

博士論文

コンクリートのひび割れがあと施工アンカーの
引抜き挙動に与える影響の評価方法

2020年3月

岐阜大学大学院工学研究科
生産開発システム工学専攻

石原 力也

論文要旨

コンクリートにひび割れが発生した後のあと施工アンカーの力学的性能を設計時に考慮する事が出来れば、リダンダンシーも含めた安全性の高いあと施工アンカーの選定や提案が可能となる。これまで、その評価方法および設計への取り扱いについて、日本においては十分な知見がなかった。本研究では、欧米(EOTA や ACI)の性能評価型試験方法を参考に、接着系・金属系アンカーの引抜き試験を実施し、ひび割れの各種条件下でのあと施工アンカーの耐荷力への影響の実験的検討を行うと同時に、あと施工アンカーのひび割れに対する影響試験として、耐荷力を測定するための引抜き試験の小型化を目指し、標準試験方法の開発を行うことを目的とする。さらに、コンクリート母材に発生するひび割れがあと施工アンカーの引抜き性能へ及ぼす影響を考慮した耐力式の提案を行った。

(1)ひび割れを有するコンクリートを対象とした引抜き試験方法の提案と妥当性の検証

ひび割れの影響を評価するための標準試験方法を確立するために、著者らがこれまで検討してきた簡易試験方法(PIPE 式)について、各種データの充実を図るとともに、従来欧米で行われている ETAG 式と比較し、試験方法と適用範囲の妥当性について検討した。

- ①鋼管にコンクリートを充填し、割裂試験によって導入したひび割れを対象にした試験方法を提案した。この試験方法により、ひび割れ幅の拡大により、引抜き耐力が低下する傾向を捉えることができ、勘弁かつ再現性のある試験が可能となった。
- ②金属系アンカーに関しては、PIPE 式の結果と ETAG 式の結果は、引抜き耐力および破壊モードもほぼ同じであり、PIPE 式の簡易試験法として妥当性が確認された。
- ③接着系アンカーに関しては、ひび割れ幅調整時の拘束力が付着力にわずかに影響を与え、破壊モードは同様であるにも関わらず、引抜き耐力が ETAG 式の結果に比べてやや高い傾向にあった。しかしながら、いずれのあと施工アンカーの結果も既往の文献のデータのばらつきの範囲内にあり、ひび割れの影響を評価できる可能性が示された。

(2)あと施工アンカー近傍に発生したひび割れに対する補修があと施工アンカーの力学性能に与える影響

ひび割れ補修とあと施工アンカー性能の関連性の調査研究として、あと施工アンカー近傍に生じた母材コンクリートのひび割れに対して、ひび割れ注入補修が行われた場合、補修後のあと施工アンカーの力学的性能に関する知見は非常に少なく、関係する指針や要領にも具体的な記載がない。そこで、コンクリートのひび割れ注入補修があと施工アンカーの力学的性能に与える影響を実験的に検討した。

- ①ひび割れ注入材を用いて補修した場合、あと施工アンカーの引抜き耐力がひび割れのない場

合と同程度まで回復することが確認された。

- ②金属系アンカーでは、注入補修によって拡張部以外での付着が発生し、複合的な固着が発揮されることが確認された。
- ③接着系アンカーでは、ひび割れにより分割されるコーン状のコンクリート塊が繋がれ、最大引抜き耐力(コーン状破壊耐力)は、ひび割れない場合と同様になることが確認された。

(3)コンクリート中のひび割れの影響を考慮した耐力式の提案

あと施工アンカーのコンクリートのひび割れの影響を考慮した設計方法の提案として、国内の主要な分類のあと施工アンカー製品のひび割れ性能の比較を実施し、土木学会(コンクリートライブラリー)「コンクリートのあと施工アンカー工法の設計・施工指針(案)」の設計式なども参考に各種設計法を比較検討した。現行の設計法では考慮されていない、ひび割れによるコーン破壊の低減係数、金属系アンカーの抜け破壊の影響、接着系アンカーの付着強度低下の影響などを考慮した耐力式を示した。

以上のように本論文では、コンクリートのひび割れがあと施工アンカーの引抜き挙動に及ぼす影響を評価する試験方法の開発とその検証を行い、また維持管理の側面からコンクリートのひび割れ注入補修による影響や、設計での考慮方法について提案したものである。

目次

第 1 章 序論	1
1. 1 本研究の背景	2
1. 2 本研究の目的	13
1. 3 本研究に関連する既往の研究	14
1. 4 論文の構成	21
第1章の参考文献	22
第2章 ひび割れを有するコンクリートを対象とした引抜き試験方法の提案	24
2, 1 実験目的	25
2. 2 既往の指針でのひび割れの取扱い	26
2. 3 実験概要	27
2. 4 ETAG 式	28
2. 5 PIPE 式	33
2. 6 実験結果	39
2. 7 既往のデータとの検証	49
2. 8 第 2 章のまとめ	50
第2章の参考文献	51
第3章 ひび割れ注入補修があと施工アンカーの引抜き耐力に与える影響	52
3. 1 実験目的	53
3. 2 実験概要	54
3. 3 実験パラメータ	56
3. 4 実験方法	57
3. 5 実験結果	61
3. 6 第 3 章のまとめ	67
第3章の参考文献	68
第4章 ひび割れを考慮したあと施工アンカーの引抜き耐力式の提案と検証	69
4. 1 はじめに	70
4. 2 ひび割れを考慮したあと施工アンカー設計の流れ	71
4. 3 コンクリートのひび割れを考慮したアンカーの評価と設計(金属系)	73
4. 4 コンクリートのひび割れを考慮したアンカーの評価と設計(接着系)	80
4. 5 ひび割れを考慮した引抜き耐力式の提案	88

4.6 第4章のまとめ	95
第4章の参考文献	96
第5章 結論	97
本論文に関連する著者の発表論文・報告	101
謝辞	102

第1章

序論

1.1 本研究の背景

(1)あと施工アンカーの現状

あと施工アンカーは、ファスニング用として、構造部材よりも付帯設備を固定する目的で使用される背景が多かったことより、建築分野において精力的に調査研究が進められてきており、設計や施工に必要な基準類もそれらの知見に基づき整備されてきた。土木分野においても、先行する建築分野での実績を踏まえ、付帯設備の留付けを中心として適用されてきた背景がある。

2012年12月に発生した笹子トンネル天井板崩落事故では、その原因として接着系あと施工アンカーに関する設計段階、施工段階、維持管理の各段階における様々な配慮不足が複合的に影響を与えたといわれている。とりわけ、設計上であと施工アンカーの破壊モードを想定してはいるが、あと施工アンカーがコンクリート構造物の破壊モードに与える影響までを想定していな場合が多いことなども浮き彫りになったといわれている。

その後、土木学会では、コンクリートのあと施工アンカー工法の設計・施工指針(案)が発刊されるなど、各種機関のあと施工アンカーの設計基準の改定作業が進められつつある。特に、あと施工アンカーの種類によらず、その耐久性の評価が急務とされており、先行して各種知見が得られている欧米の事例を参考にしつつ、国内では母材となるコンクリートのひび割れの影響、クリープ、疲労などの耐久性の評価や耐薬品性に関するデータの収集および評価方法の開発、検証が精力的に進められている。

このような状況に鑑み、日本コンクリート工学会では、あと施工アンカーの耐久性の評価方法の確立と設計の高度化研究委員会(2014年～2015年)を発足させ、国内を中心に精力的に進められている耐久性に関する調査研究成果を体系的にとりまとめ、さらには海外での耐久性に関わる設計方法や技術調査を行うことで、耐久性設計の高度化に資する議論が行われた。

日本で使用されているあと施工アンカーは、金属系アンカーと接着系アンカーに大別されており、その施工方法や固着方法などで細分化されている。その分類を図-1.1に示す。

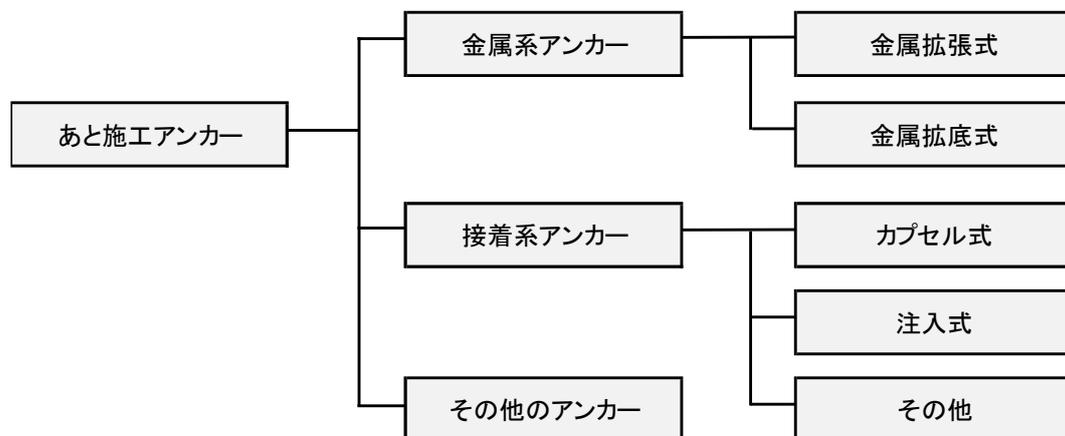


図-1-1 あと施工アンカーの分類【1.1】

(2)あと施工アンカーの用途

土木分野(鉄道・道路・一般土木)におけるあと施工アンカーの用途を、表-1.1、表-1.2 に示す。鉄道分野では、列車荷重による疲労の影響を受ける部位には使用していない。その中で接着系は、「落橋防止装置(ブラケット)、耐震補強工事、高欄・防音壁、架線支持金物、電柱等の比較的重量物を取り扱う場合など」の例にみられる構造部材に使用され、他方金属系は、「排水樋や落下物防止ネット等の軽量物を取り扱う場合など」の例に見られる付帯構造物に使用される実績が多い。

道路分野では、構造部材と付帯構造物や電気設備は鉄道分野と同様の用途で、建築関連ではパーキングエリアや管理事務所などで使用されている。

一般土木分野では、国土交通省発刊「土木工事共通仕様書(案)」道路編において、あと施工アンカー仕様の記載があるのは、RC橋脚巻き立て工、落橋防止装置など、道路修繕に関する用途である。仕様書の記述は、施工上の留意点に関するものが主流となっている。

また、国土交通省総合政策局公共事業企画調整課発行「機械工事共通仕様書(案)」において、あと施工アンカーの使用の記述が明記されている。主なものは、揚排水ポンプ設備の除塵設備と、トンネル換気設備施設のジェットファンである。除塵設備での利用については、施工上の留意点に関する記述が主である。ジェットファンについては、より詳細な記述がある。

表-1.1 鉄道分野でのあと施工アンカーの用途【1.2】

構造部材	付帯構造物／電気設備	その他(建築関連)
<ul style="list-style-type: none"> ・桁座拡幅工 ・落橋防止工 ・プレキャスト高欄 	<ul style="list-style-type: none"> ・手すり ・下げ束 ・信号機基礎 ・検査用足場 ・排水樋 ・標識類 ・剥落防止繊維シート ・落下防止ネット ・仮設設備 	<ul style="list-style-type: none"> ・非構造部材の固定

表-1.2 道路分野でのあと施工アンカーの用途【1.2】

構造部材	付帯構造物／電気設備	その他(建築関連)
<ul style="list-style-type: none"> ・桁座拡幅工 ・落橋防止工 ・プレキャスト高欄 	<ul style="list-style-type: none"> ・手すり ・検査用足場 ・排水樋 ・標識類 ・剥落防止繊維シート ・仮設設備 	<ul style="list-style-type: none"> ・非構造部材の固定

(3)土木・建築での基準類の現状

日本におけるあと施工アンカーの適用は、既設コンクリート構造物に部材を接合する場合や、構造物に部材を固定する場合などである。

建築分野においては、規準の整備が以前からなされ、耐震改修に係わる設計施工指針、仕様書の制定や改訂が行われてきた。設備機器の取付においては、建築設備耐震設計・施工指針や空調衛生機器に係わる建築設備用あと施工アンカーなどの指針が制定され、定期的な改定および国内の大地震を契機に見直しが行われてきている。

一方、土木分野においては、あと施工アンカーの採用の歴史は古いが、建築のように統一された基準・指針は整備されていない。土木系の機関(鉄道系や道路系)に仕様書やマニュアルが制定され、定期的に改訂されている。土木、建築のあと施工アンカーの主な基準類を表-1.3に示す。

平成24年12月に発生した中央自動車道笹子トンネル天井板崩落事故が発生し、道路トンネルの覆工コンクリートに天井板を固定する目的で使用されたあと施工アンカーの施工不良、設計不良、施工管理、が指摘された。その事故調査結果より、接着系あと施工アンカーはトンネル天井板、ジェットファン、道路標識等を固定する吊り構造等の常時引抜き力を受ける箇所への使用は、長期性能に関する一定の知見の蓄積がなされるまで原則使用を避けるべきとの結果となった。これらの用途については、撤去されたり、金属系アンカーに置き換えられたり、フェールセーフとしてバックアップの接合がされるなどの対策が取られている。

それらを受けて、既存の構造物に新たな部材を接合する場合や、コンクリート構造物に付帯設備を取り付ける場合に適用するあと施工アンカー工法として、2014年土木学会より「コンクリートのあと施工アンカー工法の設計・施工指針(案)」が刊行されている。ここでは、あと施工アンカーに関する長期特性に関する知見の不足から、土木用途における標準的設計、施工、維持管理手法を示す[標準編]においては、以下の用途について対象としている。図-1.2に適用範囲を示す。

- ・歩道橋防護柵, 点検通路, 標識, 防音壁, 型枠・支保工取付け
- ・重量物, 吊り上げ運搬, 足場壁繋ぎ, 仮設物取付け

また、[本編]ではより広い適用範囲における、あと施工アンカー工法の設計、施工および維持管理に関する考え方として、以下の用途をあげている。

[本編]の適用範囲(付属物で繰返し荷重, 下向き荷重, 衝撃荷重等と考慮するもの)

- ・トンネル内のジェットファン, 吊下げ標識
- ・車両用防護柵取付け, 高欄の嵩上げ, 防音壁取付け

コンクリート標準示方書設計編の適用範囲(構造物に直接影響を及ぼす場合)

- ・橋梁耐震補強, 落橋防止装置の取付け, 防波堤, 堤防の嵩上げ

作用	動的作用				静的作用			
	偶発作用(地震・衝突など) 変動作用(振動・疲労など)				永続作用(死荷重など) 変動作用(風荷重など)			
構造種類	長期間の使用		短期間の使用		長期間の使用		短期間の使用	
	吊下げ	その他	吊下げ	その他	吊下げ	その他	吊下げ	その他
構造物に直接影響を及ぼす場合	橋脚耐震補強 (RC補強)の主鉄筋基部定着 落橋防止装置の取付(引張り抵抗型) 落橋防止装置の取付(せん断抵抗型) 防波堤・堤防の高上げ等							示方書設計編
構造物に直接影響を及ぼさない場合	付属物取付で繰返し荷重, 下向き荷重が常時掛かるもの(ジェットファン, 吊下げ標識等) 衝撃荷重, 疲労を考慮する必要があるもの(車両用防護柵取付) 高欄の高上げ, 防音壁取付(高架橋部)				歩道用防護柵 点検通路標識 防音壁		型枠・支保工取付 重量物吊上げ運搬足場壁繋ぎ仮設物取付	
	本編				標準編			

図-1.2 区分と[標準編]の適用範囲【1.1】

表-1.3 土木, 建築のあと施工アンカーの主な基準類

分野	文献名	発行年	発行元
土木	コンクリートのあと施工アンカー工法の設計・施工指針(案)	平成 26 年	土木学会
	あと施工アンカーの設計・施工の手引き	平成 30 年	公益財団法人 鉄道総合技術研究所
	あと施工アンカーの設計施工の手引き	令和元年	東海旅客鉄道(株)
	土木工事標準仕様書	平成 27 年	東日本旅客鉄道(株)
	土木構造物設計施工標準	平成 26 年	西日本旅客鉄道(株)
	構造物施工管理要領	平成 29 年	東日本高速道路(株) 中日本高速道路(株) 西日本高速道路(株)
建築	自家用発電設備耐震設計のガイドライン	平成 25 年	一般財団法人 日本内燃発電設備協会
	各種合成構造設計指針・同解説	平成 22 年	日本建築学会
	建築設備耐震設計・施工指針	平成 26 年	一般社団法人 日本建築センター
	SHASE-S012-2013	平成 26 年	公益社団法人 空気調和・衛生工学会

(4)あと施工アンカーの製品認証・評価制度の現状

中央自動車道笹子トンネル天井板崩落事故により、あと施工アンカーの安全性や耐久性の評価が課題となっており、土木分野では各事業者が、あと施工アンカーの耐久性に関する性能評価に関して研究を行い、その評価方法を改訂している。

現状、あと施工アンカーの性能を判別する制度として、日本では一例として、一般社団法人日本建築あと施工アンカー協会(以下 JCAA)が実施しているあと施工アンカー製品認証制度がある。また海外では、欧州技術認定機構 European Organization Technical Approval(以下 EOTA)と米国コンクリート学会 American Concrete Institute(以下 ACI)などが製品評価基準を定め、それぞれの第三者機関が評価を実施している。

JCAA で行っている製品認証事業は、協会に登録されている製造会社や販売会社を対象に、協会にて定めた製品認証事業規定に基づき、製品認証審査を行っている。その中の製品性能に関しては、審査基準として仕様規定が定められており、申請者が第三者機関において行った試験結果に基づいて審査される。

一方、EOTA や ACI で行っている製品認証事業も、製造品質管理、製品性能、施工仕様、申請者の責任範囲などを規定している。その中で製品性能については、申請者が製品の種類や特徴などに応じて申請項目を選択し、その選択した項目に応じて、定められた試験内容を第三者機関で試験を実施した後、製品毎、サイズ毎に応じて基準値(特性値)と試験結果のばらつきに応じた部分安全係数を評価して値を与えている。

表-1.4 に、JCAA, EOTA, ACI の製品認証制度の比較を示す。

表-1.4 JCAA, EOTA, ACI の製品認証制度の比較 【1.2~1.9】

発行機関	JCAA		EOTA	ACI
認証名	あと施工アンカー製品認証		ETAG001 Part1 一般事項 Part2 締付け方式 Part3 アンダーカット Part4 打込み方式 Part5 接着系	ACI 355.2-07 ACI 355.4-11
分類	仕様規定	性能規定	性能規定	
評価方法	合否判定	合否判定	性能評価	
解説	・試験結果が判定式の値を満足する事.	・申請者が設定した条件, 判定式および設定値に対し, 試験結果が判定式の値を満足する事.	・基準試験結果に各種影響試験結果要因分を低減させる. ただし, 各要因には最低限の要求条件が設けられている.	

(5)あと施工アンカー製品の設計式と性能評価設計の違い

表-1.5, 表-1.6, 表-1.7 に土木学会のコンクリートのあと施工アンカー工法の設計・施工指針(案)とEOTAとACIがそれぞれ定める設計ガイドラインの、あと施工アンカーの設計耐力において、以下に接着系アンカーのコンクリートコーン状耐力, 付着破壊/抜け破壊耐力および鋼材破壊耐力の比較を示す。

表-1.5 設計コンクリートコーン状破壊耐力

設計法	引抜き耐力	解説
土木学会: コンクリートのあと施工アンカー工法の設計・施工指針(案)[1-1]	$\text{接着系: } T_{cd} = K_t \cdot 0.23 \cdot A_c \sqrt{f_{cd}} / \gamma_b$ <p> K_t : 使用期間の係数 (短期 1.0 長期 0.5) γ_b : 部材係数 (鋼材=1.1) α : あと施工アンカーの種類を表す係数 (金属系 : 0.31, 接着系 : 0.23) A_c : 有効水平投影面積 (mm²) D_a : アンカー径 (mm) f_{cd} : 母材コンクリートの設計圧縮強度 (N/mm²) γ_b : 部材係数 (コンクリート=1.6) </p>	ひび割れ想定は無しが前提の設計式
EOTA: TECHNICAL REPORT :Design of Bonded Anchors TR029, 2010 [1-10]	$N_{Rk,c} = N_{Rk,c}^0 \frac{A_{c,N}}{A_{c,N}^0} \cdot \psi_{s,N} \cdot \psi_{re,N} \cdot \psi_{ec,N}$ <p> ひび割れ無し: $N_{Rk,c}^0 = 10.1 \sqrt{f_{ck,cube}} \cdot h_{ef}^{1.5}$ ひび割れ有り: $N_{Rk,c}^0 = 7.2 \sqrt{f_{ck,cube}} \cdot h_{ef}^{1.5}$ </p> <p> $N_{Rk,c}^0$: コンクリートコーン状破壊基準耐力 $A_{c,N}^0$: 実有効水平投影面積 (mm²) $A_{c,N}$: 有効水平投影面積 (mm²) $\psi_{s,N}$: へりあきによる低減係数 $\psi_{re,N}$: 鉄筋ピッチによる低減係数 $\psi_{ec,N}$: 偏心荷重による低減係数 $f_{ck,cube}$: コンクリート圧縮強度 (N/mm²) h_{ef} : 有効埋込長さ(mm) </p>	ひび割れ性能評価試験はじめ各種の性能試験を実施し, 結果の5%フラクタル値が左の式を満足し, 試験結果のばらつき(変動係数)が15%以内であることが必要.

<p>ACI: ACI 318-11 Appendix D Anchoring to Concrete [1-11]</p>	$N_{cb} = \frac{A_{Nc}}{A_{Nco}} \cdot \psi_{ed,N} \cdot \psi_{c,N} \cdot \psi_{cp,N} \cdot N_b$ <p>ひび割れ想定無し: $N_b = k_c \lambda_a \sqrt{f'_c} h_{ef}^{1.5}$ ひび割れ想定有り:</p> $N_b = k_c \cdot \lambda_a \sqrt{f'_c} \cdot h_{ef}^{1.5}$ <p>N_b :コンクリートコーン状破壊基準耐力 (kN) A_{Nco} : 実有効水平投影面積 (mm²) A_{Nc} : 有効水平投影面積 (mm²) $\psi_{ed,N}$: へりあきによる低減係数 $\psi_{c,N}$: ひび割れに対する低減係数 $\psi_{cp,N}$: 鉄筋ピッチによる低減係数 k_c : 評価試験結果に応じた係数 (≤10) λ_a : 軽量コンクリートによる低減係数 f'_c : コンクリート圧縮強度 (N/mm²) h_{ef} : 有効埋込長さ(mm)</p>	<p>ひび割れ性能評価試験 はじめ各種の性能試験を 実施し、結果の5%フラク タイル値が左の式を満足 し、試験結果のばらつき (変動係数)が15%以内 であることが必要.</p>
------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

表-1.6 設計鋼材破壊耐力の検討

設計法	引抜き耐力
<p>土木学会: コンクリートのあと施工 アンカー工法の設計・ 施工指針(案)[1-1]</p>	$T_{yd} = K_t \cdot T_y / \gamma_b$ <p>K_t : 使用期間の係数 (短期 1.0 長期 0.5) T_y : 降伏耐力(kN) γ_b : 部材係数 (鋼材=1.1)</p>
<p>EOTA: TECHNICAL REPORT :Design of Bonded Anchors TR029, 2010 [1-10]</p>	$N_{Rk,s} = A_s \cdot f_{uk} / \gamma_{ms}$ <p>A_s : 有効断面積 (mm²) f_{uk} : 降伏強度 (N/mm²) γ_{ms} : 部分安全係数 (=1.5)</p>
<p>ACI: ACI 318-11 Appendix D Anchoring to Concrete [1-11]</p>	$N_{sa} = \psi \cdot A_s \cdot f_{uk}$ <p>ψ : 引抜きに対する低減係数 A_s : 有効断面積 (mm²) f_{uk} : 降伏強度 (N/mm²)</p>

表-1.7 設計付着破壊耐力

設計法	引抜き耐力	解説
<p>土木学会： コンクリートのあ と施工アンカー 工法の設計・施 工指針(案)[1-1]</p>	$T_{cd} = K_t \cdot \pi \cdot D_a \cdot l_e \cdot \tau_{ad} / \gamma_b$ <p> K_t : 使用期間の係数 (短期 1.0 長期 0.5) D_a : アンカー径 (mm) l_e : 有効埋込長さ(mm) τ_{ad} : 設計付着応力度 = 10 (N/mm²) γ_b : 材料係数 (一般に 1.6) </p>	<p>ひび割れ想定は無しが前提の設計式。 設計付着応力度は、一律に 10N/mm² が与えられている。</p>
<p>EOTA: TECHNICAL REPORT :Design of Bonded Anchors TR029, 2010 [1-10]</p>	$N_{Rk,p} = N_{Rk,p}^0 \frac{A_{p,N}}{A_{p,N}^0} \psi_{s,Np} \psi_{g,Np} \psi_{ec,Np} \psi_{re,Np}$ $N_{Rk,p}^0 = \pi \cdot d \cdot h_{ef} \cdot \tau_{Rk,cr}$ <p> $N_{Rk,p}^0$: 付着破壊基準耐力 $A_{p,N}^0$: 実有効水平投影面積 (mm²) $A_{p,N}$: 有効水平投影面積 (mm²) $\psi_{s,Np}$: へりあきによる低減係数 $\psi_{re,Np}$: 鉄筋ピッチによる低減係数 $\psi_{ec,Np}$: 偏心荷重による低減係数 $f_{ck,cube}$: コンクリート圧縮強度 (N/mm²) h_{ef} : 有効埋込長さ(mm) $\tau_{Rk,cr}$: 評価試験による付着応力度 (N/mm²) </p>	<p>ひび割れ性能評価試験はじめ各種の性能試験を実施し、結果の 5%フラクタル値が左の式を満足し、試験結果のばらつき(変動係数)が 15%以内であることが必要。</p>
<p>ACI:ACI 318-11 Appendix D Anchoring to Concrete</p>	$N_a = \frac{A_{Na}}{A_{Na0}} \cdot \psi_{ed,Na} \cdot \psi_{cp,Na} \cdot N_{ba}$ $N_{ba} = \lambda_a \cdot \tau_{cr} \cdot \pi \cdot d_a \cdot h_{ef}$ <p> N_{ba} : 付着破壊基準耐力(kN) A_{Na0} : 実有効水平投影面積 (mm²) A_{Na} : 有効水平投影面積 (mm²) $\psi_{ed,Na}$: へりあきによる低減係数 $\psi_{cp,Na}$: 無筋でのへりあき低減係数 τ_{cr} : 評価試験による付着応力度 (N/mm²) d_a : アンカー筋呼び径 λ_a : 軽量コンクリートによる低減係数 f'_c : コンクリート圧縮強度 (N/mm²) h_{ef} : 有効埋込長さ(mm) </p>	<p>ひび割れ性能評価試験はじめ各種の性能試験を実施し、結果の 5%フラクタル値が左の式を満足し、試験結果のばらつき(変動係数)が 15%以内であることが必要。</p>

(6)あと施工アンカー周辺のコンクリートのひび割れ発生原因

第1章(2)に示した、あと施工アンカーの用途は、鉄筋コンクリートや無筋コンクリートの健全な表面部分にハンマードリルやダイヤモンドコアドリルなどの穿孔機械で孔を開けて施工される。その施工時期は、コンクリートが打設され、硬化後のいわゆる新設段階と、新設後数日から数年後などさまざまである。あと施工アンカーに影響を与えるコンクリートのひび割れとは、あと施工アンカーが施工されてから後に発生するひび割れのことを示す。

コンクリートのひび割れが発生する原因は、(社)日本コンクリート工学会【1.11】によれば、コンクリートの材料・配(調)合・施工、使用・環境、構造・外力またはその組み合わせなど様々と示されており、あと施工アンカー施工時にはひび割れが発生していなくても、施工後数日から数か月の期間では、温度ひび割れ、乾燥収縮ひび割れ、自己収縮ひび割れ等の発生の可能性があり、施工から数年の期間では、鉄筋の腐食によるひび割れ、アルカリシリカ反応によるひび割れ、凍害によるひび割れ(スケーリング含む)、荷重(地震)によるひび割れ、繰返し荷重によるひび割れ、不等沈下によるひび割れ等の可能性がある。図-1.3に、あと施工アンカー周辺のコンクリートのひび割れを示す。



トンネル照明設備周辺【1.12】



防護柵支柱周辺【1.13】



設備支柱周辺【1.13】



高欄上部柵周辺【1.13】

図-1.3 あと施工アンカー周辺のコンクリートのひび割れ

また、2012年12月に発生した、中央自動車道笹子トンネル天井板崩落事故後の調査報告には、トンネル覆工コンクリートにひび割れが発生していたことが報告されている【1.14】。

