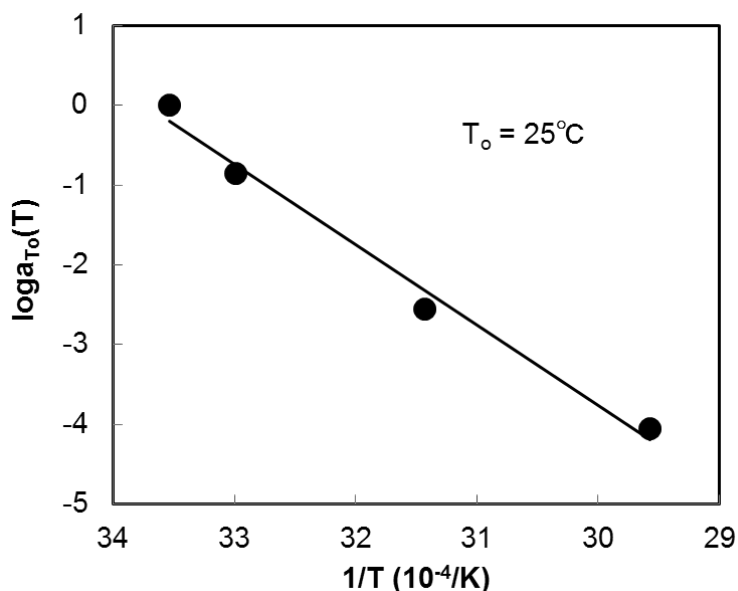
T : 測定温度 (K)

T_0 : 基準温度 (K)

以上の結果から、実験に用いた接着系あと施工アンカーの湿潤環境下でのクリープ現象は時間—温度換算則が適用できることが明らかとなり、活性化エネルギー ΔH はおよそ 192.7 kJ/mol であることが

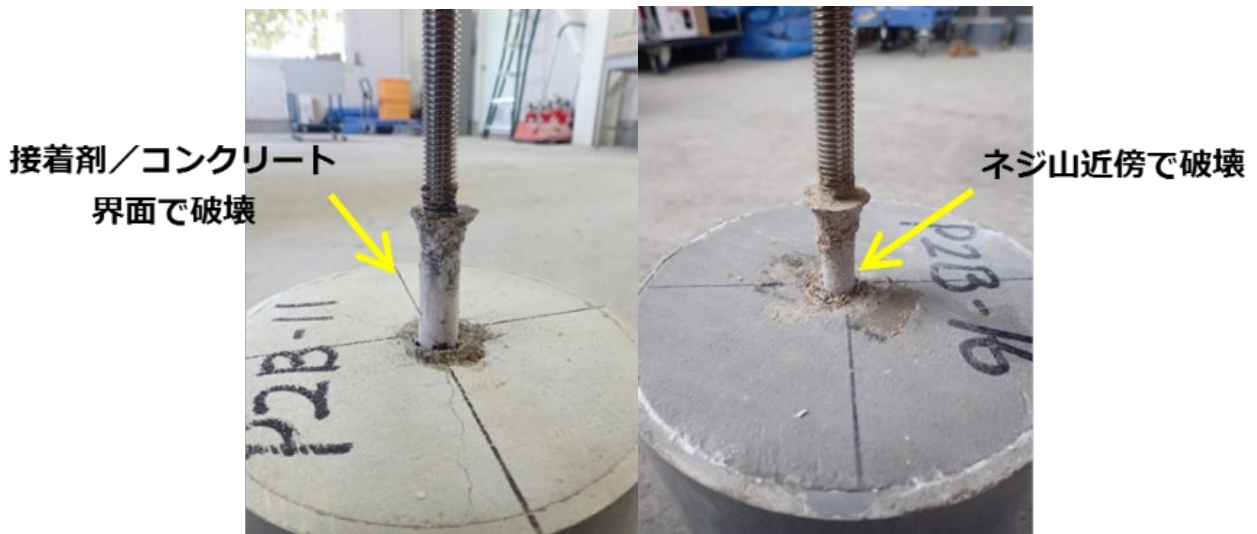
示された。

同様の手法を利用することにより、各種条件の持続荷重が作用する場合の、接着系あと施工アンカーの寿命予測が可能になるものと考えられる。



参考 図 1.2.2.6 シフトファクターと温度との関係

最大引張荷重の 80%を負荷し、破壊に至った供試体の写真を参考 写真 1.2.2.2 に示す。大気中で試験を行ったケースでは、アンカー接着剤とコンクリートの界面で破壊が生じているのに対し、45°Cの水中で試験したケースではボルトのねじ山近傍で破壊が生じており、アンカー接着剤の大部分がコンクリートに付着したままである様子が観察された。この様な破壊形態は、水中に浸せきしクリーブ破壊に至った他のケースでも見られた。このことから、母材コンクリートが湿潤状態にある場合と、そうでない場合とで、持続荷重による接着系アンカーの破壊に至るまでの機構や、破壊モードが異なることが推察される。



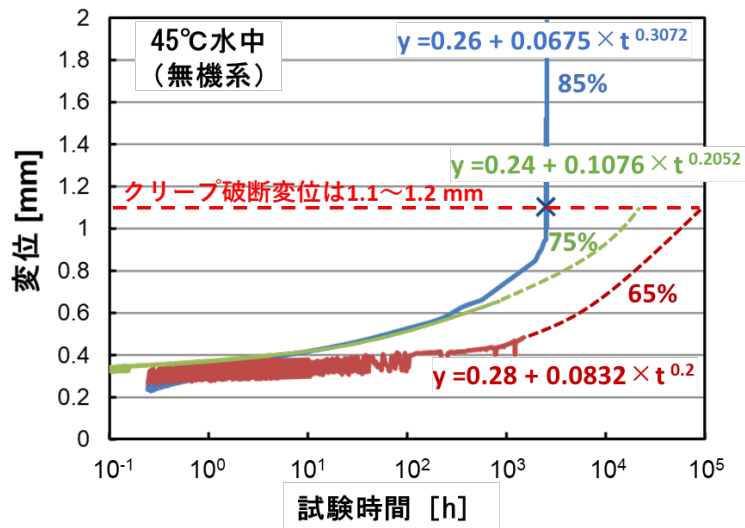
参考 写真 1.2.2.2 クリープ試験により破壊後の接着系アンカーの概観

無機系アンカーのクリープ線図の一例を参考 図 1.2.2.7 に示す。これまで得られた試験結果から、無機系アンカーのクリープ挙動は有機系とは異なり、水分や温度の影響を受けにくいことが示唆されている。45°C水中で載荷したケースについて、ETAG 001: Guideline for European technical approval of metal anchors for use in concrete^{参考 11)}で示される長期的なクリープ変形量の推定式(参 4)を適用し、クリープ破断に至るまでの時間を試算した。