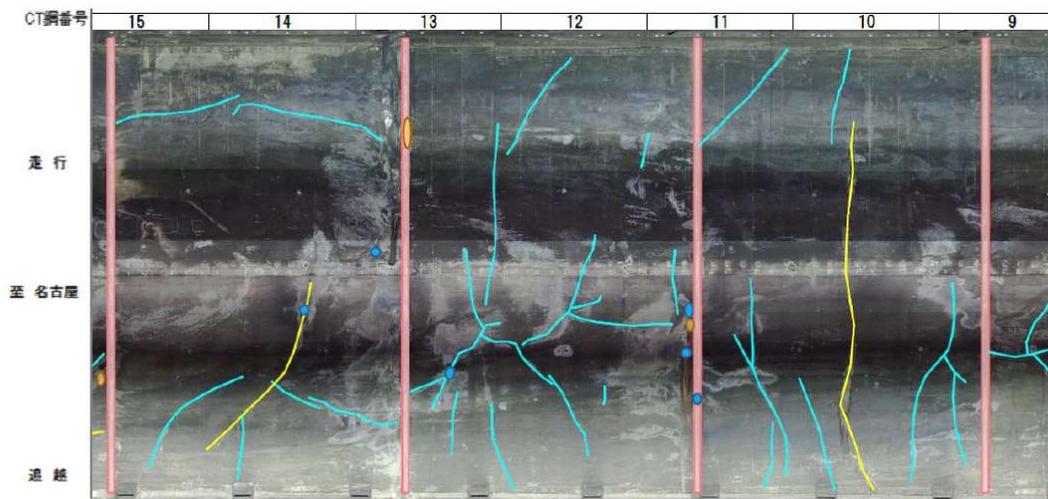


図-1.4 笹子トンネル覆工コンクリートの状態 【1.14】

(7)コンクリートの許容ひび割れ幅

また、コンクリートの許容ひび割れ幅については、道路橋示方書・同解説Ⅲコンクリート橋編【1.15】では、RC構造では、コンクリート表面のひび割れ幅が0.2mm程度以下となることを目安とした鋼材の応力度を許容応力度として示し、具体的な許容ひび割れ幅の規定はされていない。PC構造では、コンクリートに生じる引抜き応力を許容応力度以下とし、原則としてひび割れの発生を認めていない。

一方、土木学会コンクリート標準示方書設計編【1.16】では、許容ひび割れ幅に関しては、構造物の使用目的、環境条件、部材の条件などを考慮して定めることを原則としている。鋼材の腐食に対する許容ひび割れ幅は、鋼材の腐食に大きな影響を及ぼす部材表面の許容ひび割れ幅が、かぶり厚さによって変化することを考慮し、環境条件と鋼材の種類に応じて、かぶり厚さ(mm)の0.0035～0.005倍としている。水密性に対する許容ひび割れ幅は、構造物の使用条件および作用荷重特性などを考慮し、要求される水密性の程度と卓越する作用断面に応じて、0.1～0.2mmとしている。

コンクリートのひび割れ幅の許容値は、設計基準により様々な方法で明記されており、大きく異なる内容となっている。しかしながら、各設計基準で規定されている許容ひび割れ幅の目安は、概ね0.2～0.4mmの範囲に収まっている。道路橋示方書では0.2mm、コンクリート標準示方書ではかぶりによって異なるが0.175～0.5mm(かぶり50～100mmで想定)としている。

(8)コンクリートのひび割れがあと施工アンカーに与える影響

あと施工アンカーの性能に影響を与える要因として、構成している材質・強度、形状・種類の他には、以下のような施工安定性や環境要因があり、EOTA や ACI では、これらを性能評価試験により評価し、前述に示す部分安全係数を評価している。

- コンクリートのひび割れの影響(ひび割れ幅:0.3mm, 0.5mm)
- コンクリートのひび割れ幅変動の影響
(引抜き軸力を加えた状態で、ひび割れ幅 0.1mm~0.3mm を 0.2Hz 程度で 1,000 回繰返す)
- 凍結融解の影響
(引抜き軸力を加えた状態で、 $-20\sim+20^{\circ}\text{C}$ を 1 サイクル 24h の変動を 50 サイクル繰返す)
- コンクリート強度(低強度~高強度)
- 孔内清掃の影響(乾燥状態・湿潤状態・冠水状態・水中状態+これらの清掃の不具合条件)
- 攪拌程度の影響(現場調合型のみ)
- 施工精度の影響(湿潤状態・冠水状態)
- 長期引抜き荷重の影響(標準温度, 高温温度状態で 90 日間クリープ試験)
- 施工方向の影響
- 温度の影響
- アルカリに対する耐性
- 二酸化硫黄に対する耐性
- へりあきの影響
- 地震荷重の影響(ひび割れ 0.5mm 状態で、モデル化された地震荷重を載荷)

国内と国外でのあと施工アンカーの性能に関する評価は、大きく違いがあり、特にコンクリートのひび割れの影響に関しては、現状は国内においては影響を考慮した設計方法や評価方法となっていない。

一方、コンクリート構造物は長寿命化の時代に入り、点検や補修補強などの技術により、維持管理が進んでいる状況であることから、あと施工アンカーの施工段階では、母材コンクリートの健全性を確認し、ひび割れやその他劣化状態でない箇所に施工されていても、供用後の各種作用によって、コンクリートにひび割れが発生する場合が十分考えられる。

欧米のような設計段階であらかじめコンクリートのひび割れを想定してコンクリートコーン状破壊耐力と付着耐力を算定することを考えることにより、供用中にコンクリートにひび割れが発生しても安全な状態を確保することができると考えられる。

1.2 本研究の目的

コンクリート構造物にあと施工アンカーを使用する場合、コンクリートに発生するひび割れの影響を適切に評価しておく必要がある。あと施工アンカーの施工段階には、アンカー近傍にひび割れが認められなくても、供用中に発生する可能性は高い。

また、あと施工アンカーは、既設コンクリート構造物にアンカー筋を正確な位置に精度よく設置することが可能で、その施工性も高いことから、土木分野における建設工事での利用価値は高く、構造部材や設備部材などを固定する上でも必要不可欠な材料であることから、安全性と耐久性の確保が重要な課題である。海外で実施されているコンクリートに発生するひび割れがあと施工アンカーの性能に与える影響とその評価方法の検討が、国内でも必要である。

そこで本研究では、欧米(EOTA や ACI)の性能評価型試験方法を参考に、接着系・金属系アンカーの引抜き試験を実施し、ひび割れの各種条件下でのあと施工アンカーの耐荷力への影響の実験的検討を行うと同時に、あと施工アンカーのひび割れに対する影響試験として、耐荷力を測定するための引抜き試験の小型化を目指し、標準試験方法の開発を行うことを目的とする。

また、維持管理の側面からあと施工アンカー近傍に生じた母材コンクリートのひび割れに対して、ひび割れ注入補修が行われた場合、補修後のあと施工アンカーの力学的性能に与える影響を実験的に検討した。

さらに、コンクリート母材に発生するひび割れが及ぼすあと施工アンカーの引抜き性能への影響を考慮した耐力式の提案を行った。

1.3 本研究に関連する既往の研究

(1) ひび割れの影響に関する研究

稲田らは、コンクリートに1本および直交した2本のひび割れを導入した際の引抜き耐力について実験的検討を行い、以下の結果を得ている【1.17】。

- ・ひび割れが1本入った場合は約70%，2本直交に入った場合は、約50%まで引抜き耐力が低下する。

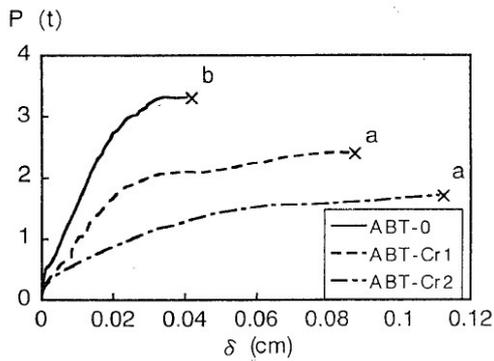


図-1.5 荷重変位曲線【1.17】

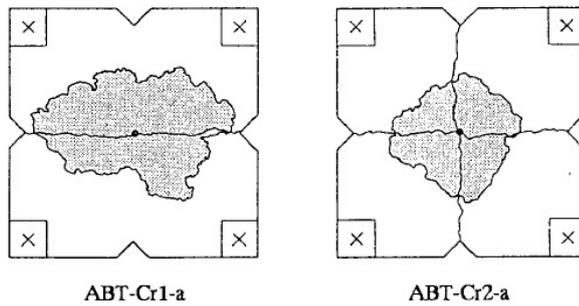


図-1.6 試験体表面におけるコーン破壊状況【1.17】

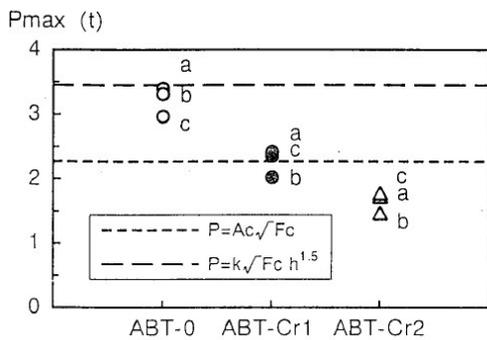


図-1.7 最大耐力【1.17】

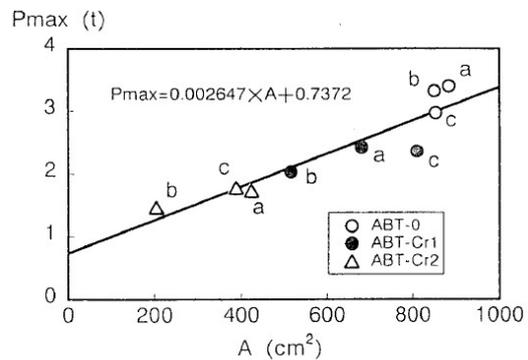


図-1.8 最大耐力・コーン状破壊面関係【1.17】

河村らは、ひび割れの生じている母材コンクリートにあと施工アンカーが施工された場合、どの程度引抜き耐力が低下するのか実験検討を行い、以下の結果を得ている【1.18】.

- ひび割れのあるコンクリート上のあと施工アンカーは、ひび割れのない場合の水平投影面積の代わりに、ひび割れで切断された投影面積を用いればよい.
- ひび割れ深さが埋込み深さの 1/3 以下の場合にひび割れに樹脂を投入すれば、ひび割れを無視できる.

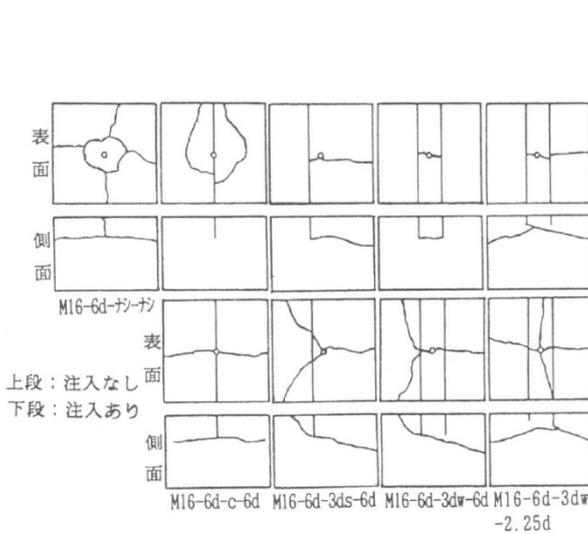


図-1.9 破壊形状【1.18】

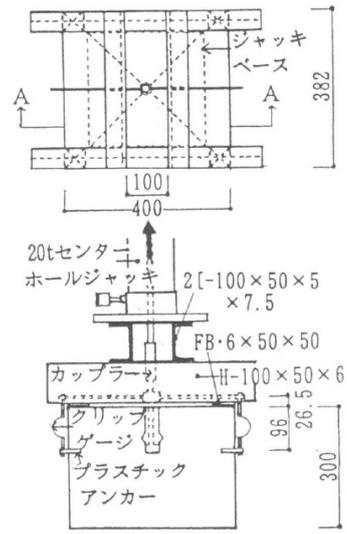
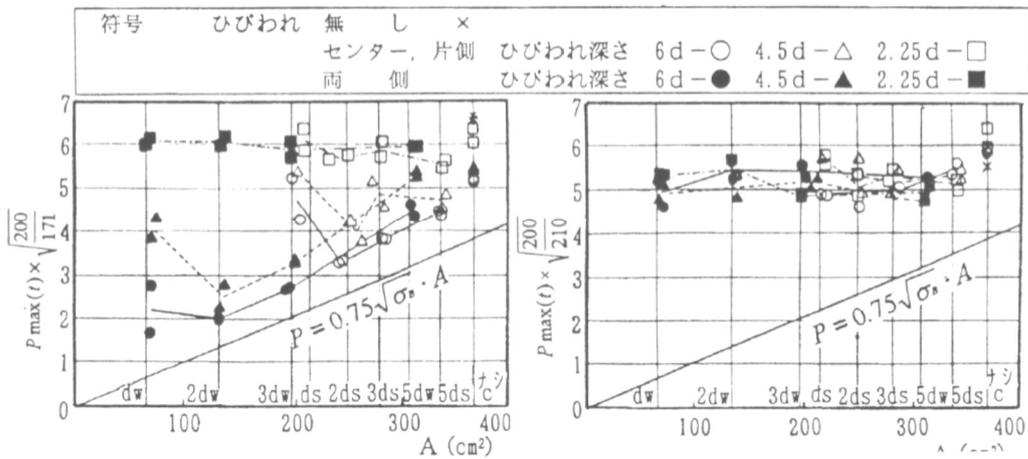


図-1.10 加力・測定装置【1.18】

図-1.11 最大荷重—水平投影面積【1.18】



川口らは、コンクリート強度、ひび割れ位置からの水平距離とひび割れ幅の異なる試験体を作製しアンカー引抜き試験を実施し、以下の結果を得ている【1.19】。

- 接着系アンカーでは、ひび割れ幅 0.2mm の場合においては、ひび割れの位置に関わらず、耐荷性に及ぼす影響は小さい。一方、ひび割れ幅 0.5mm, 1.0mm の場合、特にひび割れからの距離が 0mm の場合に耐荷性に及ぼす影響が大きい。
- 金属系アンカーでは、ひび割れからの距離が 0,4d, 8d いずれの場合においてもひび割れ幅に関わらず耐荷性能が低下する。ひび割れからの距離が 0mm の場合においては、初期剛性も小さくなる傾向を示す。

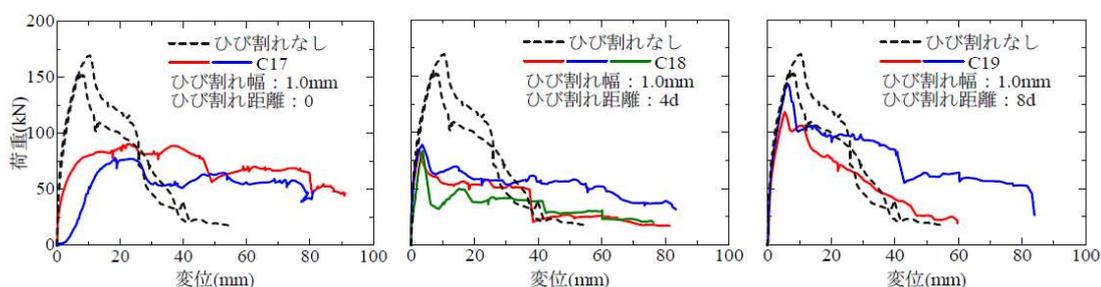


図-1.12 荷重-変位関係(金属系:初期ひび割れシリーズ)【1.19】

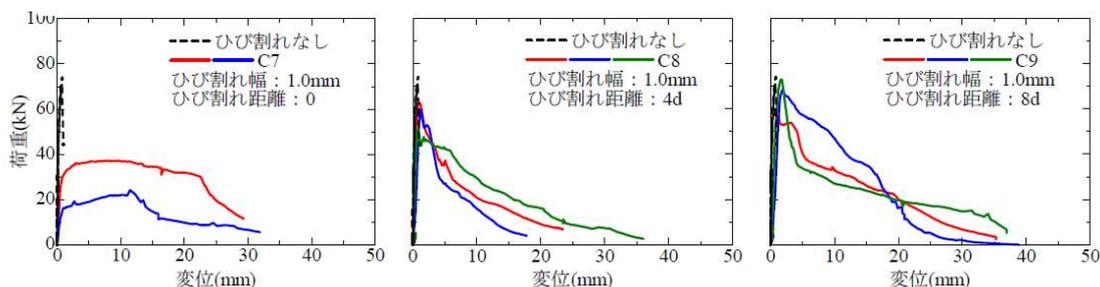


図-1.13 荷重-変位関係(接着系:初期ひび割れシリーズ)【1.19】

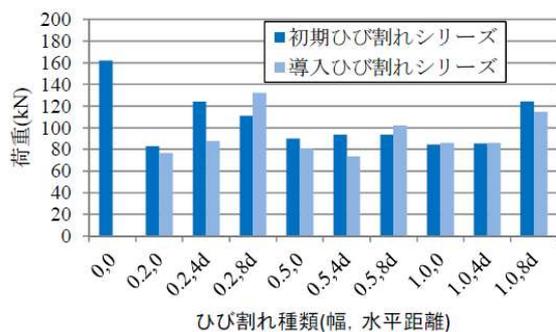


図-1.14 ひび割れ種類と最大荷重【1.19】



図-1.15 試験後の母材コンクリート【1.19】

中村らは、曲げひび割れ幅 0.05~0.125mm のひび割れに接着系アンカーを施工し、ひび割れによる引抜き耐力への影響を実験的検討し、以下の結果を得ている【1.20】。

- 曲げひび割れを導入した場合の引抜き耐力は、導入していない場合の約 20%低下する。
- 曲げひび割れを導入した場合は、母材コンクリートと接着剤との界面の付着破壊部が多くなり、引抜き耐力の低下の割合が大きい場合に現れる。

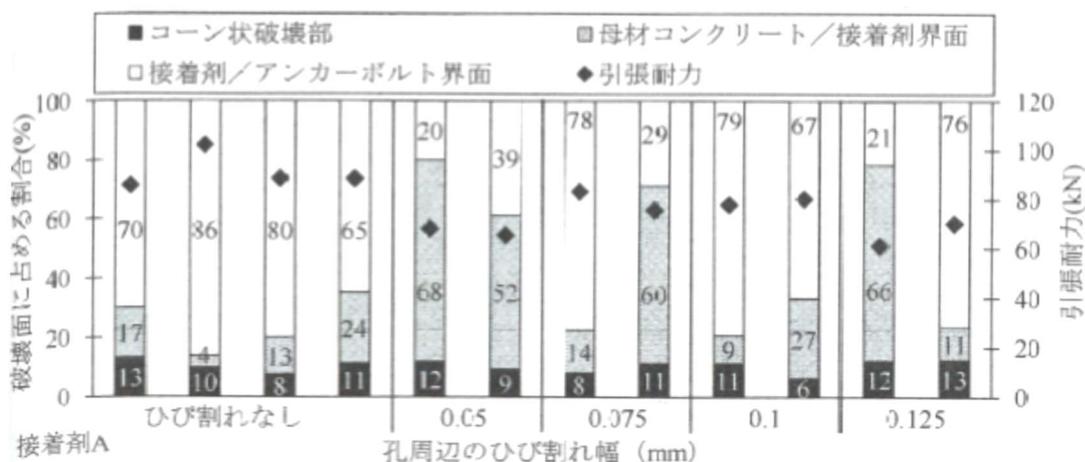


図-1.16 ひび割れ幅と破壊状況, 引抜き耐力【1.20】

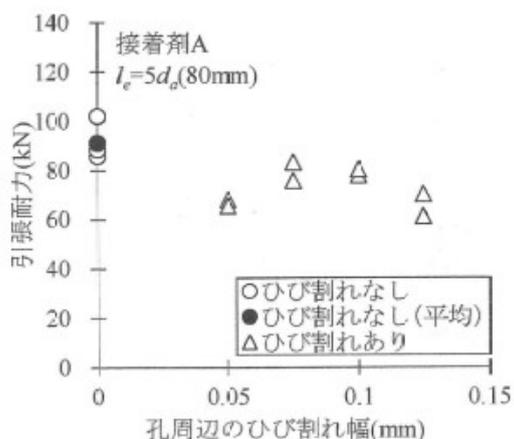


図-1.17 ひび割れ幅と引抜き耐力【1.20】

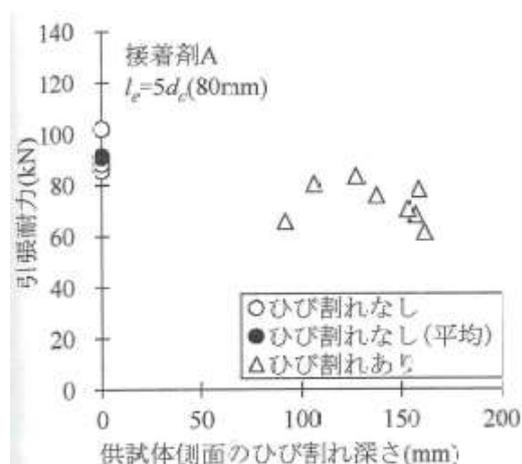


図-1.18 ひび割れ深さと引抜き耐力【1.20】

川上らは、ひび割れ幅 0.3mm, 0.5mm を、テフロンシートで模擬したひび割れと、曲げ試験機を用いて発生したひび割れをの試験体にて、接着系アンカーを施工し非拘束の試験を実施し、以下の結果を得た【1.21】.

- あと施工アンカーの引抜き耐力の低減率を検討する場合、実際にひび割れを導入する方法をモデル化し、ひび割れ幅の調整法、ひび割れ位置の影響を考慮する必要がある。
- ひび割れ導入時期をアンカー施工前後で比較した場合、あと施工アンカー施工後にひび割れを導入した場合、アンカー筋周辺のひび割れが生じる位置によって、引抜き耐力、低減率にばらつきがみられる。

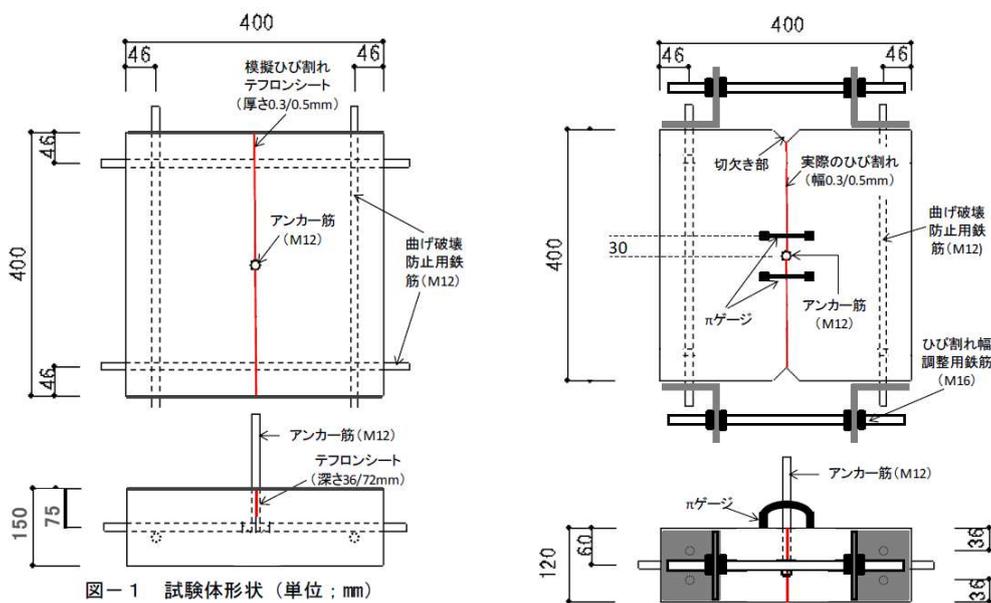


図-1 試験体形状 (単位: mm)

図-1.19 試験体形状【1.21】

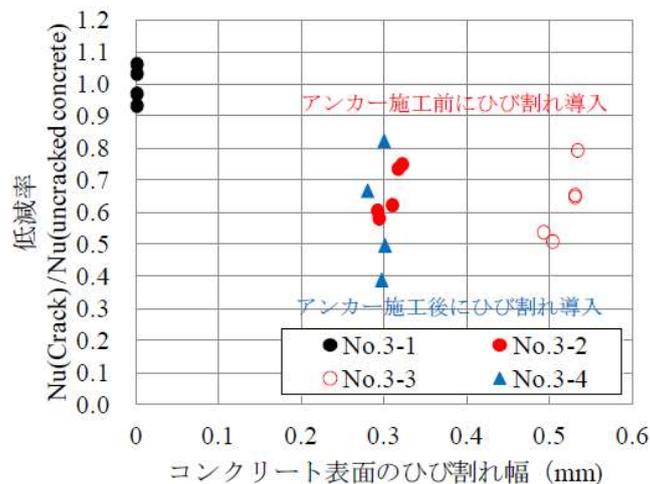


図-1.20 引抜き耐力の低減率【1.21】

中村らは、4種類の金属系アンカーと1種類の接着系アンカーを、ひび割れ幅が0.2mm以下、0.5mm前後、1.0mm前後、1.5mm前後の発生状況の異なる条件下で引抜き試験を実施し、以下の結果を得た【1-22】。

・あと施工アンカーの引抜き耐力とひび割れ発生時の耐荷挙動は、金属系アンカーの先端の形状の違いや金属系アンカーと接着系アンカーの固着メカニズムの違いによって異なる。このため、構造物の要求性能を適切に考慮して、所要の耐荷性能を有するあと施工アンカーを選定する必要がある。

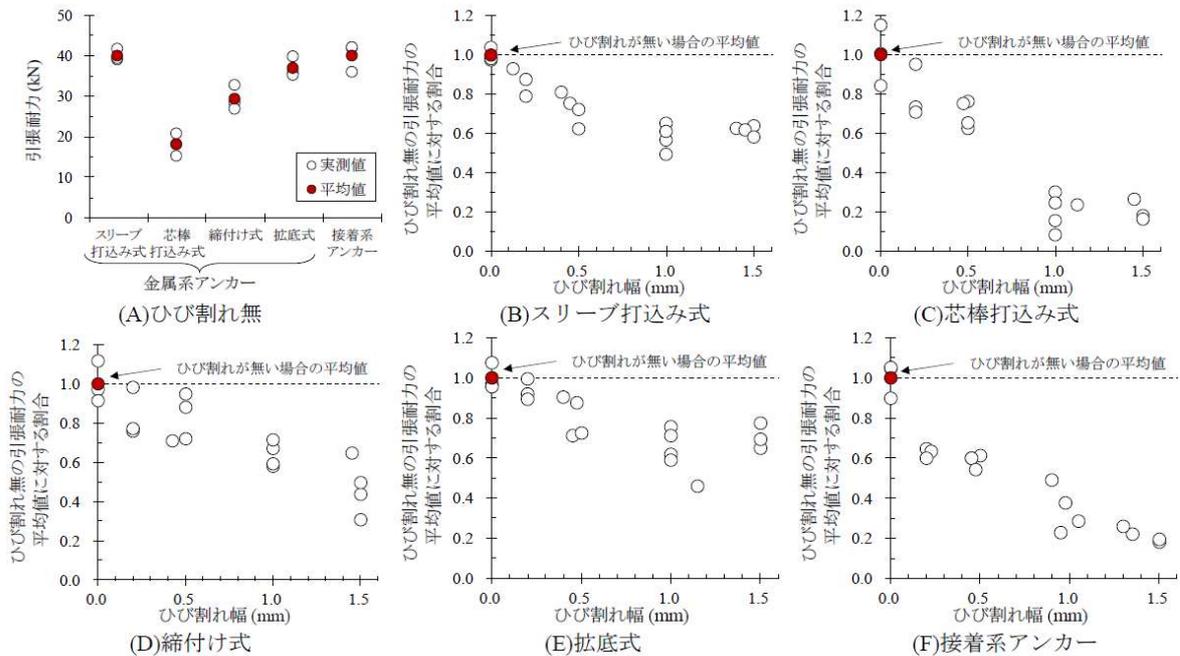


図-1.21 引抜き耐力【1.22】

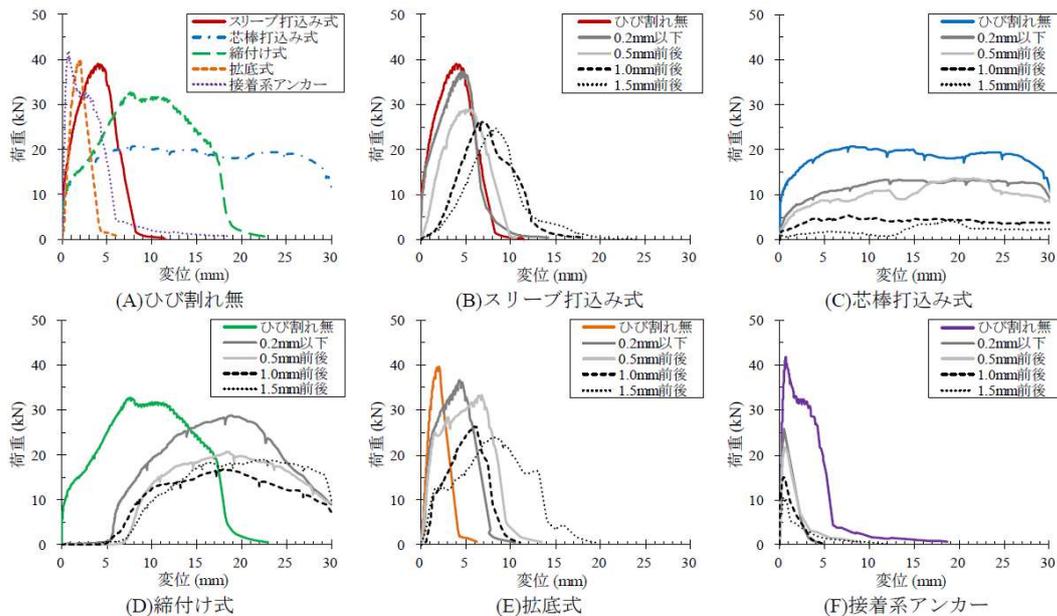


図-1.22 荷重-変位曲線【1.22】

安藤らは、鋼管コンクリート(図-1.3)に、ひび割れ幅 0.1mm, 0.3mm, 0.5mm のひび割れを導入し、接着系アンカーのアンカー筋 D13 と全ネジボルト M12 を先付けとあと施工別に、小型化した試験方法(図-1.4)を用いて引抜き試験を実施し、以下の結果を得た【1.23】。

・今回の試験装置を用いることにより、あと施工アンカー施工後にアンカー筋近傍に入るひび割れ幅を制御したあと施工アンカーの耐力の評価が可能である。(図-1.23, 図-1.24)

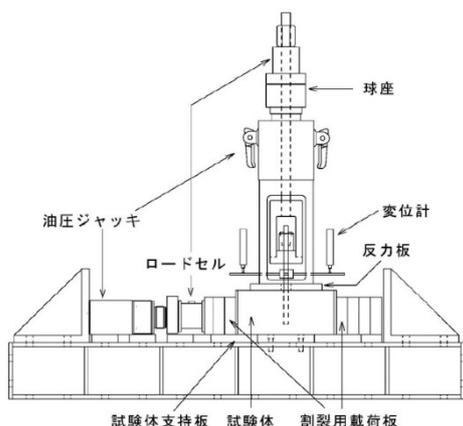


図-1.23 ひび割れコンクリート用鋼管【1.23】

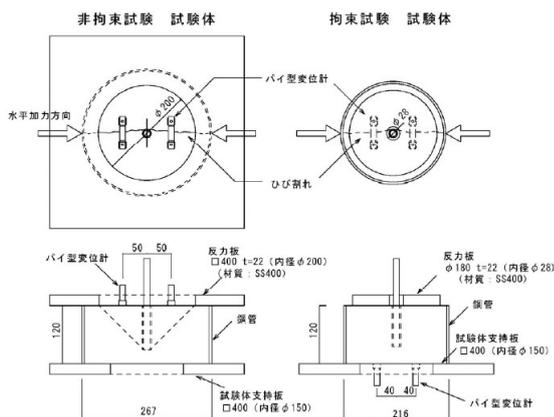


図-1.24 ひび割れ／加力試験装置

(拘束試験)コンクリート試験体【1.23】

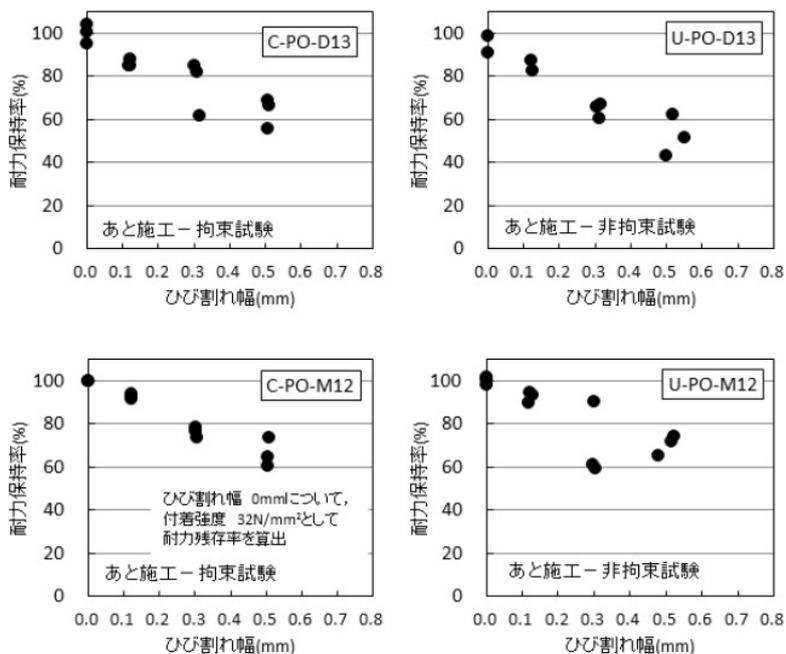


図-1.25 ひび割れ幅と耐力保持率 【1.23】

1.4 論文の構成

本研究は、5章から構成されており、論文の構成を図-1.26に示す。

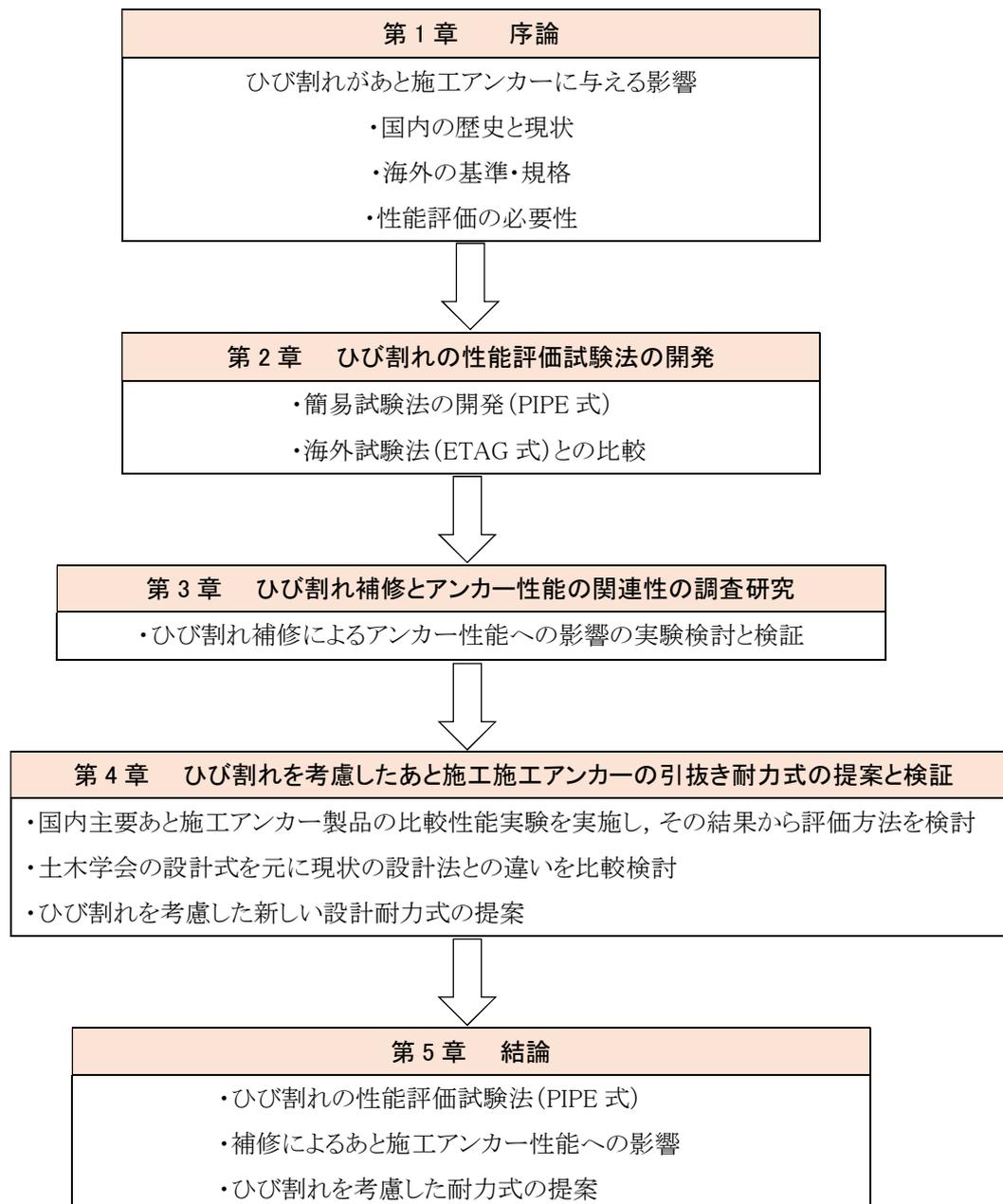


図-1.26 論文の構成

第1章の参考文献

- 【1.1】 土木学会:コンクリートライブラリー141「コンクリートのあと施工アンカー工法的设计・施工指針(案)」, 2016年
- 【1.2】日本コンクリート工学会, あと施工アンカーの耐久性の評価方法の確立と設計の高度化研究委員会:あと施工アンカーの耐久評価と設計方法に関する高度化に関するシンポジウム報告書, 2016年
- 【1.3】 EOTA:ETAG001 Guideline For European Technical Approval Of METAL ANCHORS FOR USE IN CONCRETE Part1 ANCHORS IN GENERAL, 2013
- 【1.4】 EOTA:ETAG001 Guideline For European Technical Approval Of METAL ANCHORS FOR USE IN CONCRETE Part2 TORQUE-CONTROLLED EXPANSION ANCHORS, 2013
- 【1.5】 EOTA:ETAG001 Guideline For European Technical Approval Of METAL ANCHORS FOR USE IN CONCRETE Part3 UNDERCUT ANCHORS, 2013
- 【1.6】 EOTA:ETAG001 Guideline For European Technical Approval Of METAL ANCHORS FOR USE IN CONCRETE Part4 DEFORMATION-CONTROLLED EXPANSION ANCHORS, 2013
- 【1.7】 EOTA:ETAG001 Guideline For European Technical Approval Of METAL ANCHORS FOR USE IN CONCRETE Part5 BONDED ANCHORS, 2013 EOTA:ETAG001 Guideline For European Technical Approval Of METAL ANCHORS FOR USE IN CONCRETE Part1 ANCHORS IN GENERAL, 2013
- 【1.8】 ACI : Qualification of Post-Installed Mechanical Anchors in Concrete (ACI 355.2-07), 2011
- 【1.9】 ACI : Qualification of Post-Installed Adhesive Anchors in Concrete (ACI 355.4-11), 2011
- 【1.10】 EOTA TECHNICAL REPORT :Design of Bonded Anchors TR029, 2010
- 【1.11】 ACI : Building Concrete Requirements for Structural Concrete(ACI 318-11), 2011
- 【1.12】株式会社保全工学研究所ホームページ写真, URL <http://www.hozeneng.co.jp/>
- 【1.13】一般社団法人コンクリートメンテナンス協会ホームページ劣化写真, URL <https://www.j-cma.jp/>
- 【1.14】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
- 【1.15】公益社団法人日本道路協会:道路橋示方書・同解説Ⅲコンクリート橋・コンクリート部材編, 2017,11
- 【1.16】公益社団法人土木学会:コンクリート標準示方書[設計編], 2017
- 【1.17】 稲田扶, 滝口克己:コンクリートに埋め込まれたボルトの引抜き耐力にひび割れが及ぼす影響, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.721-722, 1994.9
- 【1.18】 河村博之:ひび割れのあるコンクリート上のあと施工アンカーの耐力, コンクリート工学年次

論文集, Vol.18, No.2, pp.581-586, 1996

- 【1.19】 川口潤, 国枝稔, 牧田通:コンクリート強度及びひび割れがあと施工アンカーの耐荷性に与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.2, pp.511-516, 2015
- 【1.20】 中村英治, 川上明大, 渡辺博志:接着系あと施工アンカーの引張耐荷挙動に及ぼす施工条件の影響, 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, 第 15 卷, pp.377-380, 2015.10
- 【1.21】 川上明大, 安藤重裕, 中野克彦, 渡辺一弘:超速硬セメント注入式あと施工アンカーの引抜き耐力に及ぼすひび割れの影響, コンクリート工学年次論文集 Vol.36, No.1, pp.1894-1899, 2014
- 【1.22】 中村英治, 水戸健介, 古賀裕久:固着方法の異なるあと施工アンカーの引張耐力に関する研究, 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, 第 19 卷, pp.515-520, 2019.10
- 【1.23】 安藤重裕, 中野克彦, 田沼毅彦, 有木克良:コンクリートのひび割れに対するアンカー筋の種類による引き抜き耐力の保持率に関する実験的研究, 日本建築学会技術報告集, 25 卷 59 号, pp.51-54, 2019.02

第2章

ひび割れを有するコンクリートを対象とした引抜き試験 方法の提案

2.1 実験目的

日本では母材コンクリートのひび割れがあと施工アンカーの引抜き挙動に及ぼす影響に関する十分な知見がなくデータの充実が望まれており、そのためにも簡易的な評価方法の確立が急務ともいえる。著者らはこれまで、鋼管にコンクリートを充填した試験体の割裂試験により、コンクリート中央部分に貫通ひび割れを導入し、金属系および接着系の 2 種類のあと施工アンカーの引抜き試験を実施している【2.2】。これにより、小型化した評価方法の検証およびデータの蓄積を行っている。

本研究では、現在欧州で行われているひび割れの影響試験(以後 ETAG 式)と著者らが提案している簡易試験法(以後 PIPE 式)の比較試験を実施し、評価方法の適用範囲や妥当性を検討した。

2.2 既往の指針でのひび割れの取扱い

既往の設計指針等においても母材コンクリートのひび割れの影響について言及されている。例えば、(一社)日本建築学会「日本建築学会各種合成構造設計指針 2010」【2.2】では、図-2.1 に示すように、母材コンクリートのひび割れ幅が接着系あと施工アンカーの引抜き支持力に及ぼす影響が示されている。ひび割れ幅が 0.3mm 程度の場合、引抜き力は平均的に 50%に低下しており、これらの実験結果を参考に、アンカー筋の埋め込み長さが $10d_a$ (d_a : アンカー径(mm)) 未満と短い場合には、ひび割れが生じている母材コンクリートには、平均付着強度 τ_a を適切に低減して引抜き支持力を評価することも必要としている。また、土木学会「コンクリートのあと施工アンカー工法の設計・施工指針(案)」【2.3】では、供用時に何らかの理由でひび割れが発生した場合には、ひび割れの影響を適切に考慮して、設計時のあと施工アンカー部の耐力を再評価する必要があるとしている。例えば、図-2-2 に示すように、設計時に想定されたあと施工アンカー部の有効投影面積内にひび割れが確認された場合は、あと施工アンカーよりひび割れまでの母材コンクリートのひび割れのない部分を有効水平投影面積として、耐力を算出して対策の要否を判断することが極めて重要であるとしている。

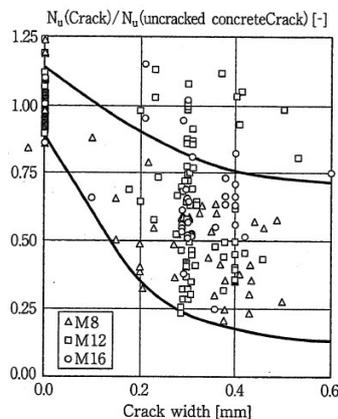


図-2.1 ひび割れ幅と引抜き支持力の関係 【2.2】

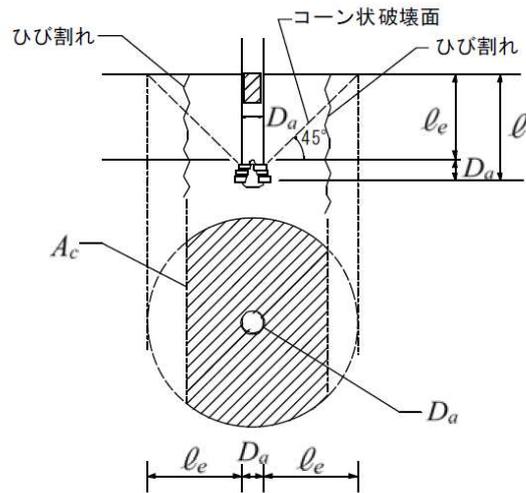


図-2.2 ひび割れと有効水平投影面積【2.3】

このように、日本におけるあと施工アンカーに関する設計指針等においては、ひび割れの有無やひび割れ幅の違いがあと施工アンカーの引抜き挙動に影響を及ぼすことについて言及はされているものの、その影響を定量的に考慮するには至っていない。その理由としては、ひび割れの影響を考慮した試験自体が難しいことや、結果のばらつきが大きいこと、さらにはあと施工アンカーが多種多様であり、系統立てて結果の整理が難しいことなどによる。

欧米では、ETAG(European Technical Approval Guidelines)001 Annex A【2.4】や ACI(American Concrete Institute)355.2-07【2.5】と 355.4-11【2.6】で規定されているひび割れを導入したコンクリート平板を用いた試験方法などにより、あと施工アンカー毎にひび割れの影響を評価し、その結果を直接設計式に反映させる体系となっている。すなわち、母材コンクリートのひび割れがあと施工アンカーの引抜き挙動に及ぼす影響について明らかにするとともに、ひび割れの影響を受けにくいあと施工アンカーの開発へのフィードバックにも役立っているといえる。

2.3 実験概要

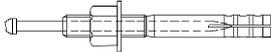
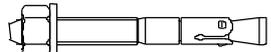
2.3.1 概要

本実験では、ETAGに規定されている平板供試体を用いた試験方法(以下、ETAG式と呼ぶ)と、著者らが提案している鋼管コンクリートを用いた試験方法(以下、PIPE式と呼ぶ)を用いて、母材コンクリートのひび割れが各種あと施工アンカーの引抜き挙動に及ぼす影響について比較検討する。両試験方法に用いたコンクリートなどはすべて同一とし、またひび割れ幅などのパラメータも基本的には同一とした。

2.3.2 基本パラメータ

試験中のひび割れ幅の制御の有無、アンカー種類、ひび割れ幅をパラメータとして、引抜き試験を実施した。表-2.1にパラメータ一覧を示す。アンカー筋のサイズは全てM12とし、金属系については、拡張アンカーの芯棒打込み式アンカー、締付方式のウェッジ式アンカーおよび拡底式アンカー(セルフアンダーカットアンカー)の3種類、接着系については、エポキシ系注入方式のカートリッジ型アンカー(穿孔径 14.0mm, 穿孔長 84mm)の1種類とした。供試体は、基本的には各パラメータにつき5体とし、拡底式アンカーは各1体とした。

表-2.1 試験パラメータ

分類		種類 略図	穿孔径 (mm)	埋込長 (mm)	ひび割れ幅 (mm)
金属系	拡張 アンカー	芯棒打込み式 	φ13	60	なし
					0.2
					0.5
	ウェッジ式 (締付方式)		φ12	75	なし
					0.2
					0.5
拡底 アンカー	拡底式 	φ22	133	なし	
				0.2	
				0.5	
接着系		注入式 (カートリッジ型)	φ14	60	なし
					0.2
					0.5

2.4 ETAG 式

前述の通り, ETAG001 Annex A【2.4】や ACI 355.2-08【2.5】と 355.4-11【2.6】により, アンカーのひび割れ影響試験の方法が既に確立されている。図-2.3と図-2.4に, ETAG 式で用いるコンクリート供試体の概要を示す。1800mm×1800mm×350mm のコンクリート板に, 横1列に対し6箇所の試験箇所を縦4列に設定し, そこを挟むように D13 の鉄筋と, コンクリート版の隅部にひび割れ防止用に D10 を配置した。試験箇所の間には, 横1列にひび割れを発生させる目的で専用のくさびを挿入する為の貫通穴(φ25mm)を1列7箇所×4列の合計28か所あけた。試験体あと施工アンカーを施工するコンクリート面は, 均し面側ではなく型枠面側を使用した。表-2-2にコンクリートの配合を示す。試験時(材齢42日)のコンクリート圧縮強度は 32.1N/mm²であった。

図-2.5に ETAG 式の試験フロー図を示す。図-2.6に示す様に, コンクリート板のひび割れ発生用の貫通穴の横一列に専用のくさびを挿入し, 大ハンマーを用いて, 人力でくさびを均等に打撃しながらコンクリート板に目視で確認できる程度のひび割れを発生させた。ひび割れの範囲はコンクリート板の表面だけではなく, 側面にも発生するのを確認できるまで打撃し, その後, ひび割れの位置をマジックでマーキングし, 一旦すべてのくさびを引抜く。

マーキングした位置に試験体アンカーの下孔を穿孔し再度くさびを挿入してハンマーで打撃しながらひび割れを開き, 図-2.7と図-2.8に示す様に, 試験体アンカーの下孔の孔底までひび割れが発生していることをファイバースコープで確認した。ひび割れが下孔まで達していない場合は, その下孔は試験には使用せず, 別の場所に再度穿孔する。その後再び全てのくさびを引抜き, 試験体アンカーを施工した。

引抜き試験の直前に再びくさびを挿入し, ハンマー打撃でひび割れを開く。その時のひび割れ幅の調整は, 図-2.9に示す様にパイ型変位計をひび割れを跨ぐように設置し, ひび割れ幅を計測しながら, くさびを打撃することで幅を調整した。ひび割れ幅の設定範囲は, 管理値を所定のひび割れ幅+0.05mmとし, 0.2mmの試験は0.20mm~0.25mm, 0.5mmの試験は0.50mm~0.55mmの範囲とした。1列のひび割れ幅全てが所定の範囲のひび割れ幅になったら, あと施工アンカー引抜き試験を実施した。図-2.10に示す様に, 横1列のひび割れに対して最大6本のアンカーの試験を行い, その横1列の引抜き試験が完了後に次の列に移る。ひび割れが下孔まで達していない場合, その下孔は試験には使用できないことから, コンクリート板1体における試験可能本数が少なくなる場合もあり, 試験効率と費用の面における課題とも言える。

図-2.11に金属系アンカー引抜き試験状況を図-2.12に接着系アンカー引抜き試験状況を示す。金属系アンカーは, 非拘束で行い, 試験中のひび割れ幅も計測し, あと施工アンカーの引抜き力に対する影響と, ひび割れ幅の制御の可否を検討した。接着系アンカーは, 樹脂の付着力の計測を目的とし拘束板(拘束径=18mm)を使用して拘束試験として実施した。

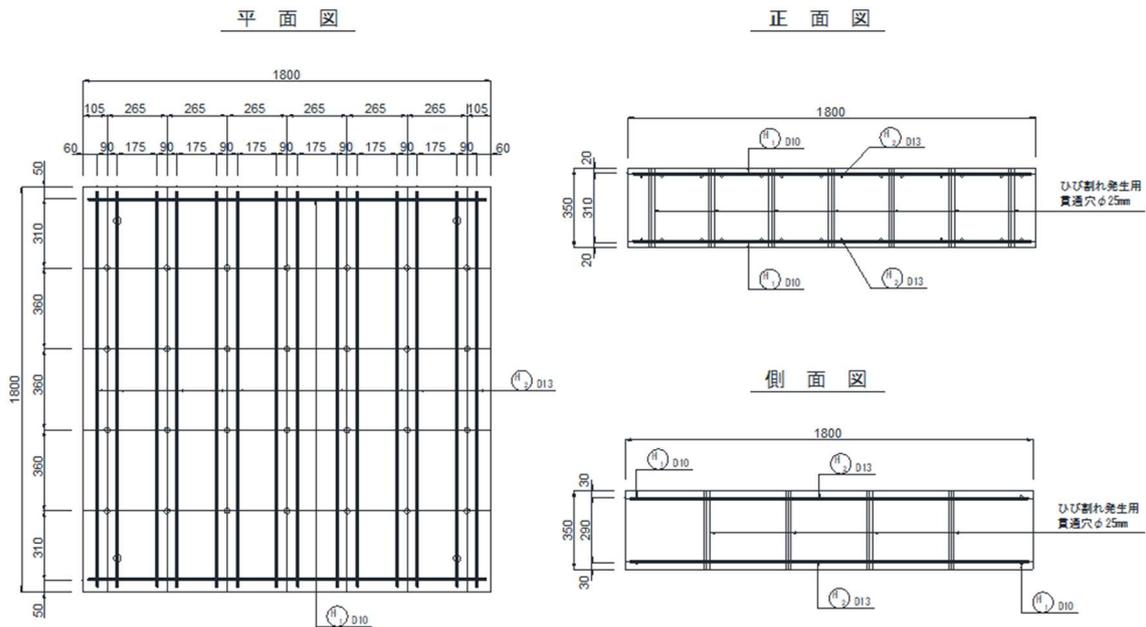


図-2.3 コンクリート供試体図(ETAG 式)



図-2.4 コンクリート供試体(ETAG 式)

表-2.2 母材コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
		水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
54.5	46.9	161	296	856	1004	1.78

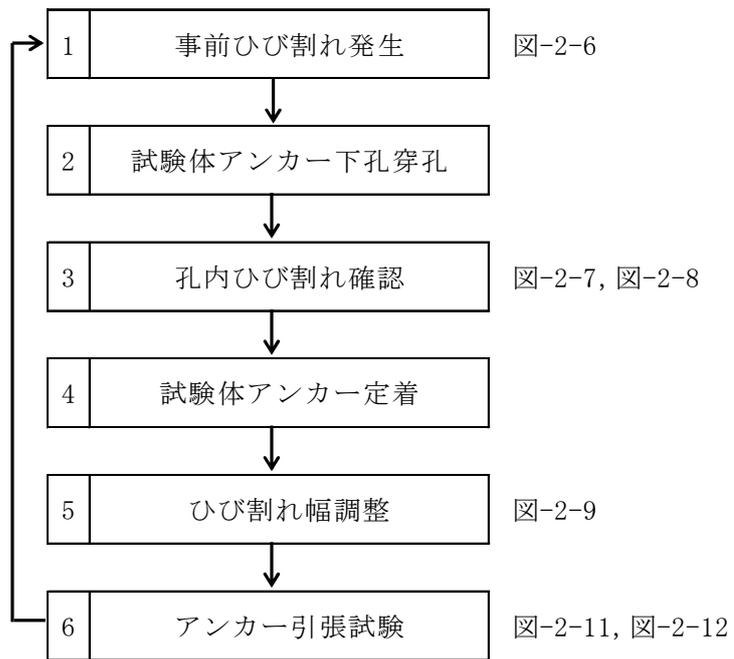


図-2.5 試験フロー図(ETAG 式)



図 2.6 ひび割れ発生状況(ETAG 式)



図-2.7 孔内ひび割れ確認状況(ETAG 式)



図-2.8 孔内ひび割れ(ETAG 式)



図-2.9 ひび割れ幅計測(ETAG 式)

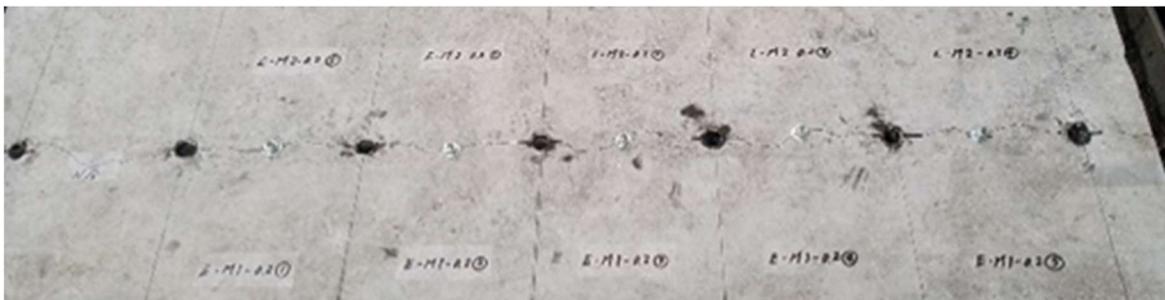
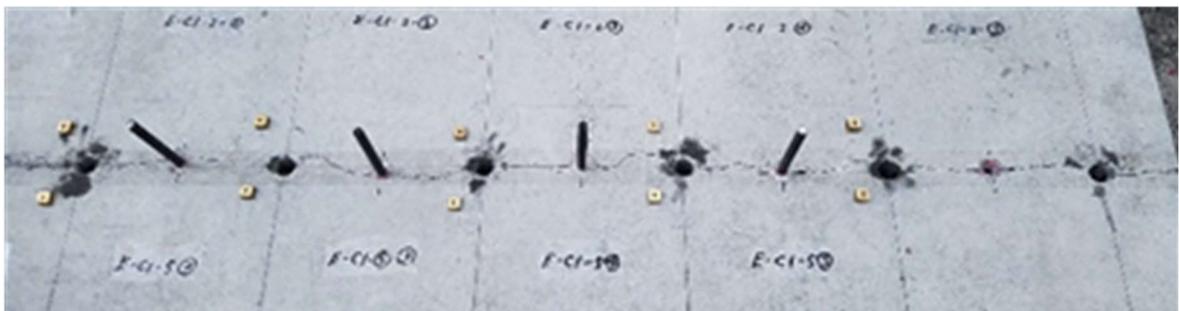