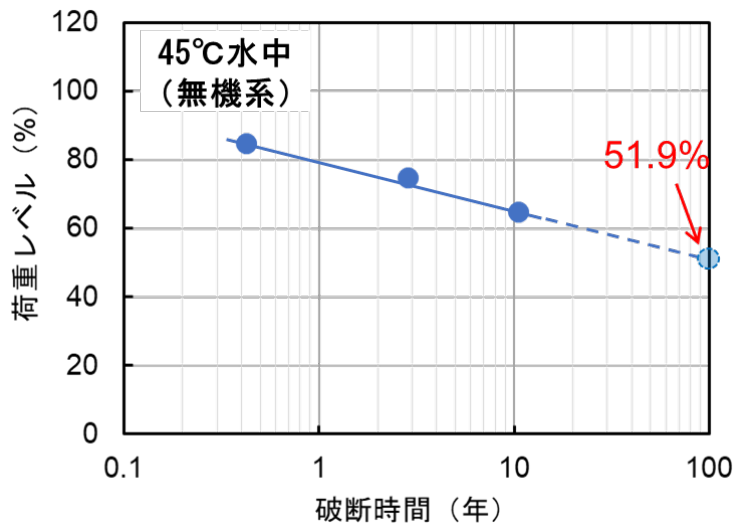
$$S(t) = S_0 + a \cdot t^b \quad (\text{参 4})$$

ここに、 $S(t)$: 時間 t におけるクリープ変形量、 S_0 : 初期変形量、 t : 時間、 a, b : 定数

その結果、アンカーに負荷される持続荷重が最大引張荷重の 51.9%より低いレベルであれば、100 年間の供用でもクリープ破断に至らないことがわかった (参考 図 1.2.2.8)。



参考 図 1.2.2.7 持続荷重下での無機系アンカー変位の経時変化



参考 図 1.2.2.8 線形外挿による無機系アンカーのクリープ破断寿命の予測（水中）

(4) まとめ

湿潤環境下でのクリープ試験では、高温、短時間の実験結果にもとづき低温、長時間の寿命予測ができる可能性が示された。水温 65°C の高温になると、低い負荷荷重でも寿命が極端に短くなることが示され、使用荷重だけでなく、使用温度の許容値についても適切に設定する必要があることを把握した。

1.2.3 熱

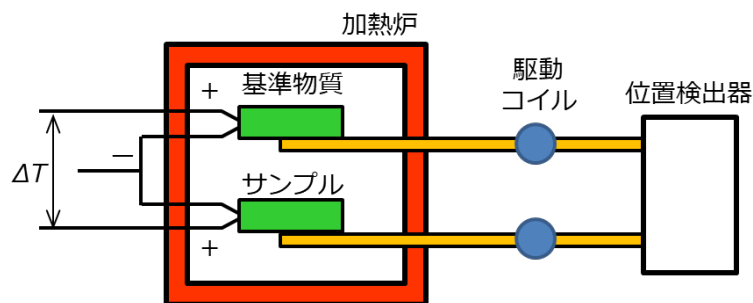
(1) 概要

接着系あと施工アンカーの火災時および火災後の特性については、主に建築分野において、鉄筋コンクリート耐震補強や非構造部材、附属設備吊り下げ用途の定着を想定した付着性能の検証等の事例が報告されている^{参考 12)}。一方で、あと施工アンカーを道路トンネルの附属物の定着へ適用する場合、想定される火災の規模や特性は一般的な建築物とは大きく異なることが予見されるが、この様な火災を想定したあと施工アンカーの耐火性能に関する検討事例は極めて少ない。そこで、これらの検討を行うための初歩的段階として、アンカー接着剤の熱的特性を熱重量示差熱分析装置 (TG/DTA) を用いて分析した。また、高温履歴を受けた接着系アンカーの使用性について把握するため、アンカーを打設した小型のコンクリート供試体を熱処理し、除熱後のアンカーの引張強さを評価した。

(2) 実験

















(a) 熱重量示差熱分析 (TG/DTA) の概要

熱重量示差熱分析装置 (TG/DTA) の概略図を参考 図 1.2.3.1 に示す。TG/DTA は熱重量分析 (thermal gravimetric analysis, TGA) と示差熱分析 (differential thermal analysis, DTA) とが同時に行える熱分析装置である。TG は、試料の温度を一定のプログラムに従って変化させながら、その試料の質量を温度の関数として測定する方法である。また、DTA は試料と基準物質の温度を一定のプログラムに従って変化させながら、その試料と基準物質との温度差を温度の関数として測定する方法である。温度変化に伴って試料が転移や反応を起こした場合、基準物質との温度差が変化するため、これを検出する。TG および DTA を組み合わせることにより、温度変化によって生じる試料の様々な熱挙動 (参考 表 1.2.3.1) を把握することができる。



参考 図 1.2.3.1 熱重量示差熱分析装置 (TG/DTA) の概略図

参考表 1.2.3.1 試料の熱挙動と TG/DTA 曲線^{参考 11)}

熱挙動	TG	DTA	熱挙動	TG	DTA
熱分解			昇華・蒸発		
燃焼			転移・融解		
酸化			結晶化		
還元			ガラス転移		

(b) 実験方法

「カプセル方式」の接着系あと施工アンカー製品のうち無機系 1 種類（セメント系）、無機有機ハイブリッド系 1 種類、有機系を 2 種類（不飽和ポリエステル樹脂、ビニルエステル樹脂）、「現場調合方式」の 1 種類（エポキシ樹脂）を分析した（参考表 1.2.3.2）。有機系については接着剤樹脂を 170×170×2 mm の平板状に成形し、ここから試料を採取して分析に供した。一方、無機系についてはモルタル試験用の金型を用い、40×40×160 mm の供試体を作製し、ここから分析試料を採取した。

TG/DTA 分析の分析条件は JIS K 7120:1987「プラスチックの熱重量測定方法」および JIS K 7121:1987「プラスチックの転移温度測定方法」を参考に、昇温速度 20°C/min、窒素ガス流量 40 mL/min. とした。

参考表 1.2.3.2 実験に用いたあと施工アンカー

製品種別	アンカーのタイプ	接着剤*	アンカー筋	穿孔径(mm)	穿孔長(mm)
A (有機系)	カプセル方式	UP	M12	14.5	100
B (有機系)	カプセル方式	VE	M12	14.5	100
C (有機系)	注入方式	EP	M12	14.5	100
D (ハイブリッド系)	注入方式	VE/セメント	M12	14	110
E (無機系)	注入方式	セメント	M12	16	85