図-2-10 ETAG 式試験体(上:接着系アンカー, 下:金属系アンカー)



図-2.11 金属系アンカー引抜き試験状況(非拘束試験)



図-2.12 接着系アンカー引抜き試験状況(拘束試験)

2.5 PIPE 式

図-2.12と図-2.13に、PIPE 式のコンクリート供試体の概要を示す。鋼管(一般構造用鋼管、鋼管厚 4.5mm)にコンクリートを打設し作製した、鋼管の外径は、金属系、接着系アンカーの埋込み長の2倍以上である216mmとし供試体は、各パラメータにつき5体作製した。

図-2.15に試験フローを示す。鋼管コンクリート供試体の中心に試験体アンカーの下孔の穿孔を行い、図-2.16に示す様に、アムスラー式圧縮試験機により割裂ひび割れを表と裏の両面に目視確認出来る程度まで導入する。ひび割れが下孔の孔底まで発生しているかをファイバースコープで確認した所、図-2.17に示す様に、全てのコンクリートの下孔にひび割れが達していたことが確認できた。その後、アムスラーから取りはずし、図-2.18に示す様に試験体アンカーの施工をそれぞれ行った。

図-2.19に PIPE 式ひび割れ影響試験装置を示す。コンクリートのひび割れ幅を調整するために、水平方向に配置した油圧ジャッキを用いて鋼管を圧縮し、ひび割れを所定の幅(0.2mm:0.2mm~0.25mm, 0.5mm:0.50mm~0.55mm)となるまで広げた。所定のひび割れ幅の範囲に達したことを確認した状態で、引抜き試験を実施した。ひび割れ幅の計測は精度 1/1000mm のパイ型変位計をひび割れを跨ぐ位置に1ヶ所設置し、引抜き試験前のひび割れ幅を計測した。金属系アンカーの試験はひび割れ幅の調整が完了したらそのままの状態ですべて引抜き試験機を設置し、試験中のひび割れ幅も計測しながら引抜き荷重を実施した。一方、接着系アンカーの場合は、拘束試験の為、ひび割れ幅の調整の完了後にパイ型変位計を取り外し、拘束板を設置した上に試験機を設置し引抜きを実施した。

引抜き荷重は、上部に容量 200kN のセンターホールジャッキおよび容量 200kN、精度 100N のロードセルを配置して引抜き力を測定した。試験体アンカーの変位はストローク 25mm、精度 1/500mm の高感度変位計を2本用いて試験体アンカーのコンクリート面から高さ 20mm の位置の抜き出し変位量を測定し平均値を変位量とした。

引抜き試験は、金属系アンカー(3種類)は非拘束型(拘束孔径=200mm)とし、接着系アンカーは拘束型(拘束孔径=18mm)として実施した。ひび割れ幅の調整範囲は、管理値を所定の幅+0.05mmの範囲とし、0.2mmの試験は0.20~0.25mm、0.5mmの試験は0.50~0.55mmの範囲で調整した。

また、ひび割れ幅の制御に関しては、ETAG 式の試験にて、試験中のひび割れ幅を計測しその結果により、PIPE 式の制御の可否を判断することとした。

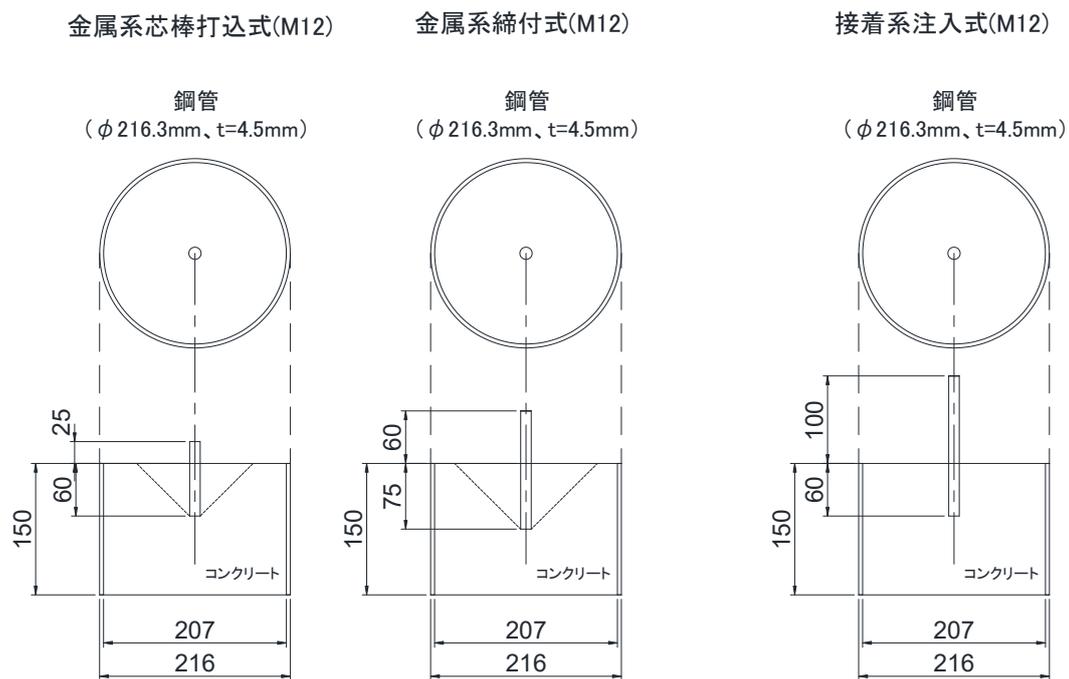


図-2.13 コンクリート供試体(PIPE 式)



図-2.14 コンクリート供試体(PIPE 式)

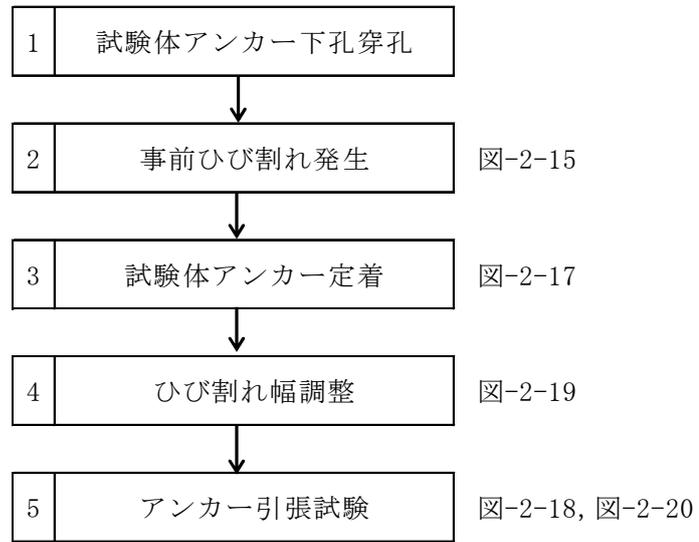


図-2.15 試験フロー図(PIPE 式)

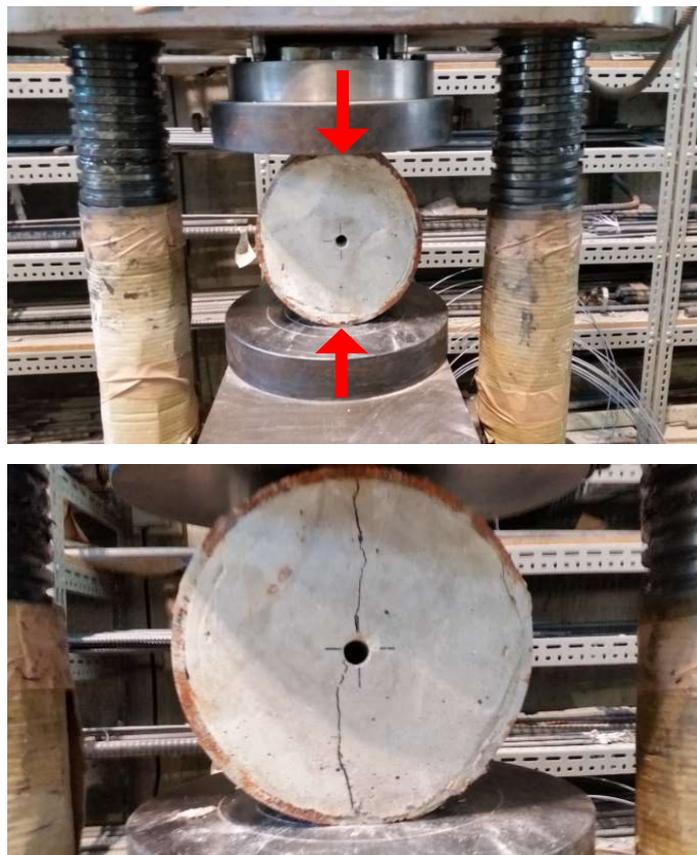


図-2.16 事前ひび割れ発生状況(PIPE 式)



図-2.17 事前ひび割れ発生状況(PIPE 式)



図-2.18 PIPE 式試験体(左:接着系, 右:金属系)

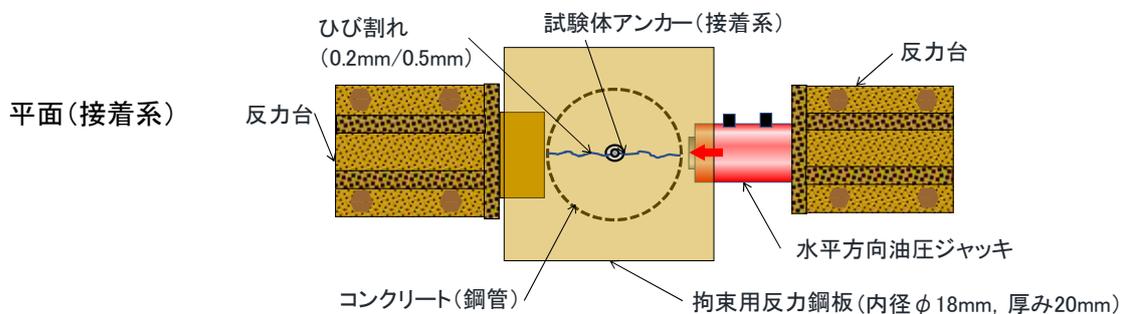
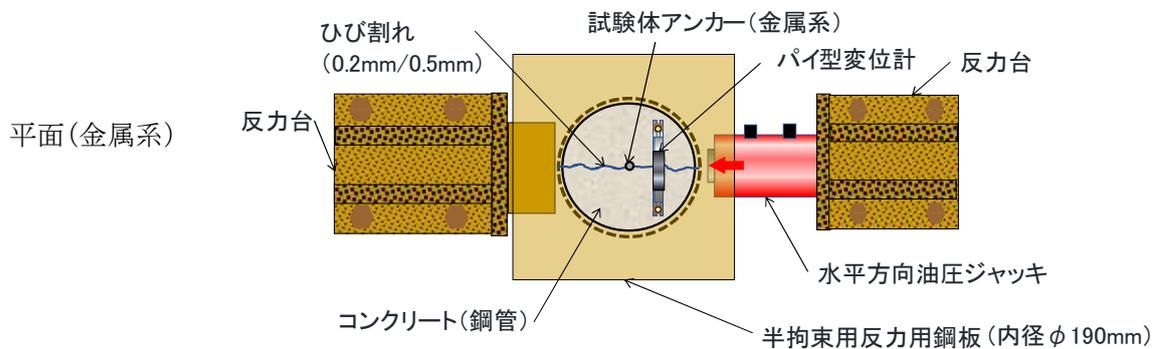
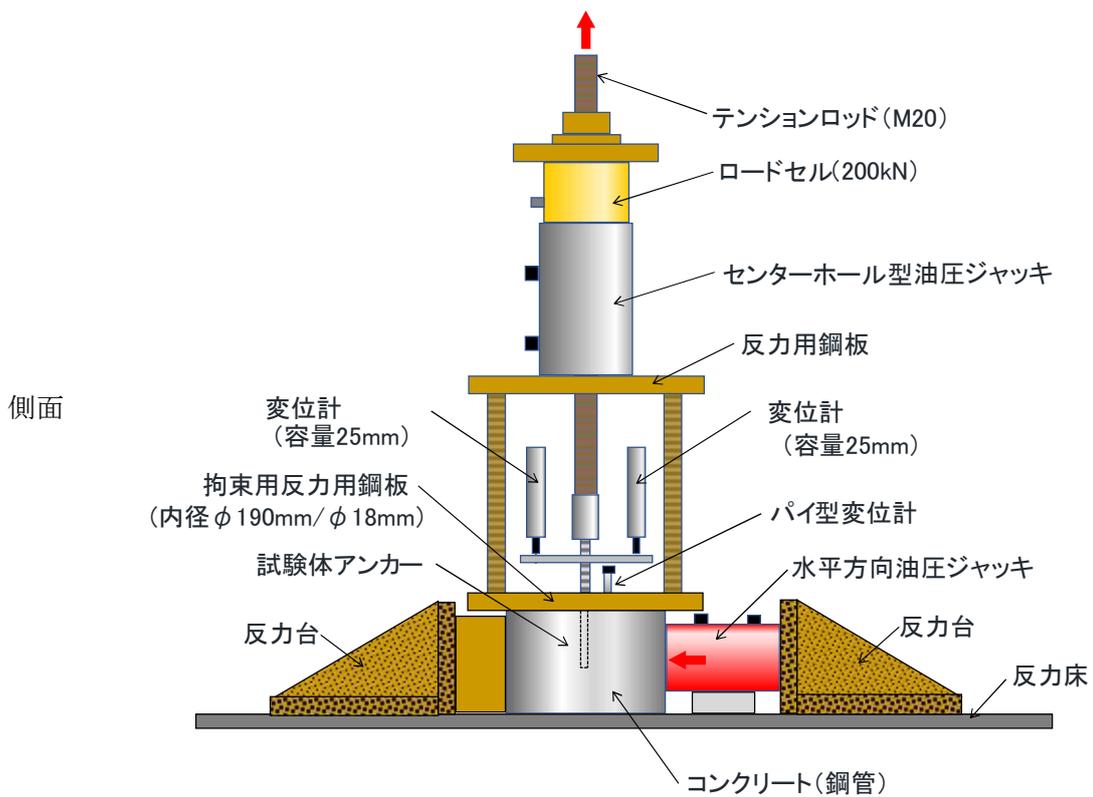


図-2.19 PIPE 式ひび割れ影響試験装置



図-2.20 引抜き試験前ひび割れ幅調整状況 (PIPE 式)



図-2.21 金属系アンカー試験時のひび割れ幅計測状況 (PIPE 式)

2.6 実験結果

表-2.3 に ETAG 式, 表-2.4 に PIPE 式の, アンカー種別とひび割れ幅別の, 破壊モード, 最大荷重平均値(5 体), 標準偏差, 変動係数, 95%信頼値, およびひび割れなし(グラフ中では 0mm と示す)の 95%信頼値を基準とした残存率(%)を示す. また, 図-2.25 から図-2.30 にはそれぞれのあと施工アンカー種類毎のひび割れ幅と最大荷重を示す.

金属系アンカーの芯棒打込式とウエッジ式の最大荷重値の結果は, ETAG 式と PIPE 式では同様の傾向となり, 残存率においては, ひび割れ幅が 0.2mm の場合は 60~70%程度, 0.5mm の場合は 30~50%程度となった.

接着系アンカーは, ETAG 式と PIPE 式に結果の差が見られた. ETAG 式では, ひび割れ幅 0.2mm では 73%, 0.5mm では 34%に対し PIPE 式では 76%と 50%と, ひび割れ幅が大きくなると試験方法の違いによる差が大きくなる広がる傾向が見られた. PIPE 式の最大荷重値の結果が ETAG 式に比べて高くなる理由については, PIPE 式ではひび割れを開きさせるために供試体に圧縮力を作用させる. この圧縮力は, 作用方向にあと施工アンカーを押さえつける効果があり, 引抜きに対する抵抗性を向上させている可能性が考えられる. この影響のメカニズムおよびその影響については引き続き検証が必要である.

破壊モードに関しては, 金属系アンカーでは, 拡張式は, ひび割れなしの場合は, 5 体全てアンカー抜けとコーン状破壊の複合破壊であった. ひび割れが 0.2mm の場合には, ひび割れによりコーンが 2 分割になり, さらにあと施工アンカーの抜けが卓越したコーン破壊との複合破壊であった. 0.5mm の場合には, さらにアンカーの抜けが卓越し, 芯棒打込み式に関しては, 5 割以上があと施工アンカーの抜け破壊となった. 拡底式は, 両試験方法において, ひび割れなしとありの全ての試験で破壊モードが鋼材破壊であり, ひび割れの影響がないことが確認された.

また, 図-2.23 に金属系アンカー引抜き試験時の最大荷重時のひび割れ幅の平均値を示し, 図-2.24 に試験中のひび割れ幅と荷重の関係のグラフを示す. 芯棒打込み式は, 破壊までに 0.1mm 以内の開きが生じている. ウエッジ式は, 0.2~0.3mm の開きが生じている. 拡底式は, 0.02mm 以下とほとんど開きが見られない結果となった. ETAG 式と PIPE 式を比較しても同様の傾向が確認されたことから, PIPE 式においては, ひび割れを制御しない試験方法が ETAG 式と同様の結果となったことが確認された.

表-2.3 実験結果一覧(ETAG 式)

アンカー	ひび割れ幅 (mm)	試験体 No.	破壊 モード	最大荷重				
				平均 (kN)	標準偏差	変動係数 (%)	95%信頼値	残存率 (%)
金属系芯棒打込式	なし	P-M1-0	A・C	27.4	1.7	6.1	24.0	100.0
	0.2	P-M1-0.2	A・C	18.9	0.8	4.3	17.3	71.9
	0.5	P-M1-0.5	A・C	13.8	1.2	8.9	11.4	47.3
金属系ウエッジ式	なし	P-M2-0	A・C	43.3	3.3	7.7	36.6	100.0
	0.2	P-M2-0.2	A・C	32.9	3.3	10.1	26.2	71.6
	0.5	P-M2-0.5	A・C	26.5	5.5	20.9	15.4	42.0
金属系拵底式	なし	P-M3-0	E	69.1	—	—	—	100.0
	0.2	P-M3-0.2	E	69.3	—	—	—	99.7
	0.5	P-M3-0.5	E	68.0	—	—	—	101.6
接着系注入式	なし	P-C-0	D	77.5	6.0	7.7	65.4	100.0
	0.2	P-C-0.2	D	58.3	4.0	6.9	50.1	76.7
	0.5	P-C-0.5	D	45.5	6.2	13.7	32.9	50.3

A : アンカー抜け B : 割裂破壊 C : コーン破壊 D : 付着破壊 E:鋼材破壊

表-2.4 実験結果一覧表(PIPE 式)

アンカー	ひび割れ幅 (mm)	試験体 No.	破壊 モード	最大荷重				
				平均 (kN)	標準偏差	変動係数 (%)	95%信頼値	残存率 (%)
金属系芯棒打込式	なし	E-M1-0	A・C	25.3	1.4	5.4	22.5	100.0
	0.2	E-M1-0.2	A・C	15.2	0.3	2.2	14.5	64.3
	0.5	E-M1-0.5	A・C	11.2	1.8	16.4	7.5	33.3
金属系ウエッジ式	なし	E-M2-0	A・C	42.3	3.1	7.3	36.1	100.0
	0.2	E-M2-0.2	A・C	29.3	3.2	11.1	22.7	63.0
	0.5	E-M2-0.5	A・C	24.6	3.0	12.1	18.6	51.6
金属系拵底式	なし	E-M3-0	E	66.1	—	—	—	100.0
	0.2	E-M3-0.2	E	69.9	—	—	—	94.7
	0.5	E-M3-0.3	E	68.3	—	—	—	96.8
接着系注入式	なし	E-C-0	D	78.8	7.7	9.8	63.3	100.0
	0.2	E-C-0.2	D	49.1	1.4	2.8	46.4	73.2
	0.5	E-C-0.5	D	26.6	2.4	8.8	21.8	34.5

A : アンカー抜け B : 割裂破壊 C : コーン破壊 D : 付着破壊 E:鋼材破壊

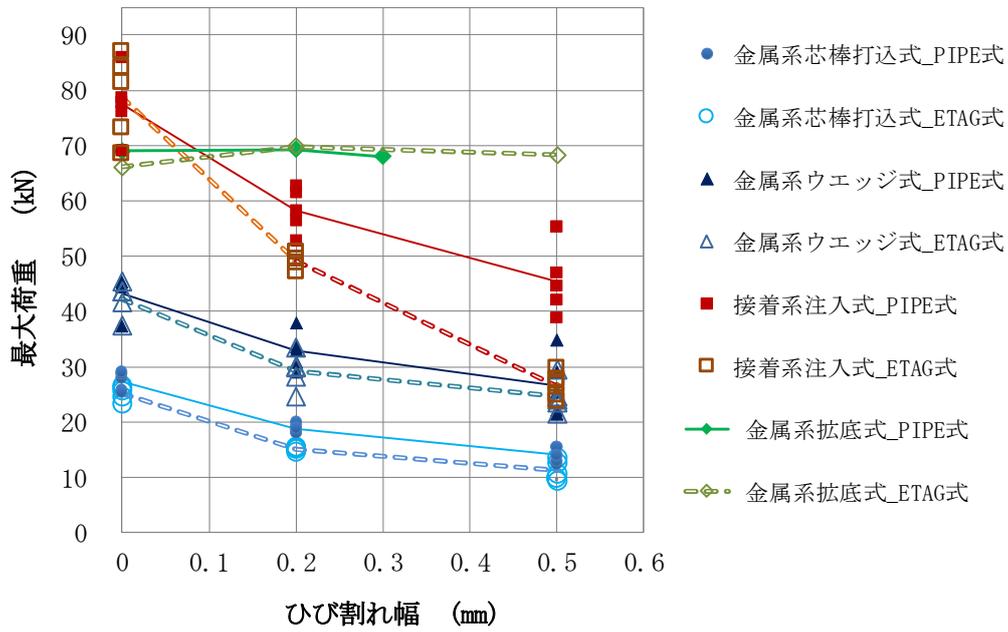


図-2.22 ひび割れ幅と最大荷重

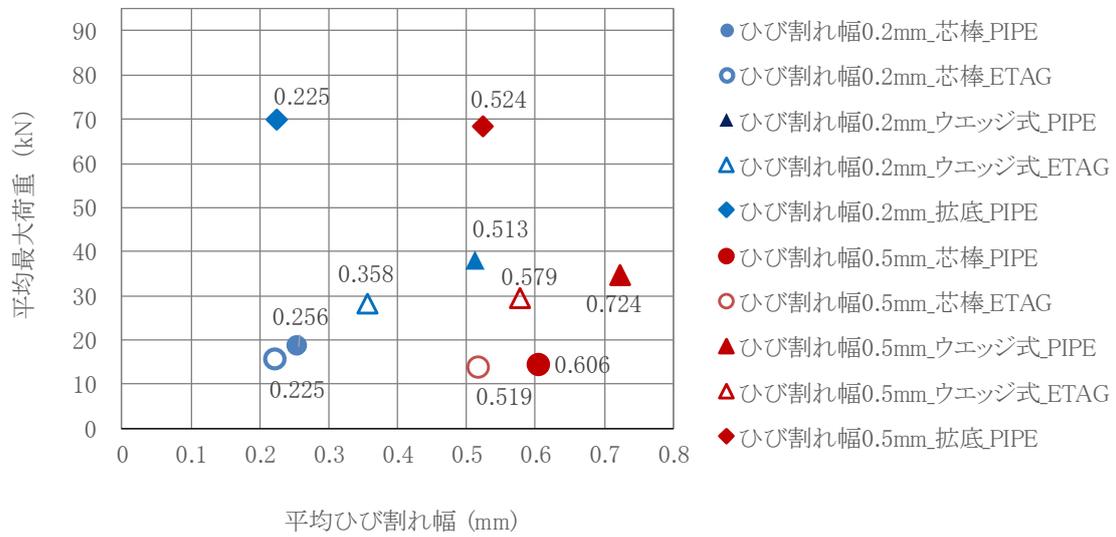


図-2.23 最大荷重時のひび割れ幅

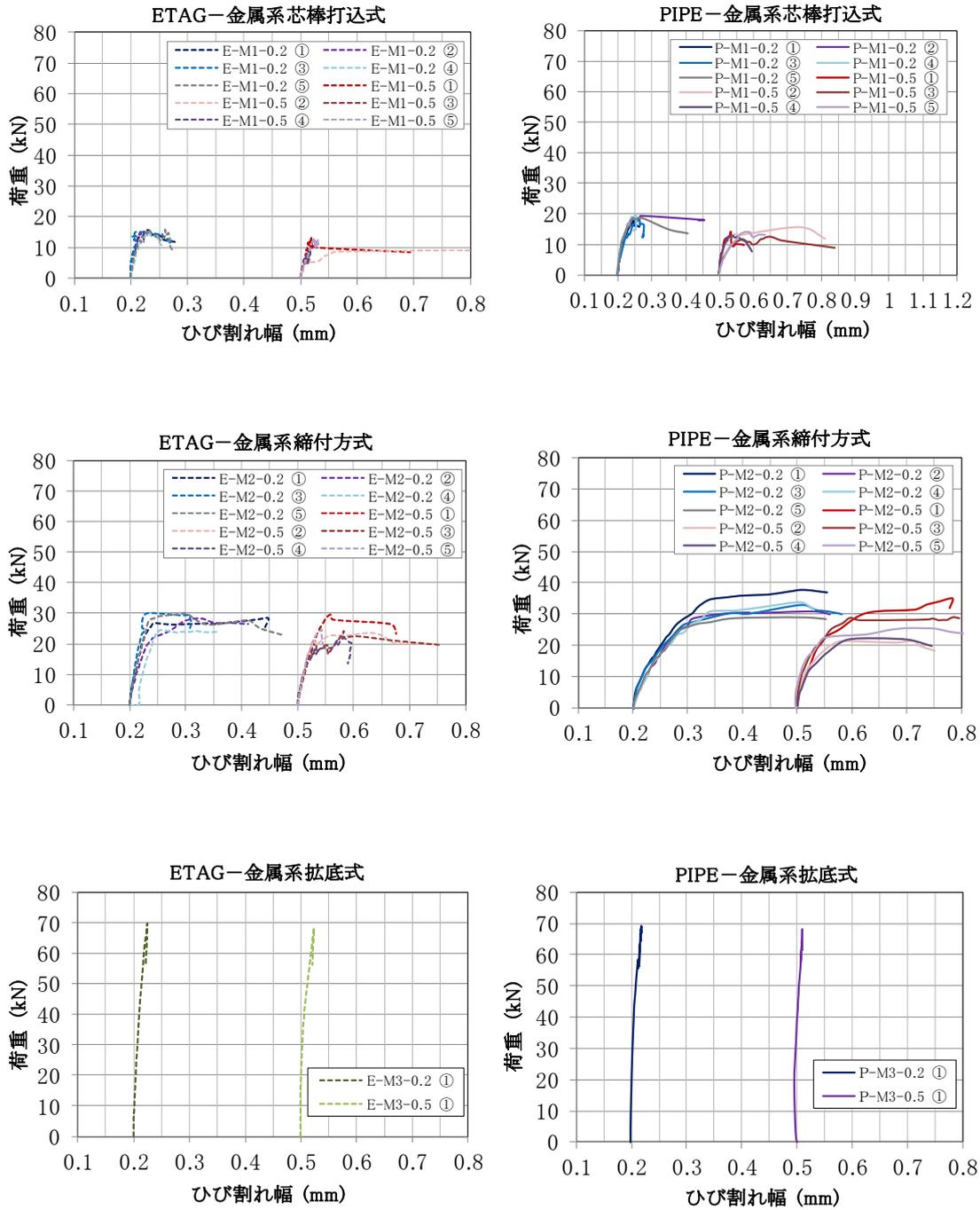


図-2.24 試験中のひび割れ幅と荷重

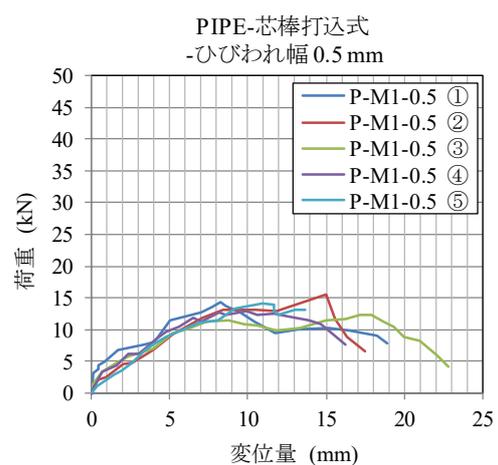
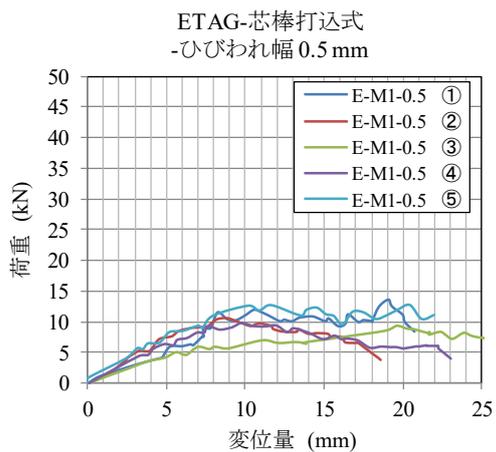
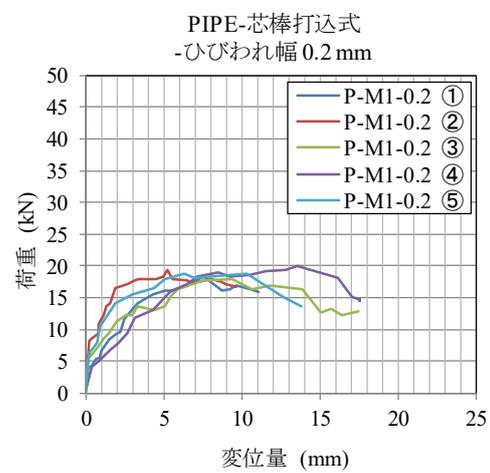
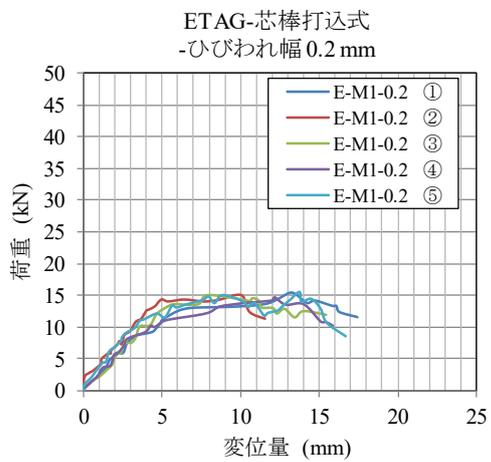
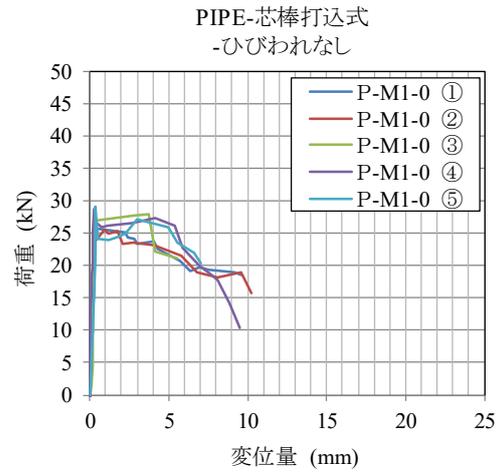
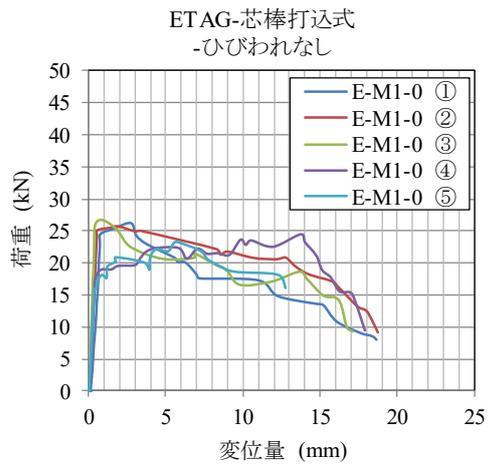


図-2.25 ひび割れ条件別荷重変位曲線
(ETAG 式)金属系芯棒打込式

図-2.26 ひび割れ条件別荷重変位曲線
(PIPE 式)金属系芯棒打込式

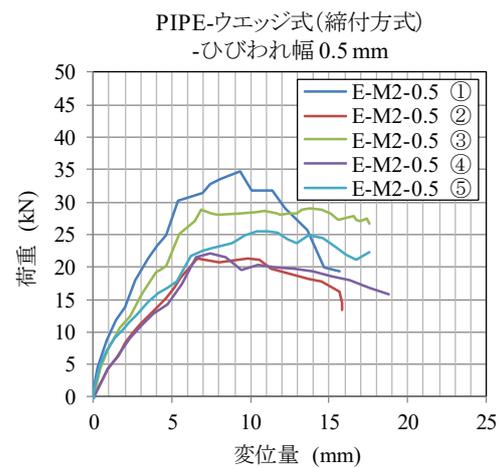
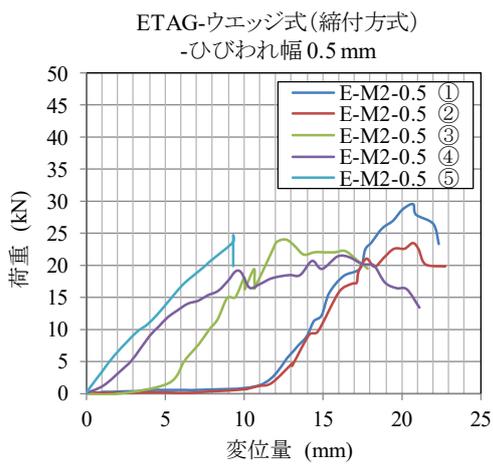
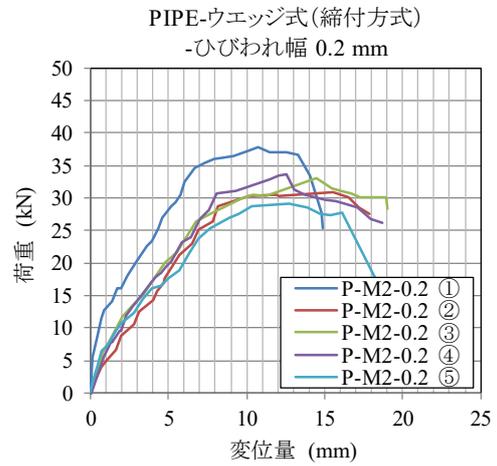
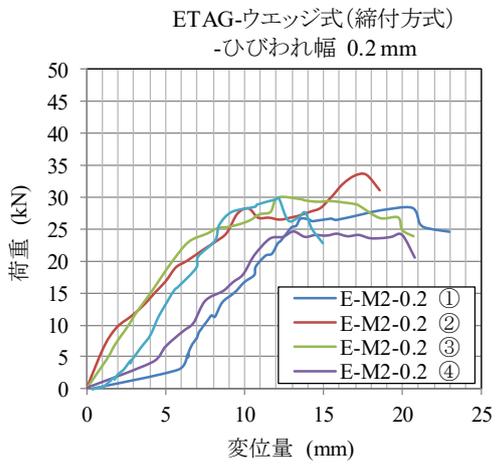
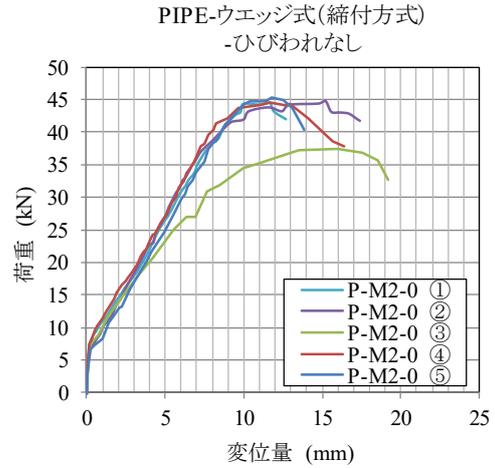
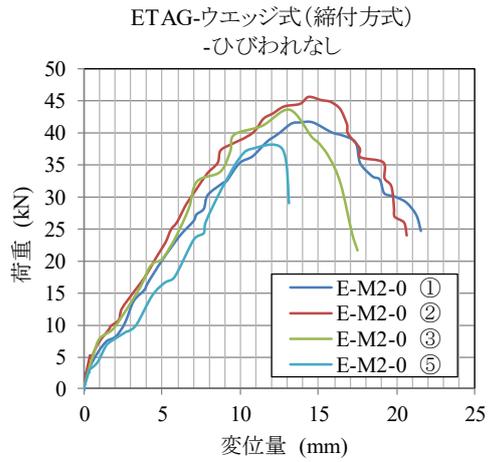


図-2.27 ひび割れ条件別荷重変位曲線
(ETAG 式)金属系ウエッジ式
(締付方式)

図-2.28 ひび割れ条件別荷重変位曲線
(PIPE 式)金属系ウエッジ式
(締付方式)

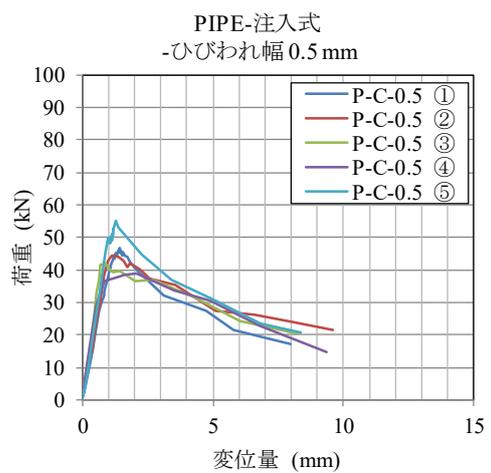
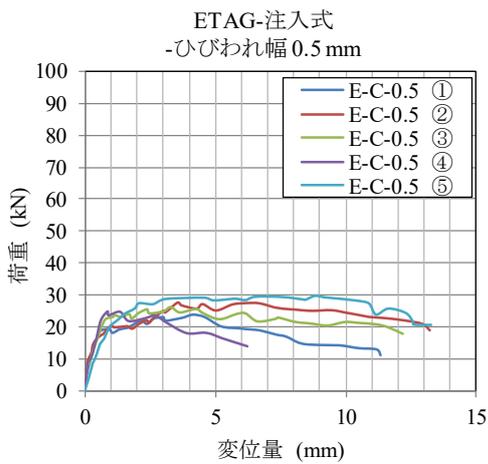
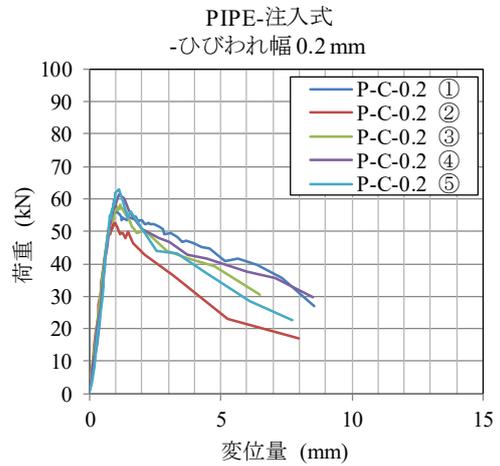
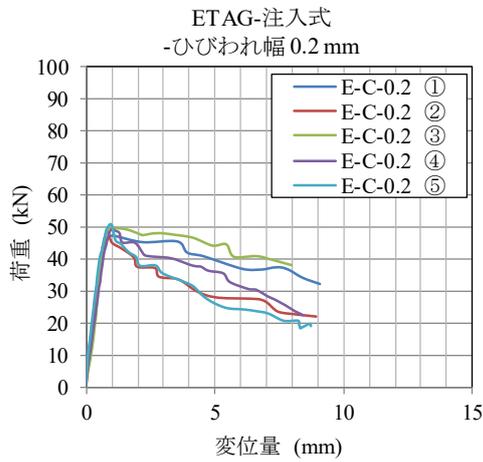
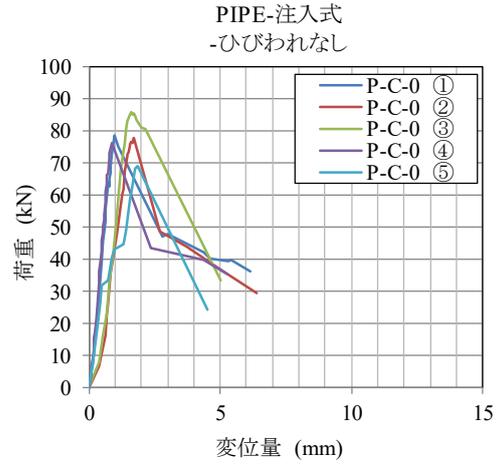
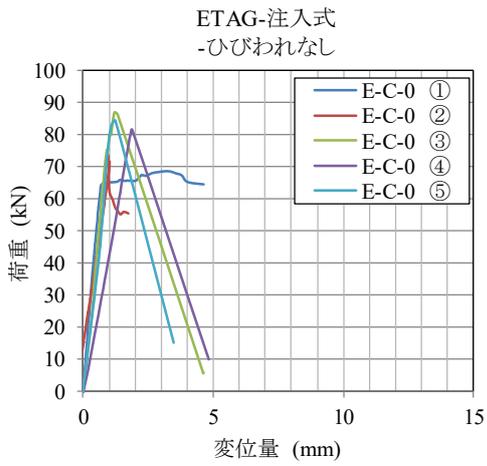


図-2.29 ひび割れ条件別荷重変位曲線
(ETAG 式)接着系注入式

図-2.30 ひび割れ条件別荷重変位曲線
(PIPE 式)接着系注入式

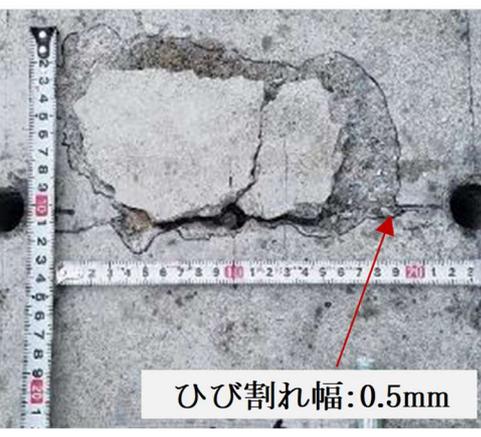
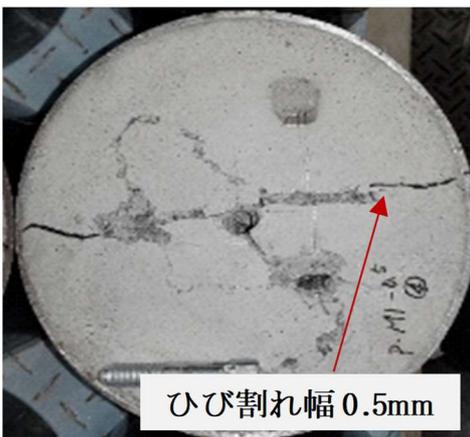
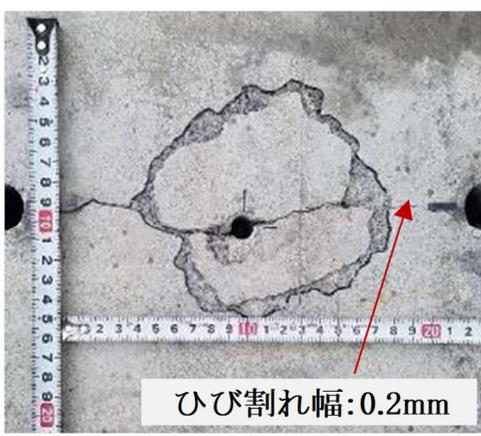


図-2.31 金属系芯棒打込式の破壊状況
(ETAG 式)

図-2.32 金属系芯棒打込式の破壊状況
(PIPE 式)

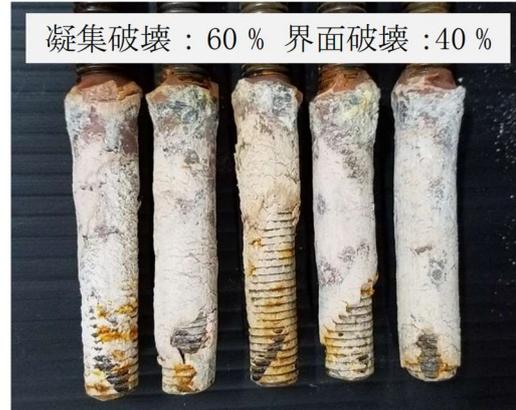


図-2.33 注入式の破壊状況(ETAG 式)

図-2.34 注入式の破壊状況(PIPE 式)

上:ひび割れなし, 中:ひび割れ幅 0.2mm, 下:ひび割れ幅 0.5mm

図-2.31 と図-2.32 に ETAG 式と PIPE 式それぞれの金属系芯棒打込み式アンカーと接着系注入式アンカーの引抜き試験後の破壊状況を示す。また、図-2.33 と図-2.34 に ETAG 式と PIPE 式それぞれの接着系注入式の樹脂の付着破壊の状況をひび割れ条件別に示す。

付着破壊の種類は、コンクリート壁面と樹脂の界面での破壊(界面破壊)と、樹脂とボルトの界面の破壊(凝集破壊)の 2 種類があり、ひび割れがない場合は、その両方の破壊が複合的に発生し凝集破壊が 60~70%界面破壊が 30~40%となり、ひび割れ幅が 0.2mm の場合は、凝集破壊が 15%、界面破壊が 85%、ひび割れ幅が 0.5mm の場合は、界面破壊 100%であった。

図-2.35 に接着系注入式アンカーの付着破壊を示す。コンクリートのひび割れにより、コンクリート孔内の壁面とあと施工アンカーの樹脂の界面が離れることにより、付着力が低下し、コンクリートと樹脂の界面の破壊が顕著となることが確認された。ETAG 式と PIPE 式を比較しても同様の傾向が確認されたことが確認された。

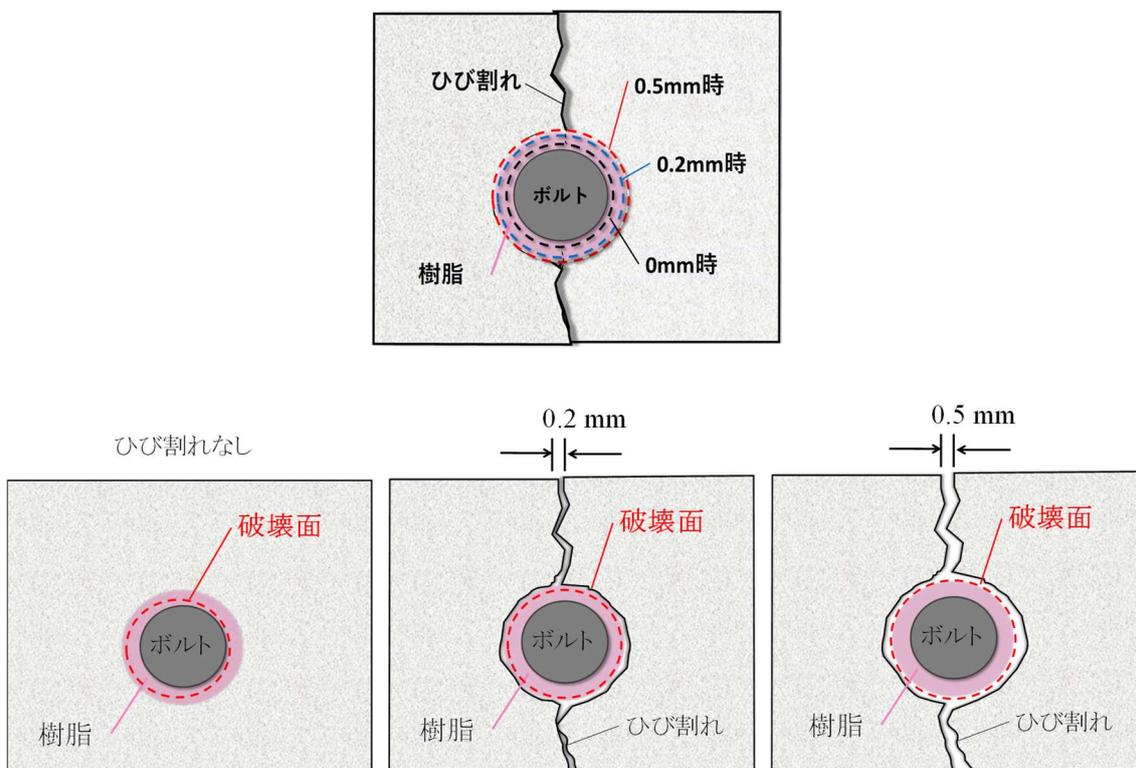


図-2.35 接着系注入式の付着破壊

2.7 既往のデータとの検証

図-2.36 に Eligehausen ら【2.7】による接着系アンカー、金属系打込式アンカー、金属系ウエッジ式アンカーのひび割れ幅と耐力比との関係に、今回の試験結果を重ねて示した。

本実験で得られた ETAG 式および PIPE 式の結果は、あと施工アンカーの種類によらず既往の実験データの範囲内にあり、本実験の範囲内(アンカー径、コンクリート強度)では、PIPE 式の試験結果の妥当性が示された。

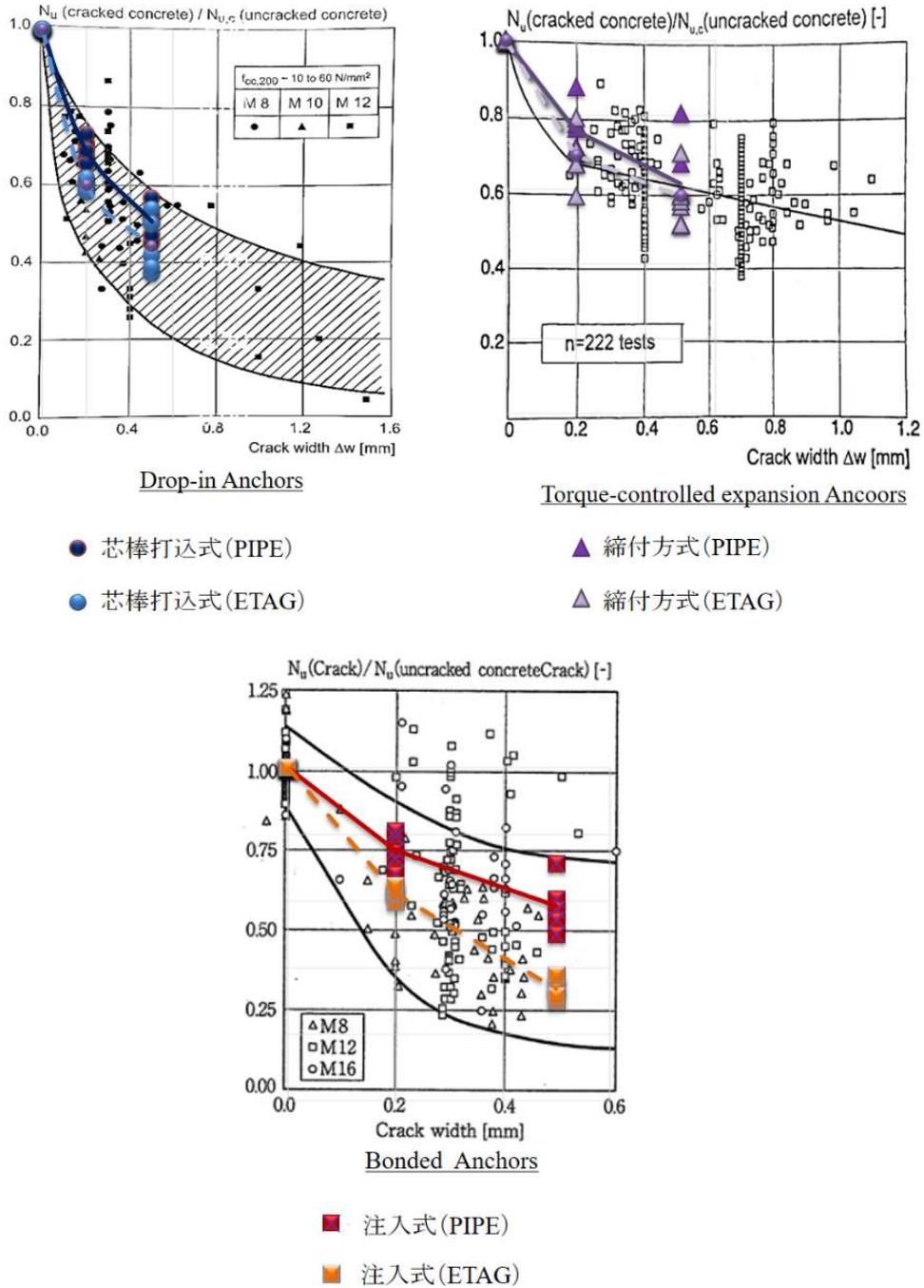


図-2.36 ひび割れ幅の影響【2.7】

2.8 第2章のまとめ

あと施工アンカーのひび割れの影響試験の小型化と簡易試験方法(PIPE 式)を ETAG 式と比較し、試験方法と適用範囲の妥当性について検討し、以下の結論を得た。

- (1)金属系アンカーに関しては、PIPE 式の結果と ETAG 式の結果は、引抜き耐力および破壊モードもほぼ同じであり、PIPE 式の簡易試験法として妥当性が確認された。
- (2)接着系アンカーに関しては、ひび割れ幅調整時の拘束力が付着力にわずかに影響を与え、破壊モードは同様であるにも関わらず、引抜き耐力が ETAG 式の結果に比べてやや高い傾向にあった。しかしながら、いずれのあと施工アンカーの結果も既往の文献のデータのばらつきの範囲内にあり、ひび割れの影響を評価できる可能性が示された。

今後の課題としては、接着系アンカーを PIPE 式で評価する場合、ひび割れ幅が大きい場合に鋼管の拘束力の影響がやや顕著となることに注意する必要がある。また本研究では、アンカーサイズ M12 を中心に検討を行ったため、土木分野で使用される太径のアンカーに対する適用性およびデータの蓄積が必要である。

第 2 章の参考文献

- 【2.1】 石原力也, 国枝稔, 高橋宗臣: コンクリートのひび割れがあと施工アンカーの力学性能に与える影響評価のための試験方法の開発と実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.1723-1728, 2017
- 【2.2】 日本建築学会, 各種合成構造設計指針 2010(一社) 日本建築学会, 2010
- 【2.3】 土木学会: コンクリートライブラリー141「コンクリートのあと施工アンカー工法的设计・施工指針(案)」, 2016
- 【2.4】 EOTA: ETAG001 Guideline For European Technical Approval Of METAL ANCHORS FOR USE IN CONCRETE Annex A: DETAILS OF TESTS, 2013
- 【2.5】 ACI : Qualification of Post-Installed Mechanical Anchors in Concrete (ACI 355.2-07), 2011
- 【2.6】 ACI : Qualification of Post-Installed Adhesive Anchors in Concrete (ACI 355.4-11), 2011
- 【2.7】 Rolf Eligehausen, Rainer Mallee, John F Silva: Anchorage in Concrete Construction, 2006

第3章

ひび割れ注入補修があと施工アンカーの 引抜き耐力に与える影響

3.1 実験目的

施工後のあと施工アンカーの安全性は、固着位置でのコンクリート強度、および、その周辺におけるひび割れや脆弱部等の変状に依存する。そのため、設計・施工段階においては、母材コンクリートは、ひび割れや豆板がなく、健全な状態であることを事前調査にて確認しなければならないとされている。しかし、施工段階で健全なコンクリートであっても、供用後の各種作用によってひび割れが生じる場合もあり、あと施工アンカーを安全に使用するには、適切な維持管理が求められている。

例えば、母材コンクリートのひび割れに関しては、**図-3.1** に示すようにあと施工アンカー近傍に発生したコンクリートのひび割れが耐荷力に与える影響が実験的に検討され、その知見が集まりつつある。一方で、母材コンクリートに発生したひび割れを補修した後における、あと施工アンカー力学的性能に関する知見は少なく、関係する指針や要領には、具体的な記載がない。そこで本研究では、母材コンクリートのひび割れにエポキシ樹脂を用いて注入補修した試験体を作製し、ひび割れ注入補修があと施工アンカーの力学的性能に与える影響を実験的に検討した。