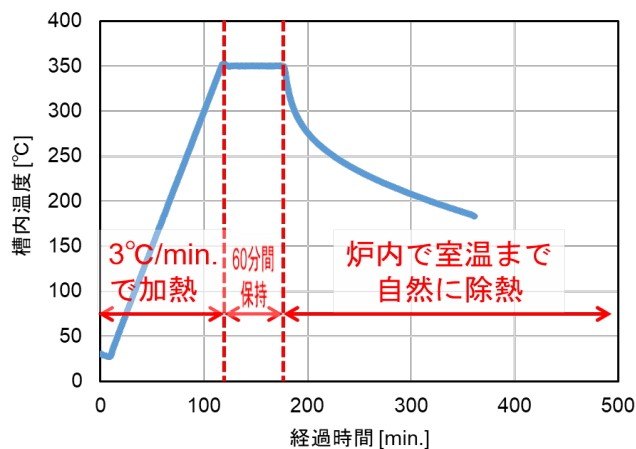
※UP：不飽和ポリエステル VE：ビニルエステル EP：エポキシ

(c) 高温履歴を受けたアンカー接着剤の力学試験

トンネル構造が火災による高熱を受けた場合の挙動については、RABT-ZTV 曲線などトンネル火災

を想定した温度-時間曲線を用いて評価されることが多い。RABT-ZTV 曲線は「ドイツにおける道路トンネル設備と運用に関する指針」^{参考 13)}により定められており、発火から 5 分で 1200°C に達し、その状態が 30~60 分持続した後、鎮火していく状況を模擬したものである。一方で、コンクリート内部の温度は、火炎に曝される表面から深さ方向に徐々に低下し、深さ 100 mm 程度では 200~300°C にとどまるとの報告^{参考 14)}もある。あと施工アンカーはコンクリートに埋設した状態で用いられることから、この実験においては常温~350°C の範囲における接着剤の挙動について評価することとした。

本実験における温度-時間曲線の例を参考 図 1.2.3.2 に示す。供試体の加熱はマッフル炉を用いて行った。炉内に供試体を静置した後、室温から設定した最高温度まで約 3°C/min. 程度で急速に昇温させ、そのまま 60 分間保持した。その後、約 120 分間かけて室温まで徐々に冷却し、供試体が完全に常温となってから力学試験に供した。有機系については注入方式のエポキシ樹脂系接着剤 2 種類（エポキシ樹脂 a、b）について試験を行った。170×170×2 mm に成形した平板から 40×25×2 mm の試験片を切り出し、これを加熱・試験に供した。また、無機系については 40×40×160 mm の供試体を用いた。試験時における材齢は、試験片または供試体の作製から 10 日後とした。有機系については JIS K 7171：プラスチック-曲げ特性の求め方に準拠した曲げ試験を行い、曲げ強さによって評価した。また、無機系については JIS R 5201：セメントの物理試験方法に基づき、曲げ強さ、圧縮強さによって評価した。



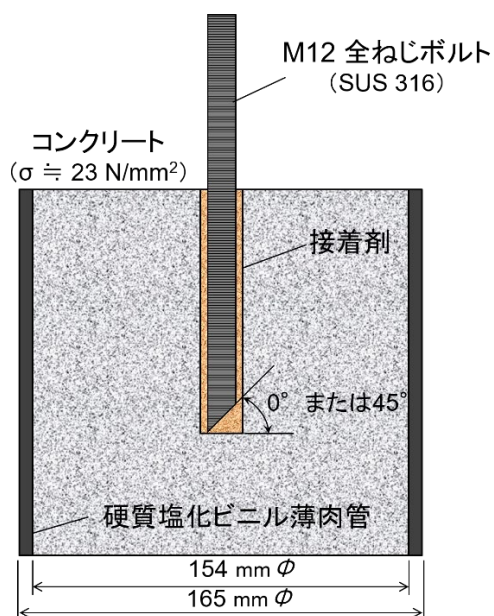
参考 図 1.2.3.2 本実験における温度-時間曲線の例（設定最高温度 350°C）

(d) 高温履歴を受けた接着系あと施工アンカーの引張試験

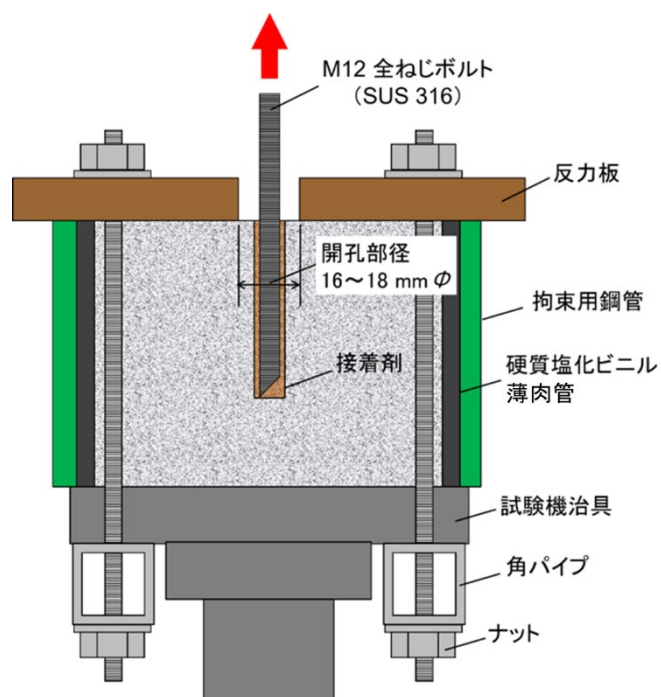
供試体の母材コンクリート（φ 154 × 150 mm）は、硬質塩化ビニル管を型枠にして打設した。水セメント比 70%、材齢 28 日の圧縮強度は約 23 MPa である（参考 表 1.2.3.3）。これに、上記の接着系アンカーをメーカーの指定する方法で施工し、供試体を作製した（参考 図 1.2.3.3）。

参考 表 1.2.3.3 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%



参考 図 1.2.3.3 試験体の概略図



参考 図 1.2.3.4 引抜試験の概略図

供試体の加熱は、常温～350℃の範囲で行った。マッフル炉内に供試体を静置した後、室温から設定温度（150、250、350℃）まで約3℃/min.で緩やかに昇温させ、そのまま60分間保持後、室温まで自然冷却し（参考図1.2.3.2）、供試体が完全に常温となつてからアンカーの引抜試験を実施した（参考図1.2.3.4）。引抜試験時のクロスヘッド速度は1mm/min.とし、載荷時に母材コンクリートの割裂破壊を回避するため、供試体周面を鋼板で拘束しつつ試験を行った。また、厚さ25mm、開口部径16mmないし18mmの鋼製反力板で供試体の上面全面を支持しボルト部分に荷重を加え、試験を行った。