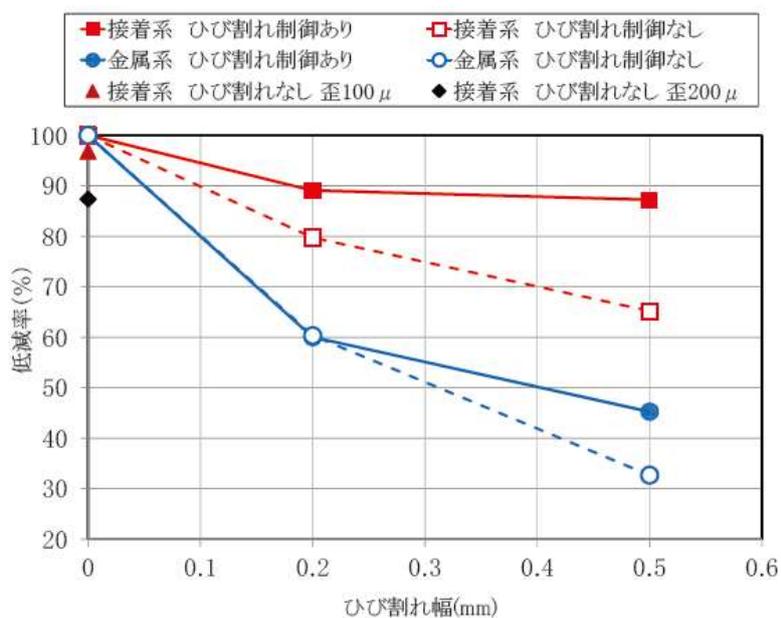


図-3.1 ひび割れ幅と最大荷重の低減率【3.1】

3.2 実験概要

3.2.1 試験体の概要

実験に用いたあと施工アンカー材料を表-3.1に示す。サイズはM12とし、アンカーの種類は、金属系アンカーと接着系アンカーの各1種類とした。金属系アンカーは、拡張タイプの締付け方式ウエッジ式アンカー(穿孔径 φ12.0 mm, 埋込長 75 mm), 接着系アンカーは、有機系のエポキシ系注入方式カートリッジ型アンカー(穿孔径 φ14.0 mm, 埋込長 84 mm)および全ネジボルト M12 (SNB7)を用いた。図-3.2に鋼管コンクリートに金属系, 接着系アンカーそれぞれを施工した試験体の形状寸法を示す。鋼管コンクリートは、PIPE 式の試験と同形状の鋼管(一般構造用鋼管, 鋼管厚 4.5mm)の中にコンクリートを打設し作製した。鋼管の外径は、金属系アンカーおよび、接着系アンカーの埋込長の2倍以上となる216mmとし、高さは150mmとした。試験体は、各パラメータにつき5体作製した。表-3.2に実験に用いたコンクリートの配合を示す。試験時のコンクリートの圧縮強度は34.2N/mm²であった。

表-3.3に実験に使用したひび割れ注入材の仕様を示す。ひび割れ補修用の注入材には、深さ150mmまで浸透させる必要があるため、強度の高い硬質形の土木補修用エポキシ樹脂注入材I種の製品を選定した。

表-3.1 アンカー材料の詳細

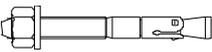
分類	形式	略図	サイズ	穿孔径 (mm)	埋込長 (mm)	材質	引張強度
金属系 (拡張)	ウエッジ式 (締付方式)		M12	φ12.0	75	炭素鋼	700 N/mm ²
接着系	注入方式 カートリッ ジ型(有機系)		M12 (ボルト)	φ14.0	84	SNB7	860 N/mm ²

表-3.2 コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
		水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
54.5	46.9	161	296	856	1004	1.78

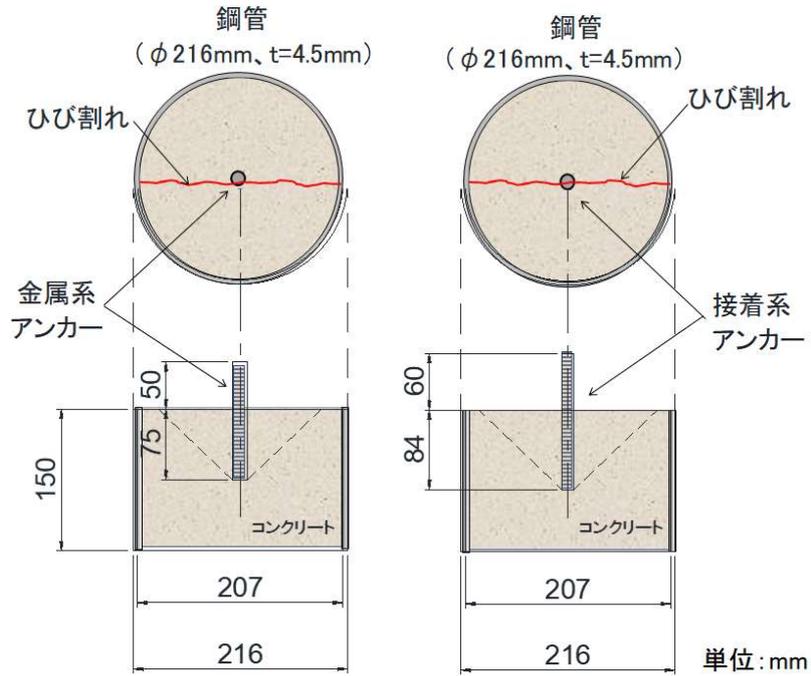


図-3.2 試験体形状

表-3.3 注入材の性状

項目		内容
主成分	主剤	エポキシ樹脂
	硬化剤	脂環式ポリアミン
混合比		主剤：硬化剤=3:1 (質量比)
混合粘度		100±50mPa・s (20°C)
可使時間		40±10分 (20°C, 500g)
圧縮降伏強さ		45.0 以上 (N/mm ²)
曲げ強さ		40.0 以上 (N/mm ²)
引張強さ		75 以上 (N/mm ²)
引張せん断付着強さ		10.0 以上 (N/mm ²)

3.3 実験パラメータ

表-3.4 に実験パラメータを示す。補修の対象としたひび割れ幅は、表-3.5 に示す「コンクリートのひび割れ調査、補修・補強指針」【3.2】が設定しているひび割れ幅を元に設定した。

この指針では、耐久性と防水性の2つの視点から、補修を必要とするひび割れ幅と、必要としないひび割れ幅を設定しており、防水性からみた場合は、ひび割れ幅0.2mm以上を補修の対象とし0.05mm以下は補修を必要としていない。耐久性から見た場合は、厳しい環境でも0.1mmのひび割れ幅は補修の対象とならず、ゆるやかな環境の場合はひび割れ幅0.3mmでも補修を必要としないとされている。この範囲と、あと施工アンカーの引抜き性能に影響があるひび割れ幅として、本実験では、0.1mmと0.3mmの2種類を設定した。

表-3.4 実験パラメータ

ひび割れ注入 補修	アンカー 種別	ひび割れ幅 (mm)	N数 (本)
補修無し	金属系	なし	5
		0.1	5
		0.3	5
	接着系	なし	5
		0.1	5
		0.3	5
補修あり	金属系	0.1	5
		0.3	5
	接着系	0.1	5
		0.3	5

表-3.5 耐久性または防水性からみた補修の要否に関するひび割れ幅の限度【3.2】

区分		耐久性(主として鋼材のさびの発生条件)からみた場合			防水性からみた場合	
		きびしい	中間	ゆるやか	—	
(A)	補修を必要とするひび割れ幅(mm)	大	0.4以上	0.4以上	0.6以上	0.2以上
	中	0.4以上	0.6以上	0.8以上	0.2以上	
	小	0.6以上	0.8以上	1.0以上	0.2以上	
このA-B間が補修要否不明の部分						
(B)	補修を必要としないひび割れ幅(mm)	大	0.1以下	0.2以下	0.2以上	0.05以下
	中	0.1以下	0.2以下	0.3以下	0.05以下	
	小	0.2以下	0.3以下	0.3以下	0.05以下	

3.4 実験方法

図-3.6 に本実験の試験フロー図を示す。図-3.7 に示す様に、鋼管コンクリート供試体のコンクリート強度確認後に、型枠面の中心位置に、金属系および接着系の試験体アンカーを施工した。その後、図-3.8 に示すようにアムスラー式圧縮試験機により割裂ひび割れを導入および幅の保持を行った。ひび割れ幅の管理値は、0.1mm では0.1~0.2mmとし、0.3mm では0.3~0.4mmと設定した。計測方法は、図-3.9 に示す様にクラックゲージを用いてあと施工アンカーの両側を各1点計測した。除荷後もひび割れ幅を保持させるために、コンクリートビス(φ4.0mm, 全長 45mm)をひび割れ部分に打ち込んだ。

注入補修有りの試験体は、ひび割れ導入後、図-3.10 に示す様に事前にコンクリート表面にシーリング材にて囲いを施し、注入材を所定の混合比にて主剤と硬化剤を混合し、図-3.11 に示す様にシーリング材の囲いの中に溜め注入した。その後注入材を2週間(14日間)養生した。硬化後、シーリング材およびコンクリート表面の注入材を取り除く為に図-3.12 に示すように研掃した。

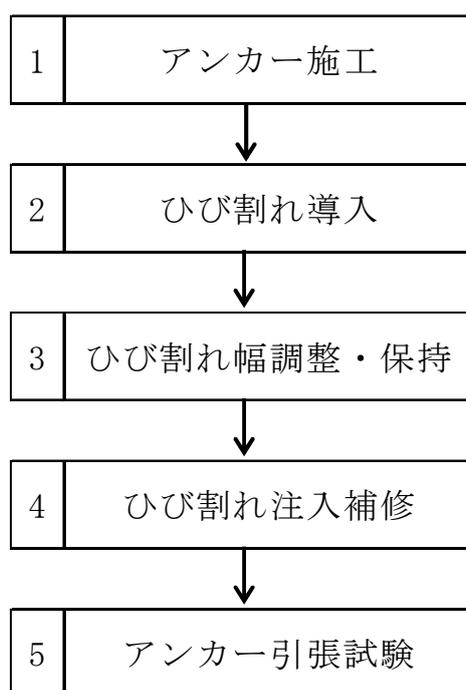


図-3.6 試験フロー図



図-3.7 試験体アンカー施工後（左:金属系, 右:接着系）



図-3.8 ひび割れ導入および保持状況（PIPE 式）



図-3.9 ひび割れ幅計測状況（PIPE 式）



図-3.10 補修部シール状況



図-3.11 補修材注入状況



図-3.12 補修材硬化完了



図-3.13 表面研掃完了

あと施工アンカー引抜き試験を図-3.14に示す。金属系および接着系共に内径φ190mmの反力用鋼板を用いて非拘束試験とした。上部に容量300kNのセンターホールジャッキおよび容量200kNのロードセルを配置して引抜き力を測定し、アンカーの変位はストローク25mm、精度1/500mmの高感度変位計を用いてあと施工アンカー先端位置の拔出し変位を測定した。測定項目は、荷重、変位量、破壊モードに加え、樹脂の充填状況を目視やファイバースコープを用いて確認した。

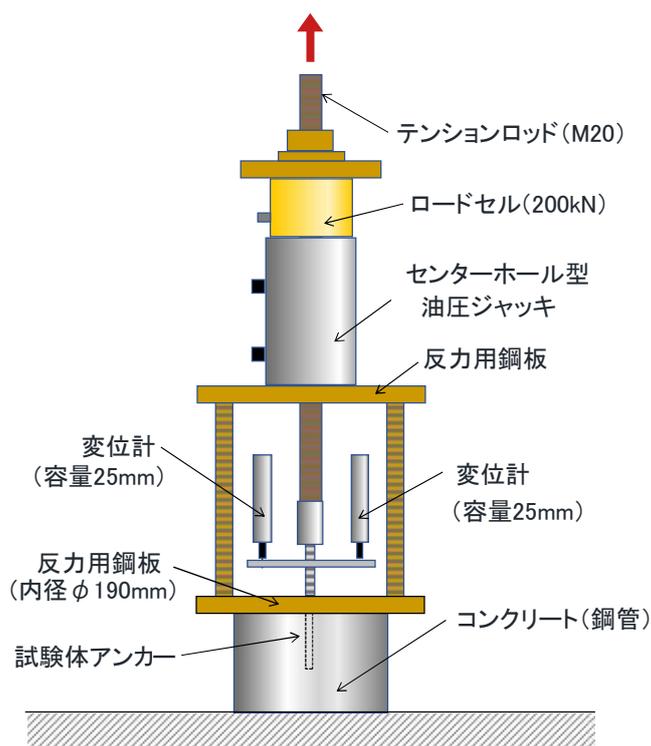


図-3.14 アンカー引抜き試験装置

3.5 実験結果

3.5.1 ひび割れ幅の影響

表-3.6 図-3.15 および図-3.16 に、注入補修の有無およびあと施工アンカー種別とひび割れ幅別の最大荷重値とその平均値、破壊モード、標準偏差、変動係数およびひび割れなし(グラフ中では幅 0mm と示す)の最大荷重の平均値を基準とした場合の引抜き耐力残存率(%)を示す。注入補修をしない場合の最大引抜き荷重の残存率は、金属系アンカーの場合、ひび割れ幅が 0.1mm の場合で 84.5%，ひび割れ幅が 0.3mm の場合で 71.7%となった。

破壊モードに関しては、金属系アンカーでは、ひび割れなしの 1 本がコンクリートコーン状破壊、その他はアンカー抜け破壊で、ひび割れありでは、全てアンカー抜け破壊となった。接着系アンカーでは、ひび割れなしおよびひび割れあり全てでアンカー抜け破壊(付着破壊)とコンクリートコーン状破壊が共に起きる複合破壊となった。コーン状破壊は、ひび割れ有りにおいては、ひび割れ部分でコーンが分割され破壊した。ひび割れ幅が 0.1mm では、2 分割したコーン状破壊となり、ひび割れ幅 0.3mm では同様に 2~3 分割したものの他に半円形だけのコーン状破壊が 2 体あった。アンカー抜け破壊時の付着破壊の界面は、コンクリートと樹脂の界面と樹脂とボルトの界面の 2 か所がある。ひび割れがない場合は、その両方の破壊が複合的に発生しており、ひび割れがある場合は、コンクリートと樹脂の界面の破壊が顕著となった。

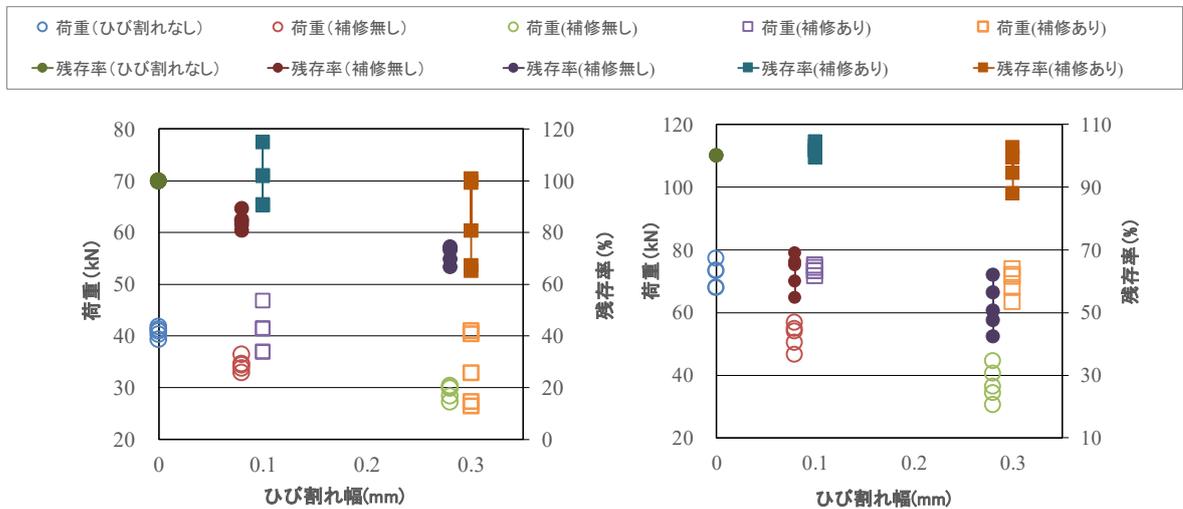


図-3.15 金属系ウエッジ式アンカーの最大荷重及び残存率

図-3.16 接着系注入式アンカーの最大荷重及び残存率

表-3.6 試験結果一覧

ひび割れ 注入補修	アンカー 種別	ひび割れ幅 (mm)	試験体No.	破壊モード	最大荷重(kN)		標準偏差 (kN)	変動係数 (%)	残存率(%)	
					(kN)	平均				平均
注入補修 無し	金属系	無し	M-①	A	41.0	40.7	1.0	2.4	—	100
			M-②	C	41.8				—	
			M-③	A	41.3				—	
			M-④	A	40.3				—	
			M-⑤	A	39.3				—	
		0.1	M-1-①	A	34.4	34.4	1.3	3.8	84.4	84.5
			M-1-②	A	36.4				89.3	
			M-1-③	A	34.7				85.2	
			M-1-④	A	33.8				83.0	
			M-1-⑤	A	32.9				80.8	
		0.3	M-3-①	A	29.9	29.2	1.4	4.7	73.4	71.7
			M-3-②	A	27.2				66.8	
			M-3-③	A	30.2				74.1	
			M-3-④	A	28.4				69.7	
			M-3-⑤	A	30.4				74.6	
	接着系	無し	A-①	BC	68.0	71.9	4.0	5.6	—	100.0
			A-②	BC	73.3				—	
			A-③	BC	67.7				—	
			A-④	BC	77.2				—	
			A-⑤	BC	73.1				—	
0.1		A-1-①	BC	46.6	52.5	4.0	7.7	64.8	73.0	
		A-1-②	BC	50.3				70.0		
		A-1-③	BC	54.0				75.1		
		A-1-④	BC	54.7				76.1		
		A-1-⑤	BC	56.8				79.0		
0.3		A-3-①	BC	34.2	37.2	5.5	14.7	47.6	51.7	
		A-3-②	BC	40.5				56.4		
		A-3-③	BC	44.5				61.9		
		A-3-④	BC	36.3				50.5		
		A-3-⑤	BC	30.4				42.3		
注入補修 有り	金属系	0.1	R-M-1-①	A	41.6	40.8	4.1	10.0	102.1	100.0
			R-M-1-②	BC	46.8				114.9	
			R-M-1-③	A	36.9				90.6	
			R-M-1-④	BC	37.0				90.8	
			R-M-1-⑤	BC	41.5				101.9	
		0.3	R-M-3-①	BC	27.4	33.7	6.9	20.6	67.3	82.8
			R-M-3-②	BC	26.6				65.3	
			R-M-3-③	BC	41.1				100.9	
			R-M-3-④	BC	33.0				80.9	
			R-M-3-⑤	BC	40.5				99.5	
	接着系	0.1	R-A-1-①	BC	73.1	73.4	1.3	1.8	101.7	102.1
			R-A-1-②	BC	75.0				104.4	
			R-A-1-③	BC	73.1				101.7	
			R-A-1-④	BC	71.5				99.5	
			R-A-1-⑤	BC	74.1				103.1	
0.3	R-A-3-①	BC	72.0	69.7	4.2	6.0	100.2	96.9		
	R-A-3-②	BC	67.8				94.4			
	R-A-3-③	BC	73.8				102.7			
	R-A-3-④	BC	71.4				99.4			
	R-A-3-⑤	BC	63.3				88.1			

A:アンカー抜け B:付着破壊 C:コーン破壊

3.5.2 注入補修された金属系アンカーの破壊性状

図-3.17 に金属系ウエッジ式アンカーのひび割れがない場合のコーン状破壊と孔底のひび割れ状況、図-3.18 にひび割れ注入補修した場合のコーン状破壊と孔底の注入材状況、図-3.19 に注入材の付着状況を示す。金属系ウエッジ式アンカーは、拡張部がコンクリートに固着している構造であるが、注入材がコンクリート表面から 20～30mm の範囲であと施工アンカー本体に付着し、コンクリートと間に付着力が発生し引抜き力が伝達されることで、コーン状破壊が発生したと考えられる。図-3.17 のひび割れがない場合のコーン状破壊の形状と比較すると拡張部は抜け破壊でその上部の位置で付着によるコーン破壊が起きていることが分かる。また、図-3.18 で示す様に、孔底まで注入材が充填されていることから、拡張部周辺にも注入材が充填されていることが確認できる。

図-3.20, 図-3.21, 図-3.22 に金属系ウエッジ式アンカーの荷重-変位曲線を示す。ひび割れ注入補修した場合は、ひび割れ注入補修しない場合と比べて、注入材による付着力にはばらつきがあるものの、最大荷重が増大し、その時の変位量が 1～2mm と非常に小さく、接着系アンカーの荷重-変位曲線に似ていることが確認できる。



図-3.17 ひび割れがない場合のコーン状破壊と孔底の状況(金属系)

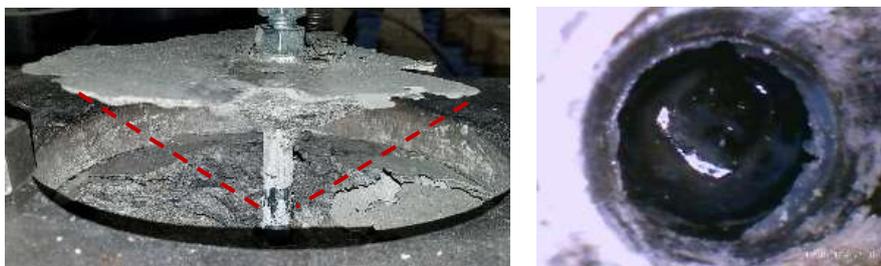


図-3.18 補修後のコーン状破壊と孔底の状況(金属系)



図-3.19 ひび割れ注入材の付着状況(金属系)

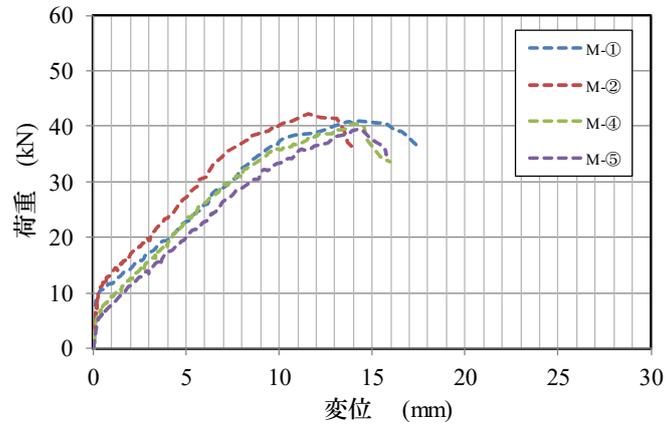


図-3.20 荷重-変位曲線（金属系ウエッジ式-ひび割れなし）

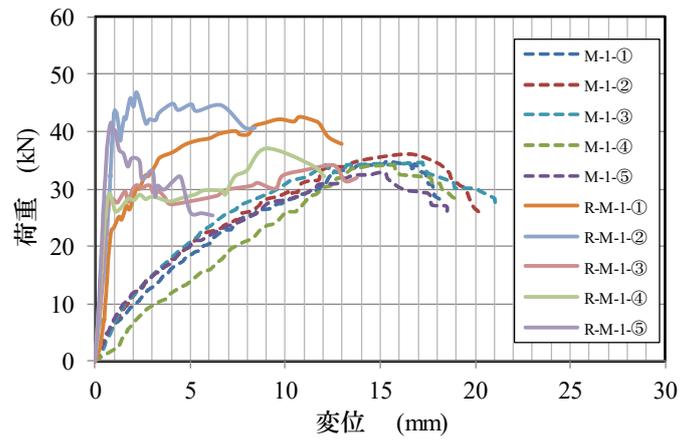


図-3.21 荷重-変位曲線（金属系ウエッジ式-ひび割れ幅0.1mm）

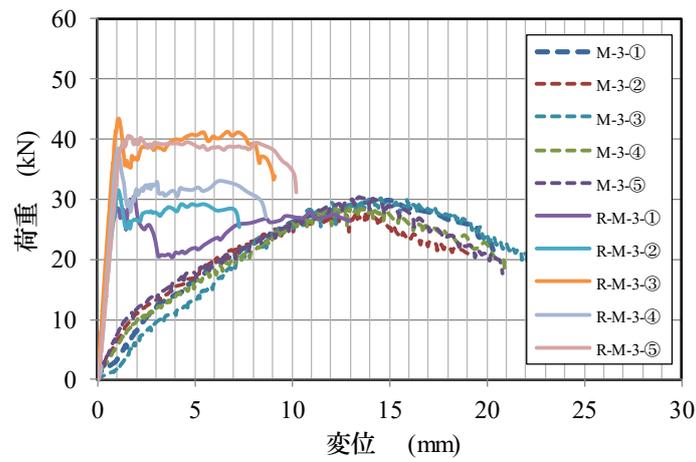


図-3.22 荷重-変位曲線（金属系ウエッジ式-ひび割れ幅0.3mm）

3.5.3 注入補修された接着系アンカーの破壊性状

図-3.23 に接着系注入式アンカーのひび割れ幅 0.3mm の 2 分割のコーン状破壊状況, 図-3.24 にひび割れ注入補修後のコーン状破壊と孔底の注入材状況, 図-3.25 に注入材の付着状況を示す。接着系注入式アンカーは, すべてコーン状破壊が生じた。また, ひび割れ注入材は, 導入したひび割れのコーン状破壊の範囲でコンクリートを繋ぎ, ひび割れない場合と同等の応力伝達を可能にしたと確認できる。

図-3.25 に示す様に孔底まで注入材が充填されていることから, 接着系注入式アンカーの樹脂とコンクリートとの界面に発生したひび割れに注入材が十分充填されていることが確認できる。

図-3.26, 図-3.27, 図-3.28 に接着系注入式アンカーの荷重-変位曲線を示す。ひび割れ注入補修した場合は, ばらつきが大きいものの最大荷重がひび割れなしと同程度まで回復していることが確認できる。残存率は, 0.1mm で 102.1%, 0.3mm で 96.9%となった。付着破壊の界面は, 注入補修なしと同様の樹脂とコンクリートとの界面での破壊となった。



図-3.23 ひび割れ幅 0.3mm のコーン状破壊 (接着系注入式)



図-3.24 ひび割れ注入補修後のコーン状破壊と孔底の状況 (接着系注入式)



図-3.25 ひび割れ注入材の付着状況 (接着系注入式)

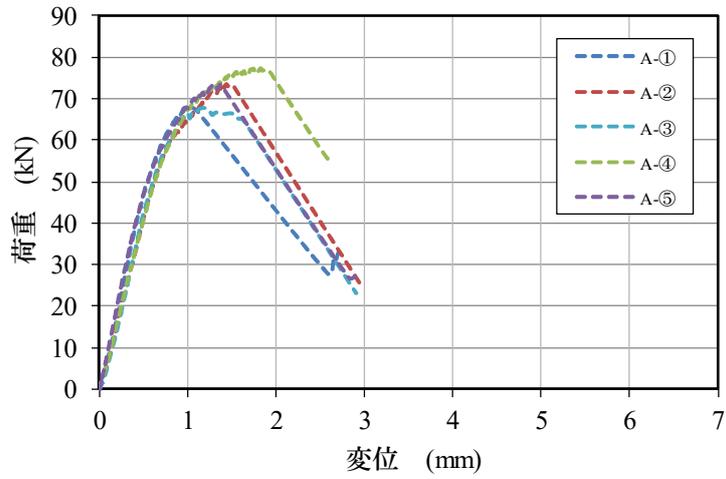


図-3.26 荷重-変位曲線（接着系注入式-ひび割れなし）

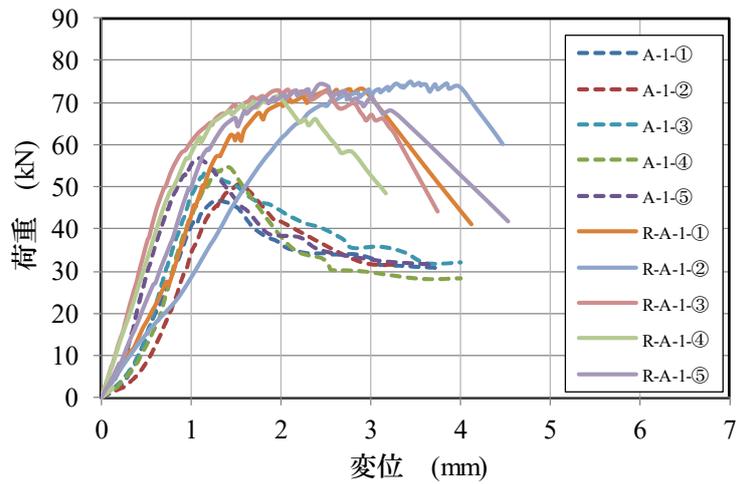


図-3.27 荷重-変位曲線（接着系注入式-ひび割れ幅 0.1mm）

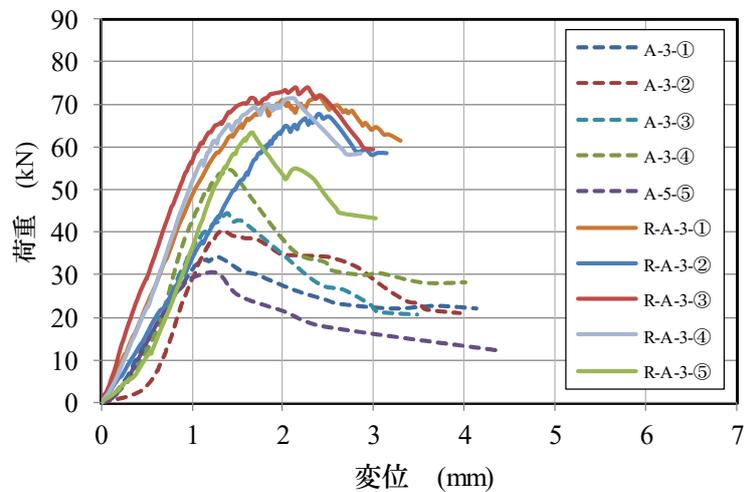


図-3.28 荷重-変位曲線（接着系注入式-ひび割れ幅 0.3mm）

3.6 第3章のまとめ

あと施工アンカー近傍のひび割れに対してエポキシ樹脂を主剤とするひび割れ注入材を用いて補修し、引抜き試験を実施した結果、以下の知見を得た。

- (1) アンカー種類やひび割れ幅の違いによらず、ひび割れ発生により発生したコンクリートとアンカー間の空隙に注入材が充填することで、アンカーの引抜き耐力が向上する傾向が確認された。
- (2) 金属系アンカーの破壊モードは、注入補修によって拡張部以外での樹脂による付着が形成され、金属系アンカーおよび接着系アンカーの複合的な破壊モードとなった。
- (3) 接着系アンカーの破壊モードは、ひび割れにより分割されるコンクリートが樹脂により接着し、ひび割れのない場合と同様となることが確認された。

今後の課題としては、補修材料の物性値の違いや、注入方法の違いがあと施工アンカーの性能に及ぼす影響についてデータの蓄積が必要である。

第3章の参考文献

- 【3.1】 石原力也，国枝稔，高橋宗臣：コンクリートのひび割れがあと施工アンカーの力学性能に与える影響評価のための試験方法の開発と実験的研究，日本コンクリート工学会，あと施工アンカーの耐久性評価と設計方法の高度化に関するシンポジウム論文集，pp.175-182，2016

- 【3.2】 日本コンクリート工学会：コンクリートのひび割れ調査，補修・補強指針2013.