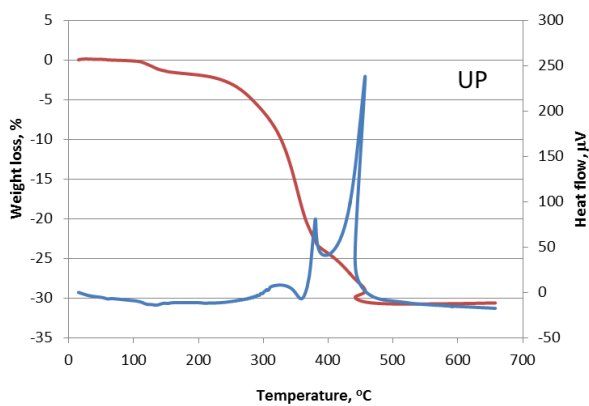
(3) 実験結果

(a) アンカー接着剤の熱による物性変化

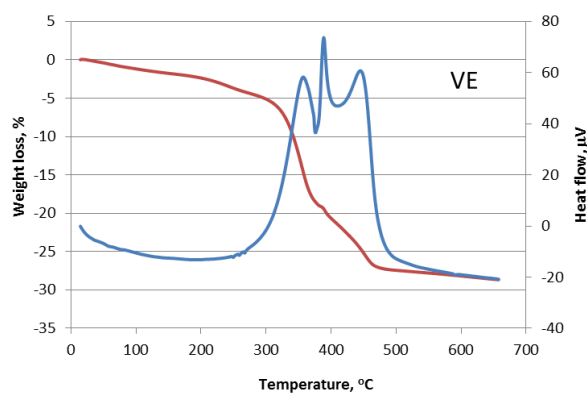
各種接着系アンカーのTG/DTA分析の結果を参考図1.2.3.5に示す。図の赤線はTG曲線を、青線はDTA曲線をそれぞれ示している。

無機系のアンカー接着剤は100℃付近で大きな吸熱反応と質量の減少が認められた（参考図1.2.3.5(e)）。これらの変化は、接着剤に含まれる水分の蒸発によるものと考えられる。その後、試料を昇温させると300℃、500℃、700℃付近で小さな吸熱反応が生じ、1000℃までの昇温でおよそ20%程度の質量減少が生じた。一方、有機系のアンカー接着剤では300～500℃付近で大きな吸熱発熱反応があり、30%程度の質量減少が認められた（参考図1.2.3.5(a)(b)）。これは有機成分の燃焼に起因する変化であると考えられる。燃焼反応後も70%程度の成分が残存しているが、これは製品に含まれている骨材やガラス片等の無機成分に由来するものであると考えられる。同じ有機系であっても現場調合方式のアンカー接着剤は、無機成分を含まないため、燃焼によって試料の100%が消失する結果となった（参考図1.2.3.5(c)）。

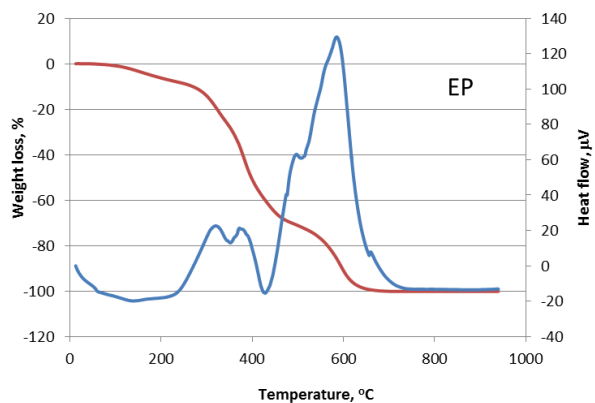
無機有機ハイブリッド系のアンカー接着剤においては、有機系と同様に300～500℃付近で大きな吸熱発熱反応があり、有機成分の燃焼に起因すると思われる35%程度の質量減少が認められた（参考図1.2.3.5(d)）。無機有機ハイブリッド系の接着系アンカーは「無機系」として販売されている製品が大半であるが、含有成分の種類や組成によっては、有機系に類似した熱挙動を示す場合があることが明らかとなった。



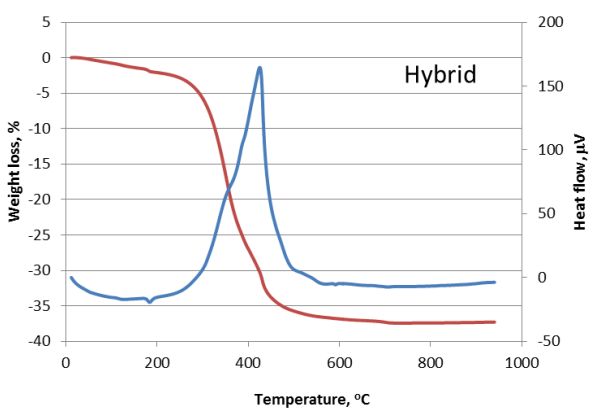
(a) 有機系（不飽和ポリエステル樹脂）



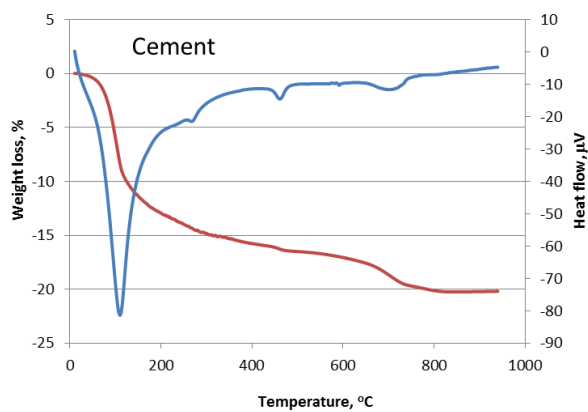
(b) 有機系（ビニルエステル樹脂）



(c) 有機系（エポキシ樹脂）



(d) 無機有機ハイブリッド系

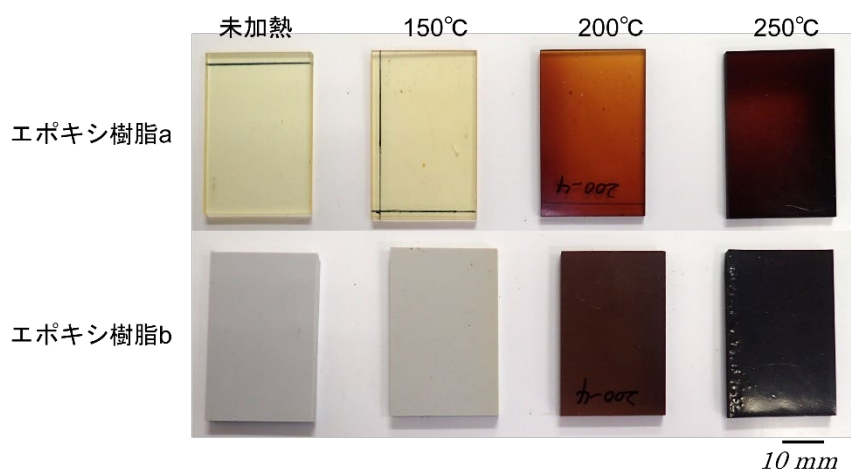


(e) 無機系（セメント系）

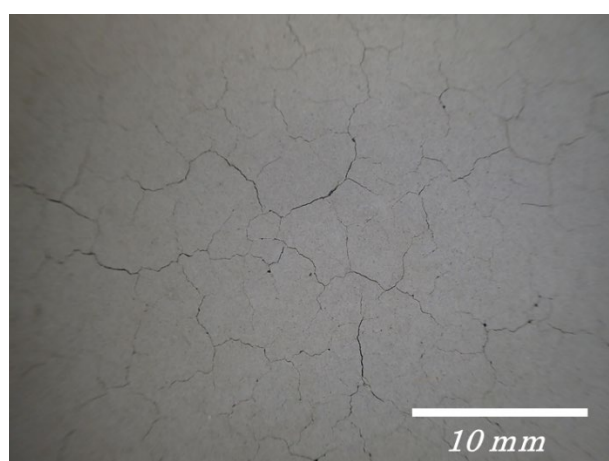
参考 図 1. 2. 3. 5 各種接着系アンカーの TG/DTA 分析結果

(b) 高温履歴を受けたアンカー接着剤の力学特性

高温履歴後のアンカー接着剤の外観を参考写真 1.2.3.1 に示す。有機系アンカー接着剤ではエポキシ樹脂 a、エポキシ樹脂 b ともに、最高温度が高くなるにつれ、黒く変色した。250℃まで加熱した場合、いずれの樹脂も、試験片表面の一部が変形した (参考写真 1.2.3.1(a))。なお、後ほど行った曲げ試験後の破面観察の結果、加熱による変色層は試験片の表面のみに形成されていることがわかった。無機系アンカー接着剤では加熱後の供試体表面に無数のひび割れが生じた。ひび割れは最高温度が高くなるにつれ、密になった (参考写真 1.2.3.1(b))。最高温度を 1000℃まで上昇させた際には、およそ 600～700℃で供試体が爆裂粉碎した。



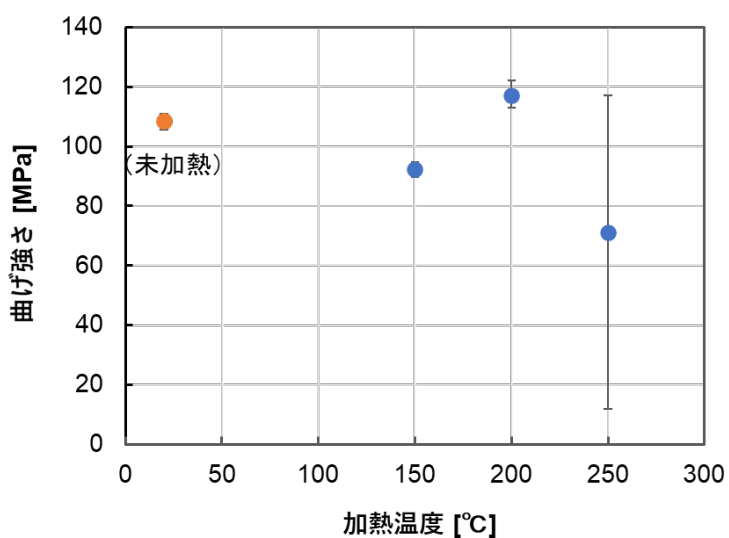
(a) 有機系アンカー接着剤



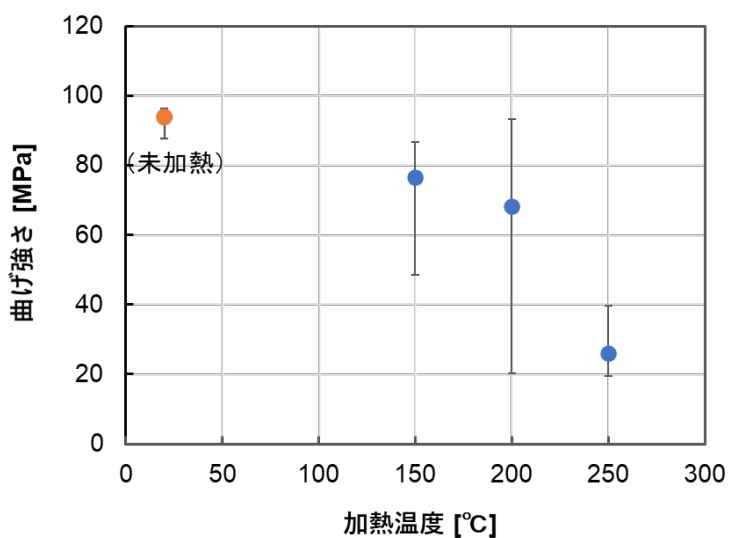
(b) 無機系アンカー接着剤 (250℃加熱後)

参考写真 1.2.3.1 高温履歴後のアンカー接着剤の外観

高温履歴後の有機系アンカー接着剤の曲げ強さを参考 図 1.2.3.6 に示す。それぞれの水準で、5回の試験を行った。エポキシ樹脂 a においては、200℃までの加熱で強度低下は無く、250℃で一部の試験片の曲げ強さが未加熱の場合の 10%程度まで低下した。一方、エポキシ樹脂 b では 150℃においても曲げ強さの低下が認められ、250℃では全ての試験片で未加熱の 40%を下回った。エポキシ樹脂 a とエポキシ樹脂 b とでは常温～300℃程度までの TG/DTA 曲線に大きな差異は無かった一方で、高温履歴後の曲げ特性に差が生じたのは、接着剤に含まれる顔料等の無機系の副資材の影響によるものと推察されるが、詳細は不明である。