第4章

ひび割れを考慮したあと施工アンカーの 引抜き耐力式の提案と検証

4.1 はじめに

第2章において、コンクリートにひび割れが発生した場合の、あと施工アンカーの引抜き耐力は、ひび割れにより金属系アンカーおよび接着系アンカーの固着機能が低下することで、ひび割れ幅が大きくなるにつれて低下することが確認された。コンクリートのひび割れ幅が構造物として有害ではなく補修を必要としないひび割れであっても、あと施工アンカーの固着部分の深さまで発生した場合は、引抜き耐力はじめ耐久性に影響を及ぼす。

そして、第3章では、ひび割れ部分に注入補修材が十分に充填され硬化することで、引抜き耐力は回復する傾向も一部確認されたものの、あと施工アンカーの固着部分への十分な充填方法とその確認方法は確立されていない。

土木学会発行の「コンクリートライブラリー141 コンクリートのあと施工アンカー工法の設計・施工指針(案)」【4.1】の標準編第5章維持管理には、あと施工アンカー部およびその周辺部の母材コンクリートにひび割れが確認された場合について以下の様に記載されている。

「あと施工アンカー部およびその周辺部の母材コンクリートにひび割れが確認された場合は、少なからずあと施工アンカー部の性能に影響を及ぼす。ひび割れに補修材を注入したとしても、終局時に発生するひび割れが補修材を繋ぎ、ひび割れが存在しない場合と同様のコーン状破壊面が形成されるとは限らない。

これは、補修材とひび割れ界面での付着破壊が起こる可能性が考えられることによる。それゆえ、供用時に何らかの理由でひび割れが発生した場合には、ひび割れの影響を考慮して、設計時のあと施工アンカー部の耐力を再評価する必要がある【4.1】。」

また、供用中のあと施工アンカーは、様々な使用状況や固定状況により、交換や移設が容易には出来ない。

以上の理由から、コンクリートにひび割れが発生した後のあと施工アンカーの力学的性能を設計時に考慮し、リダンダンシーも含めた安全性の高いあと施工アンカーの設計方法が必要である。

そこで、本章では、これまでの実験データを用いて、ひび割れの影響を明確にし、コンクリートに発生するひび割れの影響を考慮した引き抜き耐力式を提案する。

4.2 ひび割れを考慮したあと施工アンカー設計の流れ

あと施工アンカーの施工時期と、コンクリートのひび割れ発生時期に対応したあと施工アンカー設計の流れを考えると、次のような2つの流れが考えられる。

(1) あと施工アンカー新設時

一つ目は、あと施工アンカー新設時で、コンクリート構造物の設計段階や、新設コンクリートや供用中の既設コンクリートにあと施工アンカーを施工（新設）する場合である。

図-4.1 にあと施工アンカー新設時にひび割れの影響を考慮した設計の流れを示す。あと施工アンカーを施工する箇所、すなわちコンクリート部位が、後々ひび割れが発生するか発生しないかを想定し、設計式を使い分ける。ひび割れが発生しない場合には、既存の耐力式を用いてアンカーの引抜き耐力を算定する。

ひび割れの発生を想定する場合には、2章で提案した PIPE 式ひび割れ試験方法によって、付着強度および、ひび割れ低減係数および、ひび割れの影響のばらつき（あと施工アンカーとしては安定性）を評価し、耐力式にこの低減係数を用いて引抜き耐力を算出する。

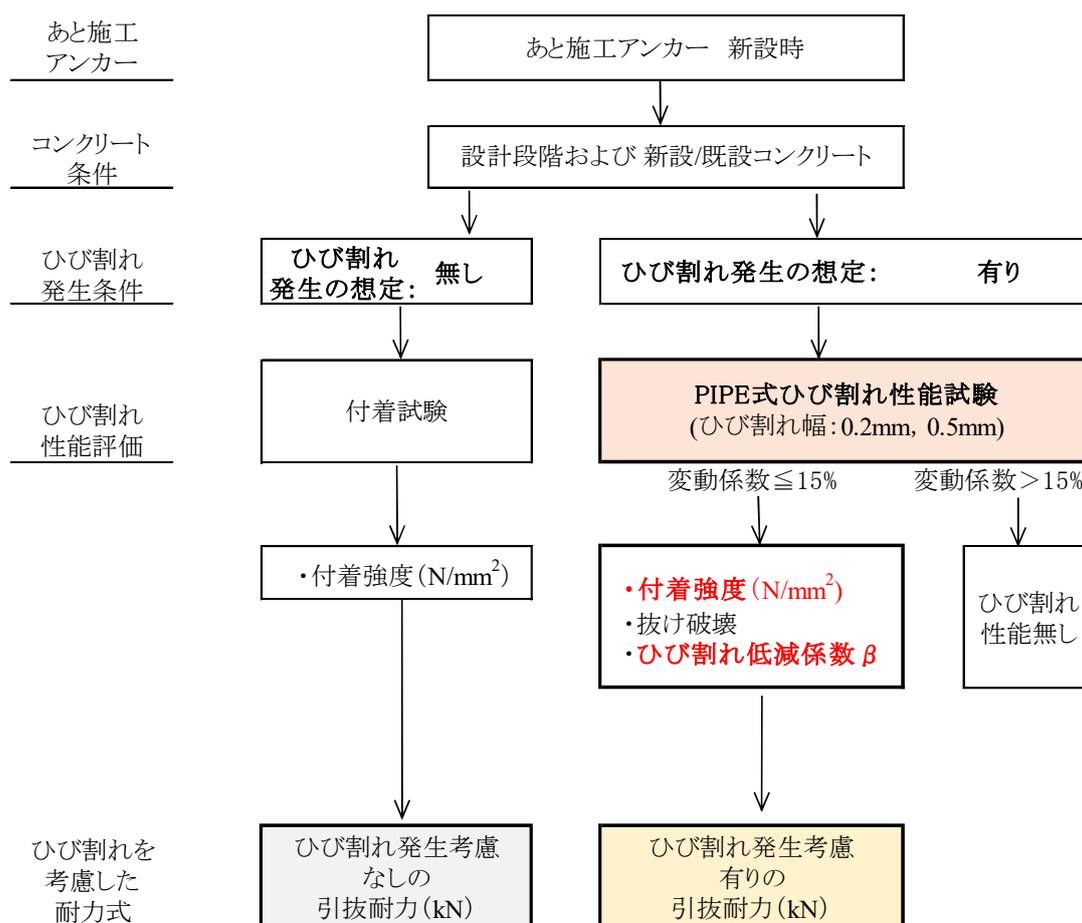


図-4.1 あと施工アンカー新設時のひび割れの発生を考慮した設計の流れ

(2)あと施工アンカー供用時(点検時)

二つ目は、あと施工アンカー供用時で、コンクリートに施工後、数年から数十年間などあと施工アンカーが使用されているいわゆる供用期間中のことであり、加えて、維持管理における点検時における段階である。図-4.2 にあと施工アンカー供用時(点検時)におけるひび割れ考慮した設計の流れを示す。既設のコンクリートに施工され使用されているあと施工アンカーの周辺のコンクリートにひび割れが発生した場合、またそれを点検により発見した場合、条件によって設計耐力式を使い分ける。

ひび割れ発生が無い場合は、検討や再評価の必要はない。ひび割れ発生がある場合、それはさらに注入補修有り無しに対応に分かれる。注入補修無しの場合、PIPE 式のひび割れ性能試験を実施し、安定性と付着強度、そしてひび割れ低減係数を評価し、これらを用いて設計式にて引抜き耐力を算出する。注入補修有りの場合は、PIPE 式のひび割れ試験を、補修したコンクリートに施工されたアンカーを対象に実施する。

しかしながら、コンクリートのひび割れには、進行性があるひび割れがあるので、一度注入補修した後のひび割れの再発性はこの限りではない。また、ひび割れへの十分な注入方法とその確認方法は確立されていないのも課題の一つである。

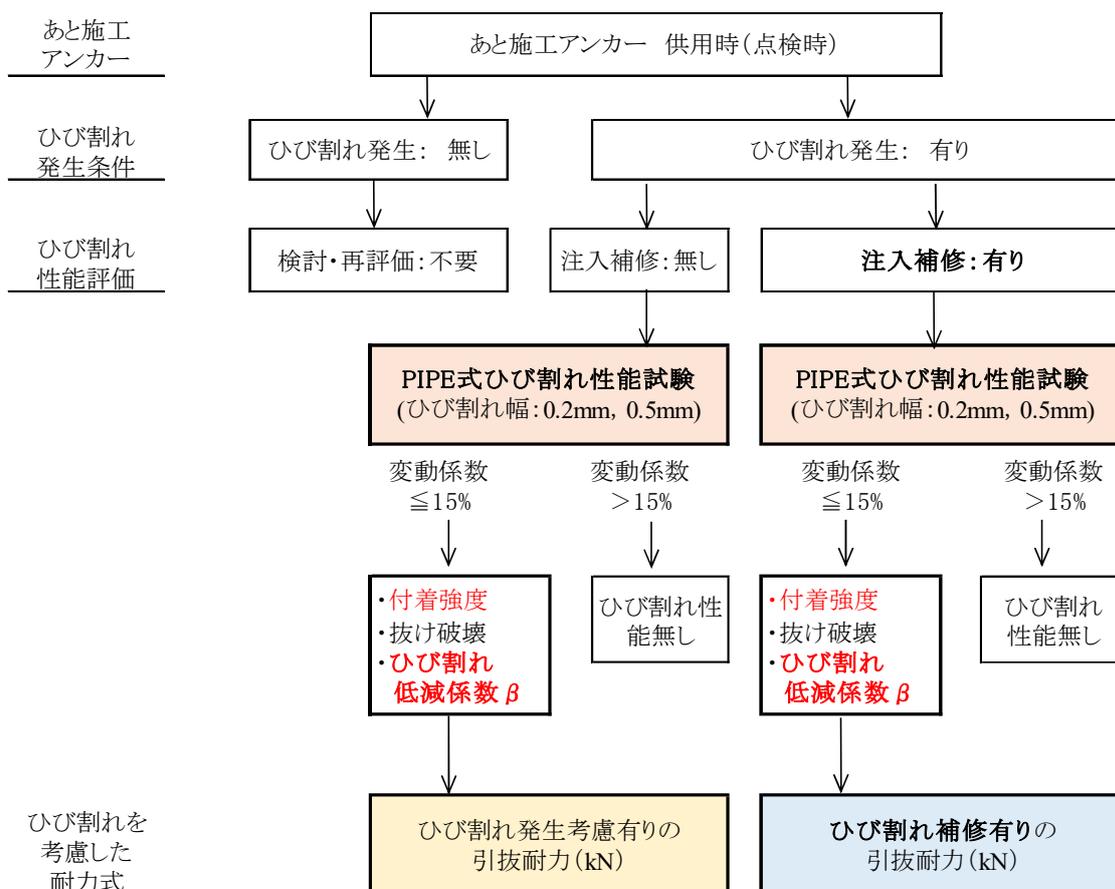


図-4.2 あと施工アンカー供用時のひび割れの発生を考慮した設計の流れ

4.3 コンクリートのひび割れを考慮したアンカーの評価と設計(金属系)

第2章の実験で使用したあと施工アンカー製品を用いて、土木学会式【4.1】とETAG【4.2】とACI【4.3】の設計耐力を比較する。金属系アンカーは3種類、接着系アンカーは1種類とした。

4.3.1 金属系アンカーの設計比較条件と製品特性値

表-4.1 に比較した金属系アンカーを示す。表-4.2 に土木学会式で用いた安全係数と付着強度を示す。ETAG と ACI で設計する際には、製品評価書から必要な特性値が必要であり、表-4.3 にETA 認証書【4.4】、表-4.4 には ACI 認証書【4.5】からの特性値の抜粋を示す。これらの特性値は、1.1(6)で述べた第三機関で実施された性能評価試験の試験結果により評価された値である。ただし、芯棒打込式アンカーは、海外認証製品ではないので一部参考値として採用した。抜け破壊においては、性能試験によって破壊モードが抜け破壊しない場合には「発生せず」と記載されている。

表-4.1 設計比較に用いた金属系アンカー

あと施工アンカー種類	芯棒打込式 アンカー	ウェッジ式 (締付方式) アンカー	拡底式 アンカー
サイズ	M12	M12	M12
材料引張強度 (N/mm ²)	400	700	800
材料降伏強度 (N/mm ²)	235	560	640
有効断面積 (mm ²)	84.3	84.3	84.3
本体直径 Da (mm)	12.7	12.0	19.0
埋込深さ (mm)	60	65	125

表-4.2 土木学会式に用いた安全係数【4.1】

使用期間係数	短期	K_t	1.0
材料係数	鋼材破壊	γ_b	1.1
材料係数	コンクリートコーン状破壊	γ_b	1.6
材料係数	付着破壊	γ_b	1.6
設計付着強度 (N/mm ²)		τ_{ad}	10

表-4.3 ETAG 式に用いた金属系の基準耐力と各種係数（評価書 ETA-11/0374 より引用）【4.4】

鋼材破壊 Steel failure	基準耐力 Characteristic resistance (kN)	$N_{Rk,S}$	41.4	
	部分安全係数 Partical safety factor	$\gamma_{M,S}$	1.4	
引き抜け破壊 Pullout failure	基準耐力（ひび割れ想定無し）（kN） Characteristic resistance in non-cracked concrete C20/25	$N_{Rk,p}$	発生せず	
	基準耐力（ひび割れ想定有り）（kN） Characteristic resistance in non-cracked concrete C20/25	$N_{Rk,p}$	発生せず	
	コンクリート強度係数	C30/37	ψ_c	1.22
		C40/50		1.41
		C50/60		1.55
部分安全係数 Partical safety factor	$\gamma_{M,p}$	1.0		
コーン破壊 Concrete cone failure	影響係数（ひび割れ想定有り） Factor for Cracked	k_{Cr}	7.2 (拡底式 8.3)	
	影響係数（ひび割れ想定無し） Factor for Non-Cracked	k_{uCr}	10.1 (拡底式 11.6)	
	部分安全係数 Partical safety factor	γ_{Mc}	1.5	

表-4.4 ACI 式に用いた金属系アンカーの各種係数（評価書 ESR-0917 より引用）【4.5】

あと施工アンカー分類 Anchor category		1
引抜きに対する低減係数 Strength reduction factor for tension, steel failure modes	ϕ	0.75
引抜きに対する低減係数 Strength reduction factor for tension, Concrete failure modes	ϕ	0.55
ひび割れ影響係数（ひび割れ想定有り） Effective factor for uncracked concrete	k_{ucr}	24
ひび割れ影響係数（ひび割れ想定有り） Effective factor for cracked concrete	k_{cr}	17 (拡底式 24)

4.3.2 金属系アンカーの設計耐力の比較の結果

表-4.5 に金属系アンカーの設計引抜き耐力比較の結果一覧を示す。下段には、第 2 章のひび割れの影響試験 PIPE 式の各アンカーの最大耐力の平均値と 95%信頼値を示した。土木学会式は、コンクリートのひび割れを考慮した設計式でない為、計算不可と表記している。

また、表-4.6 に土木学会式【4.1】、表-4.7 に ETAG 式【4.2】、表-4.8 に ACI 式【4.3】の金属系の計算内容を示す。

表-4.5 金属系アンカー設計引抜き耐力比較結果一覧表

アンカー種類			芯棒打込式			ウェッジ式 (縮付方式)			拡底式		
安全係数 考慮	破壊 モード	ひび割れ 想定	土木 学会	ETAG	ACI	土木 学会	ETAG	ACI	土木 学会	ETAG	ACI
係数なし	鋼材破壊 耐力		19.8	33.7	33.7	47.2	59.0	59.0	54.0	67.4	67.4
	コンクリート コーン状破 壊耐力	なし	24.8	29.8	27.3	28.5	33.6	30.8	102.5	102.8	82.1
		あり 幅 0.3mm	計算 不可	21.1	19.3	計算 不可	23.9	21.8	計算 不可	73.5	82.1
係数あり	鋼材破壊 耐力		18.0	24.0	25.2	42.9	42.1	44.2	49.0	48.1	50.5
	コンクリート コーン状破 壊耐力	なし	15.5	19.8	15.0	17.8	22.4	16.9	64.0	68.5	45.1
		あり 幅 0.3mm	計算 不可	14.1	10.6	計算 不可	15.9	12.0	計算 不可	49.0	45.1
実験結果 最大荷重	なし		27.4/24.0			43.3/36.6			69.1/—		
		あり 幅 0.2mm	18.9/17.3			32.9/26.2			69.3/—		
	あり 幅 0.5mm	13.8/11.4			26.5/15.4			68.0/—			
平均値/ 95%信頼値											

金属系アンカーの設計耐力の比較の上で、金属系アンカーのコンクリートコーン破壊耐力の検討は、コンクリート母材の円錐状に破壊する先端からの角度が土木学会式は45°、ETAGとACIは35°という違いがある。

また土木学会式では一律の低減係数0.31を用いて計算されたものを終局耐力とし、材料係数1.6を用いて設計耐力としている。欧米では、ひび割れの発生を想定しない場合と想定する場合（ひび割れ幅0.3mm）に分けた設計耐力としている。

その他、金属系アンカーの設計耐力を算出する上で、ETAGとACIにおいては、あと施工アンカー自体が抜け出す破壊が存在するかを確認している。抜け出し破壊形式が存在する場合は、製品特性値は小さく、部材係数は大きく評価している。そのため外見上同じようなあと施工アンカーであっても、製造者や種類が変わると大きく設計耐力が変わる場合がある。

表-4.6 土木学会式計算内容(金属系アンカー)【4.1】

破壊モード	引抜き耐力 (係数あり)	(係数なし)
設計 鋼材破壊	$T_{yd} = K_t \cdot f_{yk} \cdot A_s / \gamma_b$	
耐力	芯棒打込式: $1.0 \cdot 235 \cdot 84.3 / 1.1 = 18.0$ (kN)	19.8 (kN)
	ウエッジ式: $1.0 \cdot 560 \cdot 84.3 / 1.1 = 42.9$ (kN)	47.2 (kN)
	拡底式: $1.0 \cdot 640 \cdot 84.3 / 1.1 = 49.0$ (kN)	54.0 (kN)
	K_t : 使用期間の係数 (短期 1.0 長期 0.5) f_{yk} : 降伏強度 (N/mm ²), A_s : 有効断面積 (mm ²) γ_b : 部材係数 (鋼材=1.1)	
設計 コンクリート	$T_{cd} = K_t \cdot 0.31 \cdot A_c \cdot \sqrt{f'_{cd}} / \gamma_b$	
コーン破壊	芯棒打込式: $1.0 \cdot 0.31 \cdot 13,696 \cdot \sqrt{34.2} / 1.6 = 15.5$ (kN)	24.8 (kN)
耐力	ウエッジ式: $1.0 \cdot 0.31 \cdot 15,715 \cdot \sqrt{34.2} / 1.6 = 17.8$ (kN)	28.5 (kN)
	拡底式: $1.0 \cdot 0.31 \cdot 56,520 \cdot \sqrt{34.2} / 1.6 = 64.0$ (kN)	102.5 (kN)
	γ_b : 部材係数 (コンクリート=1.6) A_c : 有効水平投影面積 (mm ²)= $\pi \cdot hef$ (hef+Da) 芯棒打込式: $\pi \cdot 60 \cdot (60+12.7) = 13,696$ (mm ²) ウエッジ式: $\pi \cdot 65 \cdot (65+12) = 15,715$ (mm ²) 拡底式: $\pi \cdot 125 \cdot (125+19) = 56,520$ (mm ²) D_a : アンカー本体直径 (mm) f'_{cd} : コンクリートの設計圧縮強度=34.2 (N/mm ²)	

表-4.7 ETAG 式計算内容(金属系アンカー)【4.2】

破壊モード	引抜き耐力(係数あり)	(係数なし)
設計 鋼材破壊	$N_{Rk,s} = A_s \cdot f_{uk} / \gamma_{ms}$	
耐力	芯棒打込式 : $84.3 \cdot 400 / 1.4 = 24.0$ (kN)	33.7 (kN)
	ウエッジ式 : $84.3 \cdot 700 / 1.4 = 42.1$ (kN)	59.0 (kN)
	拡底式 : $84.3 \cdot 800 / 1.4 = 48.1$ (kN)	67.4 (kN)
	A_s : 有効断面積 (mm ²), f_{uk} : 引張強度 (N/mm ²) γ_{ms} : 部分安全係数 (=1.4)	
設計 コンクリート コーン状 破壊耐力	【ひび割れ想定無し】 $N_{Rk,c} = N_{Rk,c}^0 / \gamma_{mc}$	
	芯棒打込式 : $29,761 / 1.5 / 1000 = 19.8$ (kN)	
	ウエッジ式 : $33,556 / 1.5 / 1000 = 22.4$ (kN)	
	拡底式 : $89,495 / 1.5 / 1000 = 68.5$ (kN)	
	$N_{Rk,c}^0 = 10.1 \sqrt{f_{ck,cube}} \cdot h_{ef}^{1.5}$	
	芯棒打込式 : $10.1 \cdot \sqrt{40.2} \cdot 60^{1.5} = 29,761$ (N)	29.8 (kN)
	ウエッジ式 : $10.1 \cdot \sqrt{40.2} \cdot 65^{1.5} = 33,556$ (N)	33.6 (kN)
	拡底式 : $11.6 \cdot \sqrt{40.2} \cdot 125^{1.5} = 102,786$ (N)	102.8 (kN)
	【ひび割れ想定有り】 $N_{Rk,c} = N_{Rk,c}^0 / \gamma_{mc}$	
	芯棒打込式 : $21,216 / 1.5 / 1000 = 14.1$ (kN)	
	ウエッジ式 : $23,921 / 1.5 / 1000 = 15.9$ (kN)	
	拡底式 : $63,798 / 1.5 / 1000 = 49.0$ (kN)	
	$N_{Rk,c}^0 = 7.2 \sqrt{f_{ck,cube}} \cdot h_{ef}^{1.5}$	
	芯棒打込式 : $7.2 \cdot \sqrt{40.2} \cdot 60^{1.5} = 21,216$ (N)	21.1 (kN)
	ウエッジ式 : $7.2 \cdot \sqrt{40.2} \cdot 65^{1.5} = 23,921$ (N)	23.9 (kN)
	拡底式 : $8.3 \cdot \sqrt{40.2} \cdot 125^{1.5} = 73,545$ (N)	73.5 (kN)
	$N_{Rk,c}^0$: コンクリートコーン状破壊基準耐力 $f_{ck,cube}$: コンクリート圧縮強度 = $34.2 / 0.85 = 40.2$ (N/mm ²) h_{ef} : 有効埋込長さ(mm) γ_{mc} : 部分安全係数 (=1.5)	

表-4.8 ACI 式計算内容(金属系アンカー)【4.3】

破壊モード	引抜き耐力(係数あり)	(係数なし)
設計 鋼材破壊	$N_{sa} = \varphi \cdot A_s \cdot f_{uk}$	
耐力	芯棒打込式: $0.75 \cdot 84.3 \cdot 400 / 1,000 = 25.2$ (kN)	33.7 (kN)
	ウエッジ式 : $0.75 \cdot 84.3 \cdot 700 / 1,000 = 44.2$ (kN)	59.0 (kN)
	拡底式 : $0.75 \cdot 84.3 \cdot 800 / 1,000 = 50.5$ (kN)	67.4 (kN)
	φ : 引抜きに対する低減係数=0.75 A_s : 有効断面積 (mm ²), f_{uk} : 引張強度 (N/mm ²)	
設計 コンクリート コーン破壊	【ひび割れ想定無し】 $N_{cb} = \varphi \cdot N_b$	
耐力	芯棒打込式 : $0.55 \cdot 6,128 = 3,370$ (lb) = 15.0 (kN)	
	ウエッジ式 : $0.55 \cdot 6,298 = 3,308$ (lb) = 16.9 (kN)	
	拡底式 : $0.55 \cdot 16,780 = 10,145$ (lb) = 45.1 (kN)	
	$N_b = k_{ucr} \cdot \lambda_a \sqrt{f'_c} \cdot h_{ef}^{1.5}$	
	芯棒打込式 : $24 \cdot 1 \cdot \sqrt{4,960} \cdot 2.36^{1.5} = 6,128$ (lb)	27.3 (kN)
	ウエッジ式 : $24 \cdot 1 \cdot \sqrt{4,960} \cdot 2.56^{1.5} = 6,923$ (lb)	30.8 (kN)
	拡底式 : $24 \cdot 1 \cdot \sqrt{4,960} \cdot 4.92^{1.5} = 18,446$ (lb)	82.1 (kN)
	【ひび割れ想定有り】 $N_{cb} = \varphi \cdot N_b$	
	芯棒打込式 : $0.55 \cdot 4,341 = 3,370$ (lb) = 10.6 (kN)	
	ウエッジ式 : $0.55 \cdot 4,904 = 3,808$ (lb) = 12.0 (kN)	
	拡底式 : $0.55 \cdot 18,446 = 10,145$ (lb) = 45.1 (kN)	
	$N_b = k_{cr} \cdot \lambda_a \sqrt{f'_c} \cdot h_{ef}^{1.5}$	
	芯棒打込式 : $17 \cdot 1 \cdot \sqrt{4,960} \cdot 2.36^{1.5} = 4,341$ (lb)	19.3 (kN)
	ウエッジ式 : $17 \cdot 1 \cdot \sqrt{4,960} \cdot 2.56^{1.5} = 4,904$ (lb)	21.8 (kN)
	拡底式 : $24 \cdot 1 \cdot \sqrt{4,960} \cdot 4.92^{1.5} = 18,446$ (lb)	82.1 (kN)

破壊モード	引抜き耐力(係数あり)	(係数なし)
設計 コンクリート	N_b :コンクリートコーン状破壊基準耐力(kN) k_{cr} :評価試験結果に応じた係数(※拡底式は低減無し)	
コーン状 破壊耐力	λ_a :軽量コンクリートによる低減係数(=1) f'_c :コンクリート圧縮強度 (psi) =34.2 (N/mm ²) =4,960 (psi) h_{ef} :有効埋込長さ(in) : (10mm=0.39370in) 芯棒打込み式 : 60(mm)=2.36 (in) ウェッジ式 : 65(mm)=2.56 (in)、 拡底式 : 125(mm)=4.92 (in)	

4. 4 コンクリートのひび割れを考慮したアンカーの評価と設計(接着系)

4.4.1 接着系アンカーの設計比較条件と製品特性値

表-4.9 に比較した接着系アンカーを示す. 表-4.10 に土木学会式で用いた安全係数と付着強度を示す.ETA G と ACI で設計する際には, 製品評価書から必要な特性値が必要なので, 表-4.11 に ETA 認証書, 表-4.12 には ACI 認証書からの特性値の抜粋を示す. これらの特性値は, 1.1(6) で述べた第三機関が実施の性能評価試験の試験結果により評価された値である. ただし, 芯棒打込式アンカーは, 海外認証製品ではないので一部参考値として採用した. 抜け破壊においては, 性能試験によって破壊モードが抜け破壊しない場合には「発生しない」と記載されている.