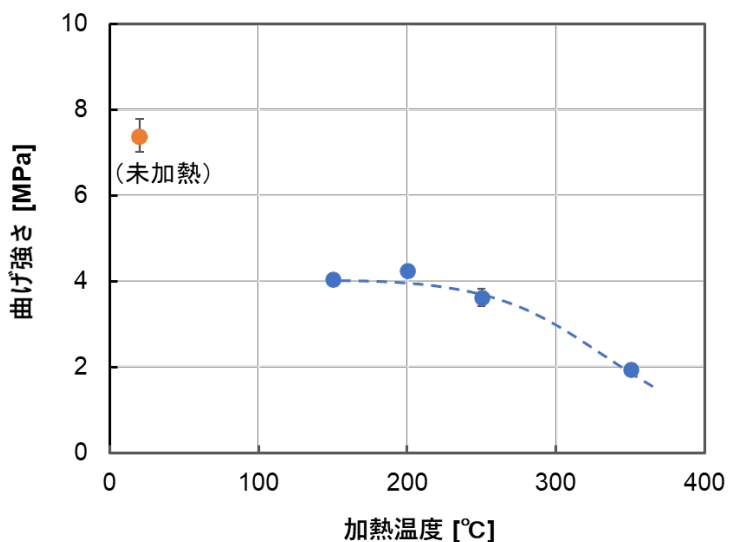
(a) エポキシ樹脂 a



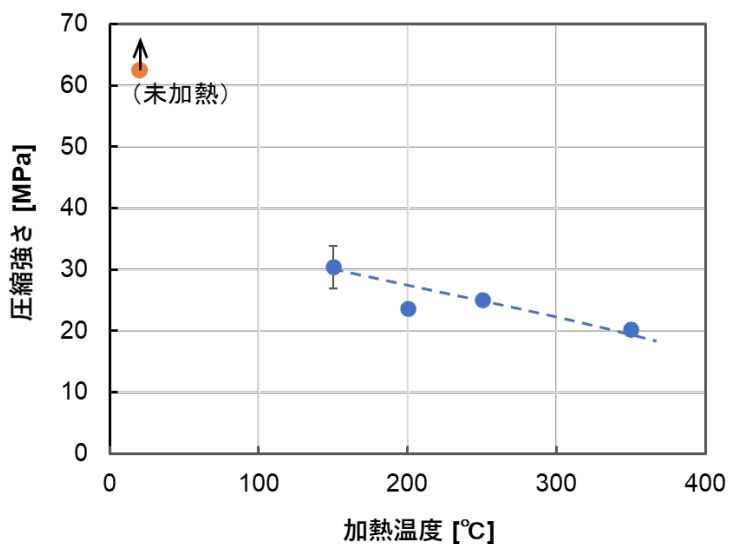
(b) エポキシ樹脂 b

参考 図 1.2.3.6 高温履歴後の有機系アンカー接着剤の曲げ強さ

高温履歴後の無機系アンカー接着剤の曲げ強さおよび圧縮強さを参考 図 1.2.3.7 に示す。無機系接着剤は有機系とは挙動が異なり、150°C程度の加熱でも、未加熱の場合の50%程度まで強度が低下することがわかった。TG/DTAの結果や加熱後の供試体外観を踏まえると、初期の急速な加熱によって接着剤に含まれる水分が急激に蒸発し、その蒸気圧によって接着剤内部に無数のひび割れが生じ、これによって大幅な強度低下がもたらされものと推察される。



(a) 曲げ強さ



(b) 圧縮強さ

参考 図 1.2.3.7 高温履歴後の無機系アンカー接着剤の曲げ強さおよび圧縮強さ

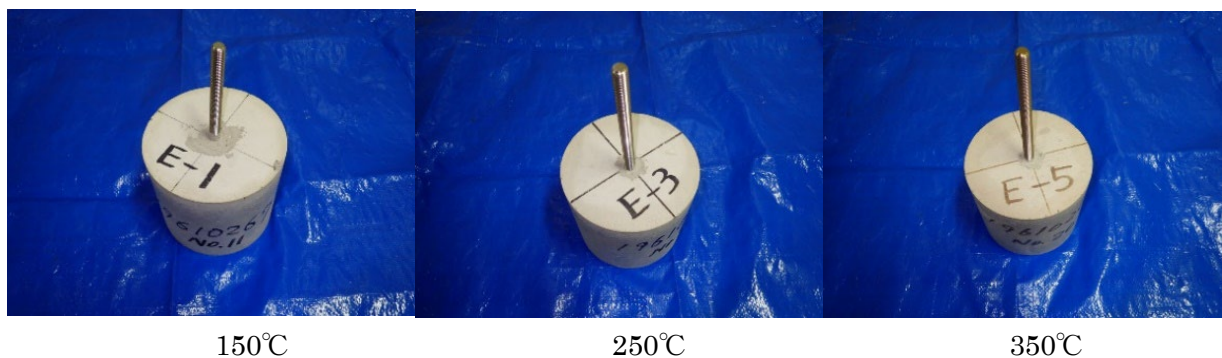
一般に、有機系材料は無機系材料よりも耐熱性が劣るとされているが、上記の実験結果から、200°C程度までの温度条件では、無機系接着剤の方が劣る結果となった。

(c) 高温履歴を受けた接着系あと施工アンカーの引張試験

高温履歴後の供試体外観の一例を参考写真 1.2.3.2 に示す。350℃までの加熱により一部の供試体で、アンカー接着剤から黒いすすが生じた。また、コンクリート母材にき裂を生じたものも認められたが、これは除外し引張試験を実施した。



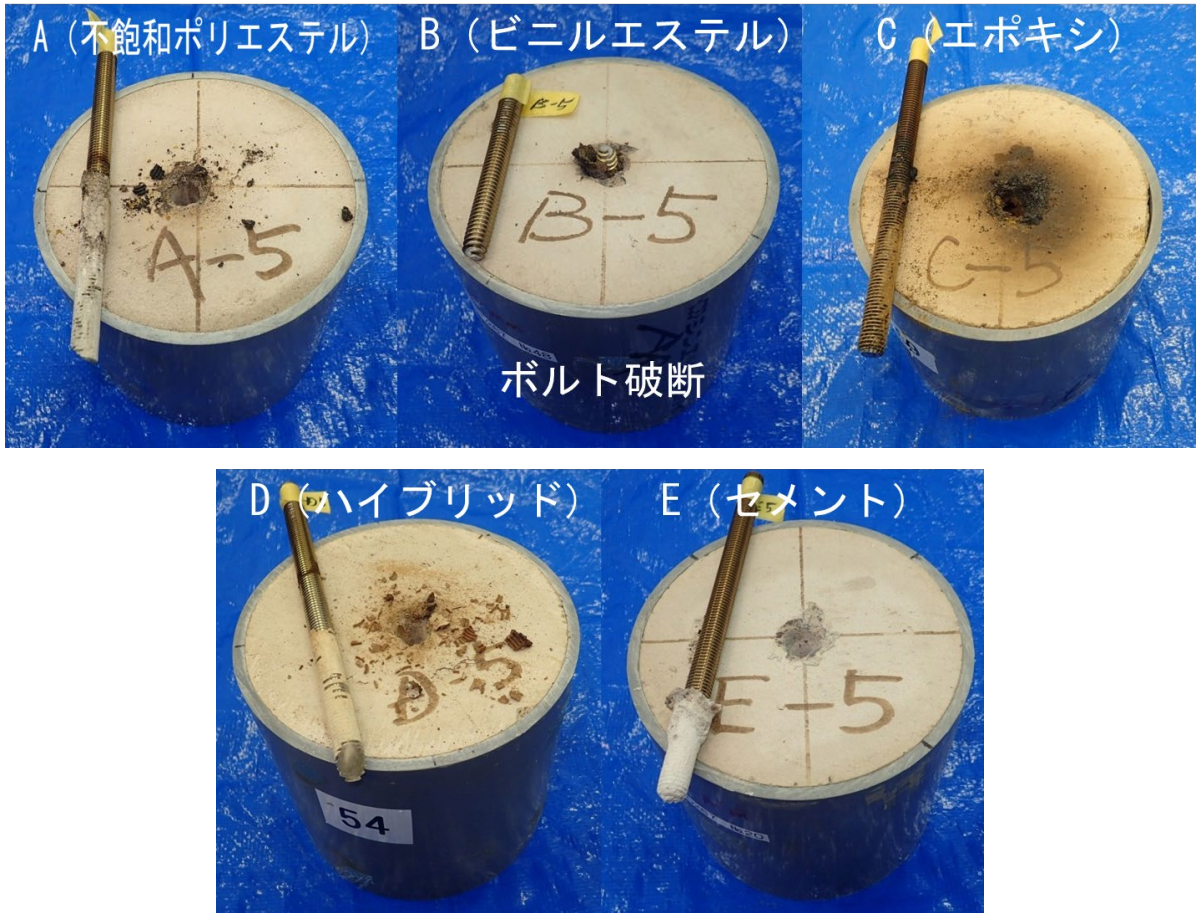
(a) 有機系（エポキシ樹脂）



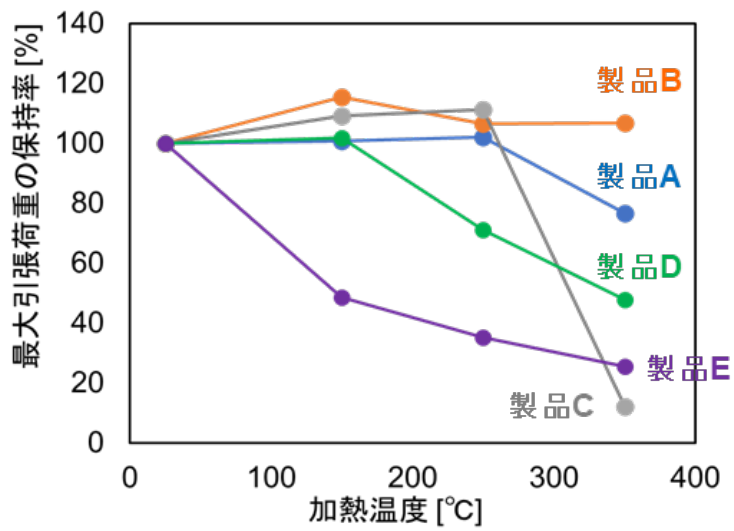
(b) 無機系（セメント系）

参考写真 1.2.3.2 高温履歴後の供試体外観の例

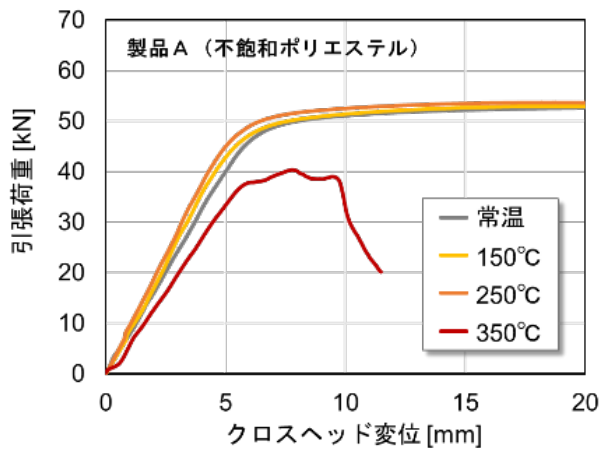
高温履歴後における引張試験後の供試体外観の例を参考写真 1.2.3.3 に示す。また、加熱温度による最大引張荷重の変化を参考図 1.2.3.8 に、高温履歴前後の引張試験で得られた荷重－変位曲線を参考図 1.2.3.9 にそれぞれ示す。試験に供した 5 種類のアンカー全てにおいて、加熱前の試験ではボルトの破断により終局を迎えた。一方、高温履歴後の試験では製品 B を除き、いずれも加熱前より低い荷重で接着剤の破損や付着破壊を生じた。製品 A、C は 250℃までは影響が認められなかったが、製品 D では 250℃から、製品 E では 150℃から強度が低下し、有機系よりも無機系あるいは有機・無機ハイブリッド系の方が、より低い温度領域で耐力低下が生じることが明らかとなった。製品 D、E においては、加熱温度が高くなるにつれ、最大引張荷重が徐々に低下する傾向が見られた。製品 C は 350℃までの加熱により、強度がほぼゼロとなった。



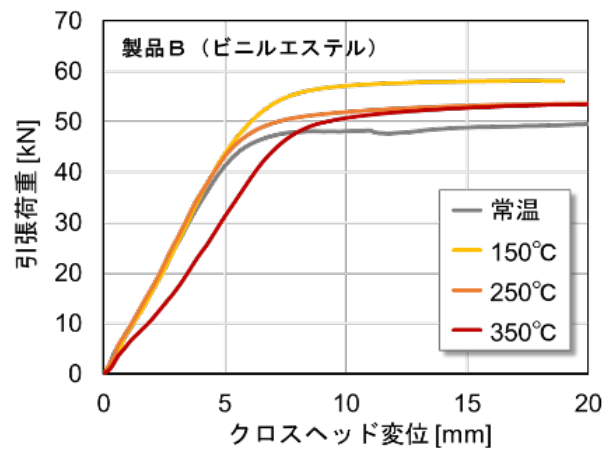
参考 写真 1.2.3.3 高温履歴後における引張試験後の供試体外観の例



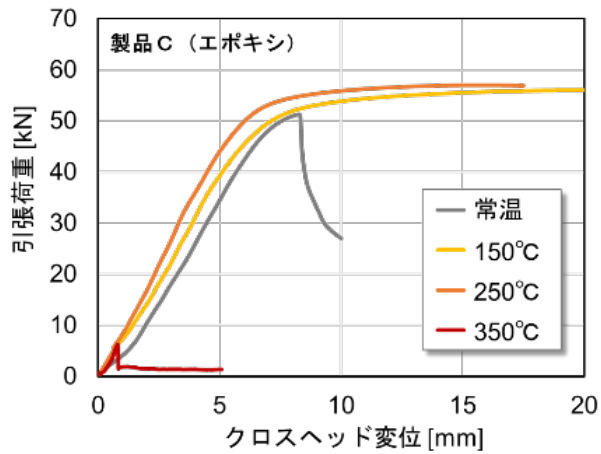
参考 図 1.2.3.8 加熱温度による最大引張荷重の変化



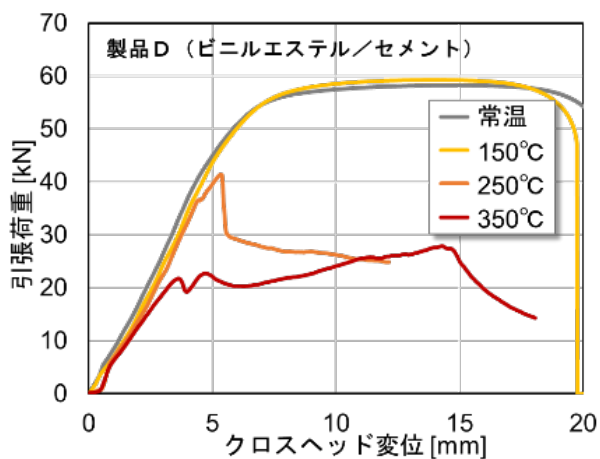
(a) 有機系（不飽和ポリエステル）



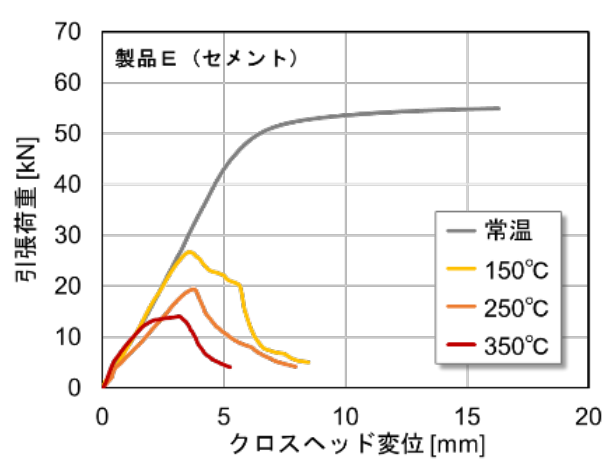
(b) 有機系（ビニルエステル）



(c) 有機系（エポキシ樹脂）



(d) 有機無機ハイブリッド系



(e) 無機系（セメント系）

参考 図 1.2.3.9 高温履歴前後の引抜試験で得られた荷重－変位曲線

前述の熱重量示差熱分析 (TG-DTA) において、有機系アンカーの接着剤は A、B、C いずれの製品も、250～300℃付近で発熱を伴う質量減少が始まった (参考 図 1.2.3.5)。これは接着剤樹脂の酸化分解や燃焼が生じているためと考えられる。これに対し、無機系アンカー接着剤は、100℃付近で大きな吸熱反応を伴う質量減少が生じた。これはセメントに含まれる水分の蒸発や、セメント水和物の脱水が生じているためと考えられる。無機系アンカーは有機系アンカーよりも低い温度領域で最大引張荷重が低下したが、これは TG-DTA による結果の通り、無機系が有機系よりも低い温度領域で質量減少を来す反応を生じたためと考えられる。

なお、これまでの検討結果から、有機系の中でも接着剤の樹脂の違いや、同系統の樹脂であってもメーカーやグレードが違うことにより、熱的特性が大きく異なることを把握している。そのため、接着系あと施工アンカーの耐熱性を一律に論じることは困難である。有機系、無機系に関わらず、当面は火災が懸念される用途への適用を見合わせる事が、現実的な対応であると思われる。

(4) まとめ

有機系アンカー接着剤の TG/DTA 分析では、有機成分の熱分解および燃焼に起因すると思われる質量減少が、250℃付近から生じた。また、700℃付近までの加熱により、有機成分のすべてが消失することがわかった。一方、無機系アンカー接着剤は、100℃付近で水分の蒸発によるものと考えられる大きな吸熱反応と質量減少が生じた。常温から 1000℃までの昇温で減少したトータルの質量は、加熱初期に生じたおよそ 20%程度のみであった。

高温履歴を受けたアンカー接着剤の力学特性への影響を評価した結果、200℃程度までの加熱条件では、有機系接着剤の強度低下は認められなかった一方で、無機系接着剤の強度が加熱前の 50%程度まで低下することがわかった。

接着系あと施工アンカーを施工したコンクリート供試体を加熱し、除熱後の引抜耐力を評価した結果、350℃程度までの加熱により、一部の製品を除いていずれも最大引張荷重の低下を生じた。接着剤の種類により影響が生じる温度は大きく異なり、有機系接着剤よりも無機系の方がより低い温度領域で耐力低下を生じる場合があることが明らかとなった。

参考文献

- 参考 1) ACI 355.4-11: Qualification of Post-Installed Adhesive Anchors in Concrete and Commentary, 2011
- 参考 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
- 参考 3) 泉 美治、小川雅彌、加藤俊二、塩川二郎、芝 哲夫 監修：機器分析のてびき 第 2 版、pp. 1-23、化学同人、1996
- 参考 4) 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. 282-297, 2001

- 参考 5) 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
- 参考 6) 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
- 参考 7) 国尾 武、M. L. Williams: 粘弾性体の力学的挙動、日本機械学会誌、Vol. 68、No. 552、pp. 83-92、1965
- 参考 8) AASHTO TP84-11(2017): Standard of Method of Test for Evaluation of Adhesive Anchors in Concrete Under Sustained Loading Conditions, 2017
- 参考 9) 日本建築学会編: 各種合成構造設計指針・同解説、343 p.、2010
- 参考 10) 国土交通省: あと施工アンカー・連続繊維補強設計・施工指針、62 p.、2006
- 参考 11) European Organisation for Technical Approvals: ETAG 001: Guideline for European Technical Approval of Metal Anchors for Use in Concrete, 2013
- 参考 12) 河村圭亮、福浦尚之、鈴木三馨、服部佳文: 火災加熱を受けるコンクリートの変形挙動解析、大成建設技術センター報、No. 44、pp. 1-7、2011
- 参考 13) Forschungsgesellschaft für Straßen-und Verkehrswesen: Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln, 2003
- 参考 14) 津越 敬寿: 分析機器の正しい使い方: 熱分析, ぶんせき, No. 516, pp. 568-574, 2017

土木研究所資料
TECHNICAL NOTE of PWRI
No.4436 March 2023

編集・発行 ©国立研究開発法人土木研究所

本資料の転載・複写の問い合わせは

国立研究開発法人土木研究所 企画部 業務課
〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6 電話029-879-6754