表-4.9 設計比較に用いた接着系アンカー

あと施工アンカー種類	接着系注入式アンカー
サイズ	M12
アンカーボルト材質	SNB7
材料引張強度 (N/mm ²)	860
材料降伏強度 (N/mm ²)	725
有効断面積 (mm ²)	84.3
本体直径 Da (mm)	12.7
埋込深さ (mm)	84

表-4.10 土木学会式に用いた安全係数【4.1】

使用期間係数 短期	K_t	1.0
材料係数 鋼材破壊	γ_b	1.1
材料係数 コンクリートコーン状破壊	γ_b	1.6
材料係数 付着破壊	γ_b	1.6
設計付着強度 (N/mm ²)	τ_{ad}	10

表-4.11 ETAG 式に用いた接着系の基準耐力と各種係数（評価書 ETA-16/0143 より引用）

鋼材破壊	基準耐力 Characteristic resistance (kN)		$N_{Rk,S}$	176.5
Steel failure	部分安全係数 Partical safety factor		$\gamma_{M,S}$	1.5
付着破壊及び	付着強度 (N/mm ²) (ひび割れ想定有り)	温度範囲 I (40°C/24°C)	$\tau_{Rk,cr}$	8
	Factor for Cracked			
コンクリートコーン状破壊の複合破壊	付着強度 (N/mm ²) (ひび割れ想定無し)	温度範囲 I (40°C/24°C)	$\tau_{Rk,ucr}$	15
	Factor for Cracked			
Combined pullout and concrete cone failure	影響係数 (ひび割れ想定有り)		k_{Cr}	7.2
	Factor for Cracked			
	影響係数 (ひび割れ想定無し)		k_{uCr}	10.1
	Factor for Non-Cracked			
	部分安全係数 Partical safety factor		γ_{Mc}	1.5
コンクリート強度係数	C30/37		ψ_c	1.04
	C40/50			1.07
	C50/60			1.09
	部分安全係数 Partical safety factor		$\gamma_{M,p}$	1.0

表-4.12 ACI 式に用いた接着系アンカーの各種係数(評価書 ESR-3814 01/2016 より引用)【4.6】

引抜きに対する低減係数 Strength reduction factor for tension, steel failure modes	ϕ	0.65
ひび割れ影響係数(ひび割れ想定無し) Effective factor for uncracked concrete	k_{ucr}	24
ひび割れ影響係数(ひび割れ想定有り) Effective factor for cracked concrete	k_{cr}	17
付着強度 (ひび割れ想定無し) (psi) Uncracked concrete	$\tau_{Rk,ucr}$	1960
付着強度 (ひび割れ想定有り) (psi) Cracked concrete	$\tau_{Rk,ucr}$	1240

4.4.1 接着系アンカーの設計耐力の比較の結果

表-4.13 に接着系アンカーの設計耐力比較結果一覧を示す。下段には、第 2 章のひび割れの影響試験 PIPE 式の各あと施工アンカーの最大耐力の平均値を示した。土木学会式は、コンクリートのひび割れを考慮した設計式でない為、計算不可と表記している。

また、表-4.14 に土木学会式、表-4.15 に ETAG 式、表-4.16 に ACI 式の計算内容を示す。

表-4.13 接着系アンカー設計耐力比較結果一覧表

アンカー種類				接着系注入式アンカー		
引抜き耐力設計式				土木学会	ETAG	ACI
安全係数 考慮	破壊モード	ひび割れ 想定	単位			
係数なし	鋼材破壊耐力	—	kN	61.1	72.5	72.5
	付着破壊耐力	なし	kN	40.3	47.4	42.5
		あり	kN	計算不可	25.3	26.9
	コンクリート コーン状破壊耐力	なし	kN	33.9	49.2	45.1
あり		kN	計算不可	35.1	31.9	
係数あり	鋼材破壊耐力	—	kN	55.6	48.3	54.3
	付着破壊耐力	なし	kN	25.2	47.4	27.6
		あり (幅 0.3mm)	kN	計算不可	25.5	17.5
	コンクリート コーン状破壊耐力	なし	kN	21.2	32.8	33.8
あり (幅 0.3mm)		kN	計算不可	23.4	23.9	
実験結果 最大荷重 平均値 ／95%信頼値	なし	なし	kN	77.5／65.4		
		あり (幅 0.2mm)	kN	58.5／50.1		
	あり (幅 0.5mm)	kN	45.5／32.9			

土木学会式ではコンクリートコーン状破壊耐力に与えられる低減係数 0.23 を用いて、金属系アンカーと同様に算出する。ETAG や ACI も金属系アンカーと同様にひび割れの発生を考慮して、施工安定性評価によって決まる部分安全係数で除して設計耐力とする。

また、付着破壊耐力の検討において、土木学会では接着系アンカーのアンカー筋と樹脂境界に発生する付着応力度として 10N/mm² が一律に与えられ、コンクリート圧縮強度 21N/mm² を基準とした強度係数が付着応力度に考慮される。ETAG や ACI は製品特性値の付着応力度を用いて検討している。この特性値は、施工条件、環境条件、設計条件によって違う付着応力度を用いなければならない。

表-4.14 土木学会式計算内容(接着系アンカー)【4.1】

破壊モード	引き抜き耐力(係数あり)	(係数なし)
設計 鋼材破壊	$T_{yd} = K_t \cdot T_y / \gamma_b$	
耐力	$T_{yd} = 1.0 \cdot 725 \cdot 84.3 / 1.1 = 55.6 \text{ (kN)}$	61.1 (kN)
	K_t : 使用期間の係数 (短期 1.0 長期 0.5) T_y : 降伏耐力(kN) γ_b : 部材係数 (鋼材=1.1)	
設計 付着破壊	$T_{cd} = K_t \cdot \pi \cdot D_a \cdot l_e \cdot \tau_{ad} / \gamma_b$	
耐力	$T_{cd} = 1.0 \cdot 3.14 \cdot 12 \cdot 84 \cdot 12.76 / 1.6 = 25.2 \text{ (kN)}$	40.3 (kN)
	D_a : アンカー径 (mm) = 12(mm) l_e : 有効埋込長さ(mm) = 84(mm) τ_{ad} : 設計付着応力度 = $10\sqrt{f'_{cd}/21}$ = $10\sqrt{34.2/21} = 12.76 \text{ (N/mm}^2\text{)}$ γ_b : 材料係数 (一般に 1.6)	
設計 コンクリート コーン状破 壊耐力	$T_{cd} = K_t \cdot 0.23 \cdot A_c \sqrt{f'_{cd}} / \gamma_b$	
	$T_{cd} = 1.0 \cdot 0.23 \cdot 25,320 \sqrt{34.2} / 1.6 / 1000 = 21.2 \text{ (kN)}$	33.9 (kN)
	γ_b : 部材係数 (コンクリート=1.6) A_c : 有効水平投影面積 (mm ²) = $\pi \cdot h_{ef} \cdot (h_{ef} + D_a)$ = 25,320(mm ²) D_a : アンカー本体直径 (mm) = 12(mm) f'_{cd} : 母材コンクリートの設計圧縮強度 (N/mm ²) = 34.2 (N/mm ²)	

表-4.15 ETAG 式計算内容(接着系アンカー)【4.2】

設計法	引抜き耐力(係数あり)	(係数なし)
設計 鋼材破壊	$N_{Rk,s} = A_s \cdot f_{uk} / \gamma_{ms}$	
耐力	$N_{Rk,s} = 84.3 \cdot 860 \cdot 1.5 / 1000 = 48.3 \text{ (kN)}$	72.5 (kN)
	A_s : 有効断面積 (mm ²), f_{uk} : 引張強度 (N/mm ²) γ_{ms} : 部分安全係数 (=1.5)	
設計 付着破壊	【ひび割れ想定無し】 $N_{Rk,p} = N_{Rk,p}^0 \frac{A_{p,N}}{A_{p,N}^0} \psi_{s,Np} \psi_{g,Np} \psi_{ec,Np} \psi_{re,Np} / \gamma_{mp}$ $= 47.4 \cdot 1.0 \cdot 1.0 \cdot 1.0 \cdot 1.0 / 1.0 = 47.4 \text{ (kN)}$	
耐力	$N_{Rk,p}^0 = \pi \cdot d \cdot h_{ef} \cdot \tau_{Rk,ucr} = 3.14 \cdot 12 \cdot 84 \cdot 15 = 47.4 \text{ (kN)}$	47.4 (kN)
	【ひび割れ想定有り】 $N_{Rk,p} = N_{Rk,p}^0 \frac{A_{p,N}}{A_{p,N}^0} \psi_{s,Np} \psi_{g,Np} \psi_{ec,Np} \psi_{re,Np} / \gamma_{mp}$ $= 25.3 \cdot 1.0 \cdot 1.0 \cdot 1.0 \cdot 1.0 / 1.0 = 25.5 \text{ (kN)}$	
	$N_{Rk,p}^0 = \pi \cdot d \cdot h_{ef} \cdot \tau_{Rk,cr} = 3.14 \cdot 12 \cdot 84 \cdot 8 = 25.3 \text{ (kN)}$	25.3 (kN)
	$N_{Rk,p}^0$: 付着破壊基準耐力 $A_{p,N}^0$: 実有効水平投影面積 (mm ²), $A_{p,N}$: 有効水平投影面積 (mm ²) $\psi_{s,Np}$: へりあきによる低減係数 $\psi_{re,Np}$: 鉄筋ピッチによる低減係数 $\psi_{ec,Np}$: 偏心荷重による低減係数 h_{ef} : 有効埋込長さ(mm) $\tau_{Rk,ucr}$: 評価試験によるひび割れ想定なしの付着応力度 (N/mm ²) $\tau_{Rk,cr}$: 評価試験によるひび割れ想定ありの付着応力度 (N/mm ²) γ_{mp} : 部分安全係数 (=1.0)	

設計法	引抜き耐力(係数あり)	(係数なし)
設計 コンクリート コーン状破 壊耐力	【ひび割れ想定無し】 $N_{Rk,c} = N_{Rk,c}^0 / \gamma_{mc} / 1,000$ $= 49,244 / 1.5 / 1000 = 32.8 \text{ (kN)}$	
	$N_{Rk,c}^0 = 10.1 \sqrt{f_{ck,cube}} \cdot h_{ef}^{1.5} = 10.1 \cdot \sqrt{40.2} \cdot 84^{1.5} = 49,244 \text{ (N)}$	49.2 (kN)
	【ひび割れ想定有り】 $N_{Rk,c} = N_{Rk,c}^0 / \gamma_{mc} / 1,000$ $= 35,104 / 1.5 / 1000 = 23.4 \text{ (kN)}$	
	$N_{Rk,c}^0 = 7.2 \sqrt{f_{ck,cube}} \cdot h_{ef}^{1.5} = 7.2 \cdot \sqrt{40.2} \cdot 84^{1.5} = 35,104 \text{ (N)}$	35.1 (kN)
	$N_{Rk,c}^0$: コンクリートコーン状破壊基準耐力 $f_{ck,cube}$: コンクリート圧縮強度 (N/mm ²) $= 34.2 / 0.85 = 40.2 \text{ (N/mm}^2\text{)}$ h_{ef} : 有効埋込長さ(mm) = 84 (mm) γ_{mc} : 部分安全係数 (=1.5)	

表-4.16 ACI 式計算内容(接着系アンカー) 【4.3】

設計法	引抜き耐力(係数あり)	(係数なし)
設計 鋼材破壊 耐力	$N_{sa} = \varphi \cdot A_s \cdot f_{uk}$ $= 0.75 \cdot 84.3 \cdot 860 / 1,000 = 54.3 \text{ (kN)}$	72.5 (kN)
	φ : 引抜きに対する低減係数=0.75 A_s : 有効断面積 (mm ²)=84.3(mm ²) f_{uk} : 引張強度 (N/mm ²) =860 (N/mm ²)	

設計法	引抜き耐力(係数あり)	(係数なし)
設計 付着破壊 耐力	【ひび割れ想定無し】 $N_a = \varphi \cdot \frac{A_{Na}}{A_{Nao}} \cdot \psi_{ed,Na} \cdot \psi_{cp,Na} \cdot N_{ba}$ $= 0.65 \cdot 1.0 \cdot 1.0 \cdot 1.0 \cdot 1.0 \cdot 9545 = 6,204(\text{lb}) = \underline{27.6} \text{ (kN)}$	
	$N_{ba} = \lambda_a \cdot \tau_{uc} \cdot \pi \cdot d_a \cdot h_{ef}$ $= 1.0 \cdot 1960 \cdot 3.14 \cdot 0.47 \cdot 3.3 = 9,545(\text{lb})$	42.5 (kN)
	【ひび割れ想定有り】 $N_a = \varphi \cdot \frac{A_{Na}}{A_{Nao}} \cdot \psi_{ed,Na} \cdot \psi_{cp,Na} \cdot N_{ba}$ $= 0.65 \cdot 1.0 \cdot 1.0 \cdot 1.0 \cdot 1.0 \cdot 6,039 = 3,925(\text{lb}) = \underline{17.5} \text{ (kN)}$	
	$N_{ba} = \lambda_a \cdot \tau_{cr} \cdot \pi \cdot d_a \cdot h_{ef}$ $= 1.0 \cdot 1240 \cdot 3.14 \cdot 0.47 \cdot 3.3 = 6,039(\text{lb})$	26.9 (kN)
	N_{ba} :付着破壊基準耐力(kN) A_{Nco} :実有効水平投影面積 A_{Nc} :有効水平投影面積 f'_c :コンクリート圧縮強度=4,960 (psi) $\psi_{ed,Na}$:へりあきによる低減係数 $\psi_{cp,Na}$:無筋でのへりあき低減係数 τ_{ucr} :評価試験による付着応力度 (psi) τ_{cr} :評価試験による付着応力度 (psi) h_{ef} :有効埋込長さ=3.3(in) d_a :アンカー筋呼び径=0.47(in) λ_a :軽量コンクリートによる低減係数	

設計法	引抜き耐力	
設計 コンクリート コーン状破 壊耐力	【ひび割れ想定無し】	
	$N_{cb} = \varphi \cdot N_b = 0.75 \cdot 10,133 = 7,599 \text{ (lb)} = 33.8 \text{ (kN)}$	
	$N_b = k_{ucr} \lambda_a \sqrt{f'_c} h_{ef}^{1.5}$ $= 24 \cdot 1 \cdot \sqrt{4,960} \cdot 3.3^{1.5} = 10,133 \text{ (lb)}$	45.1 (kN)
	【ひび割れ想定有り】	
	$N_{cb} = \varphi \cdot N_b = 0.75 \cdot 7,177 = 5,383 \text{ (lb)} = 23.9 \text{ (kN)}$	
	$N_b = k_{cr} \lambda_a \sqrt{f'_c} h_{ef}^{1.5}$ $= 17 \cdot 1 \cdot \sqrt{4,960} \cdot 3.3^{1.5} = 7,177 \text{ (lb)}$	31.9 (kN)
	N_b :コンクリートコーン状破壊基準耐力(kN) k_{ucr} :評価試験によるひび割れ低減係数 (ひび割れ想定なし) k_{cr} :評価試験によるひび割れ低減係数 (ひび割れ想定あり) ※括底式は低減無し λ_a :軽量コンクリートによる低減係数 f'_c :コンクリート圧縮強度 (psi) = 34.2 (N/mm ²) = 4,960 (psi) h_{ef} :有効埋込長さ(in) = 84(mm) = 3.3(in)	

4. 5 ひび割れを考慮した引抜き耐力式の提案

図-4.1 に金属系芯棒打込み式アンカーの鋼材破壊耐力，コンクリートコーン状破壊耐力，の設計引抜き耐力と第 2 章における PIPE 式ひび割れ引抜き試験の試験値の平均値および 95%信頼値を示す。ひび割れ無しのコンクリートコーン状破壊耐力は，土木学会式と ETAG 式と ACI 式の 3 つの設計式の設計耐力を上回っているが，ひび割れ幅 0.2mm の試験値は，ひび割れ幅 0.3mm の設計耐力と同等の値となり，幅 0.5mm の試験値は下回る値となることが確認できる。

図-4.2 に金属系ウエッジ式（縮付方式）アンカーの鋼材破壊耐力，コンクリートコーン状破壊耐力，の設計引抜き耐力と第 2 章における PIPE 式ひび割れ引抜き試験の試験値の平均値および 95%信頼値を示す。金属系ウエッジ式（縮付方式）は，ひび割れ無しのコンクリートコーン状破壊耐力は，3 つの設計式の設計耐力を 7~11kN 程度上回っており，ひび割れ幅 0.2mm と 0.5mm の試験値は，ひび割れ幅 0.3mm の設計耐力を上回っていることが確認できる。

図-4.3 に金属系拵底式アンカーの鋼材破壊耐力，コンクリートコーン状破壊耐力，の設計引抜き耐力と第 2 章における PIPE 式ひび割れ引抜き試験の試験値の平均値および 95%信頼値を示す。金属系拵底式アンカーは，試験値は 1 本の値であるが，ひび割れ無し，ひび割れ幅 0.2mm と 0.5mm の全て鋼材破壊であり，3 つの設計式の設計耐力と同等の値を示していることが確認できる。

図-4.4 に接着系注入式アンカーの鋼材破壊耐力，コンクリートコーン状破壊耐力，付着破壊耐力の設計引抜き耐力と第 2 章における PIPE 式ひび割れ引抜き試験の試験値の平均値および 95%信頼値を示す。接着系注入式アンカーは，引抜き試験が拘束試験より，試験値は付着破壊耐力となる。ひび割れ無しの付着破壊耐力の試験値は，3 つの設計式の設計耐力を大きく上回っており，ひび割れ幅 0.2mm と 0.5mm の付着破壊耐力の試験値も，ひび割れ幅 0.3mm の設計耐力を大きく上回っていることが確認できる。

また，3 つの設計式を比較すると，鋼材破壊耐力は，土木学会式が鋼材の降伏強度を用いて ETAG 式と ACI 式は引張強度を用いている点に違いがあり，コンクリートコーン状破壊耐力は，水平投影面積の算出方法，いわゆるコーンの形状の定義に違いがあることで，それぞれに差異が確認できる。付着破壊耐力に関しては，ETAG 式と ACI 式は，製品を性能試験により評価された付着強度を用いるが，土木学会は基本付着強度を一律に設定している為，ETAG 式や ACI 式に比べ，低い値となっていることが確認できる。

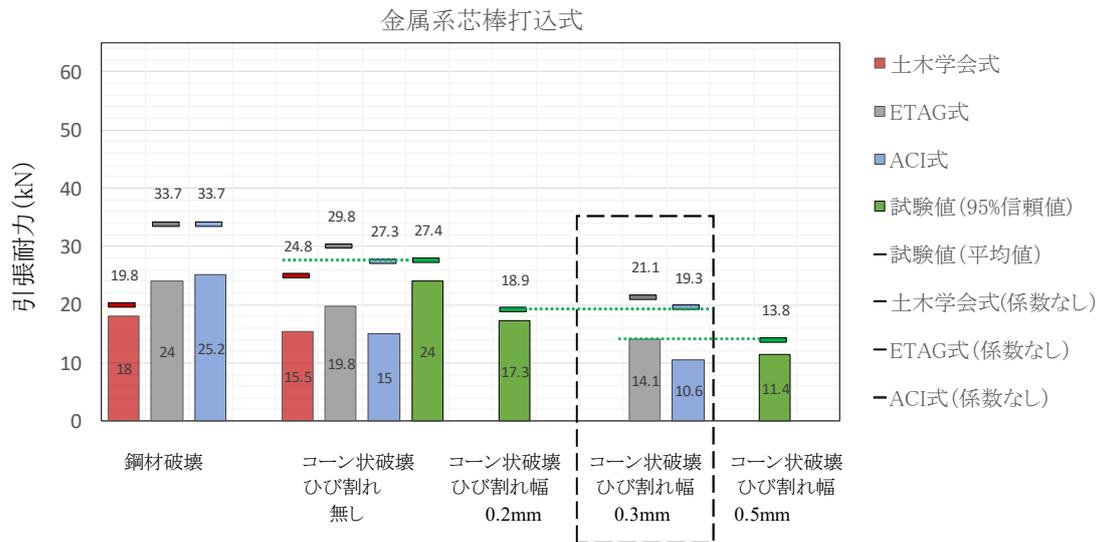


図-4.1 設計耐力および試験値(金属系芯棒打込式)

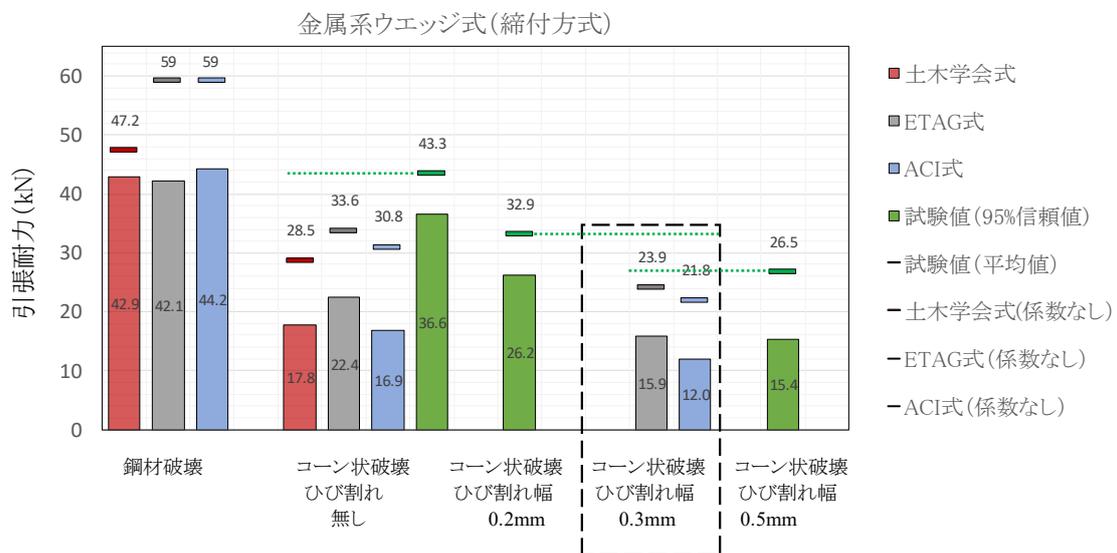


図-4.2 設計耐力および試験値(金属系ウエッジ式(締付方式))

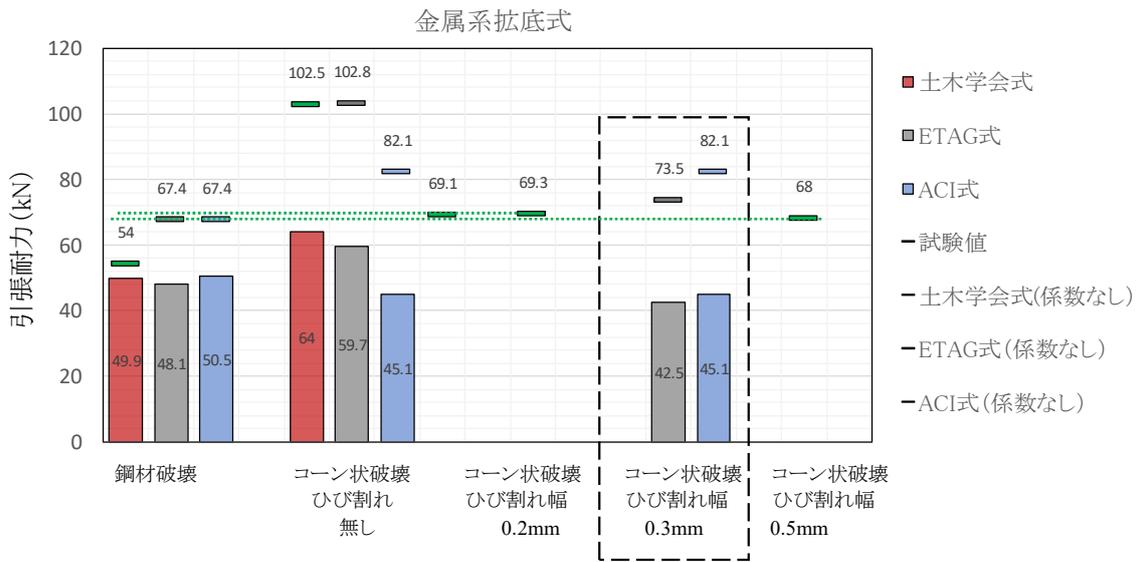


図-4.3 設計耐力および試験値(金属系拵底方式)

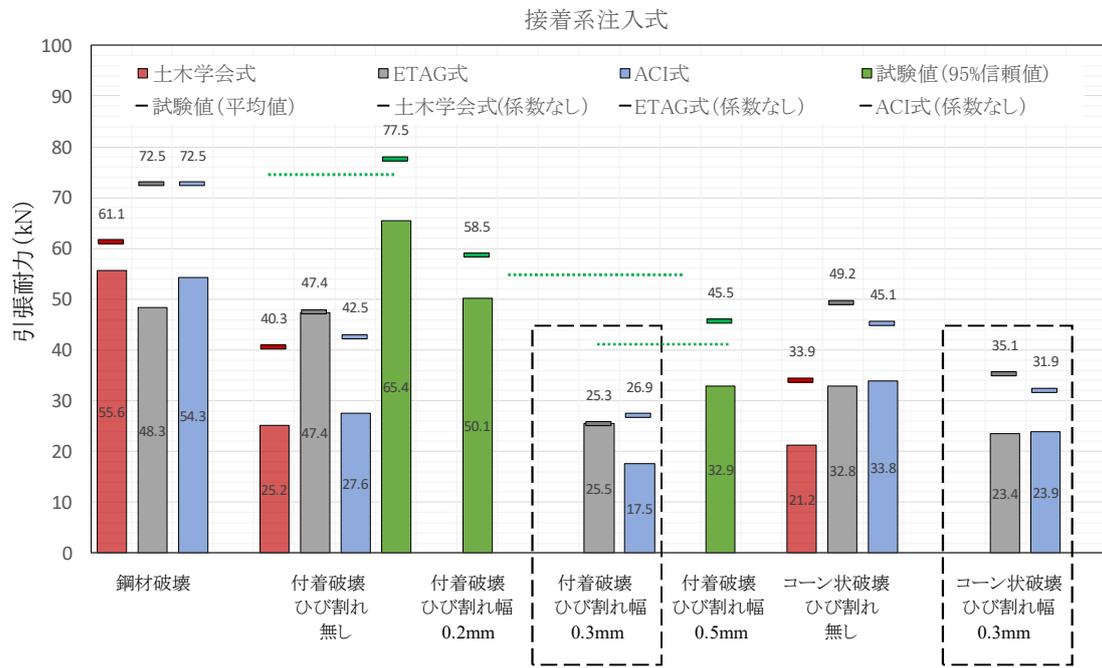


図-4.4 設計耐力および試験値(接着系注入方式)

これまでの照査より、土木学会の設計方法に実験で得られた残存率を用いて、ひび割れ幅 0.3mm における低減係数を設定し、コンクリートのひび割れを考慮した式を提案する。表-4.17 に ETAG 式と ACI 式のひび割れ想定ありの低減係数を示し、表-4.18 に PIPE 式ひび割れ性能試験による低減係数を示す。第 2 章の試験データで得られた引抜き耐力の 95%信頼値から、ひび割れ無しの引抜き耐力を基準としてひび割れ幅 0.2mm と 0.5mm における低減率を算出し、その平均値をひび割れ幅 0.3mm における低減率と設定し、コンクリートコーン状破壊耐力と付着破壊耐力のひび割れ低減係数 β_c 、 β_p とする。

また接着系注入式の付着破壊耐力については、PIPE 式のひび割れ性能試験結果の 95%信頼値を付着面積で割り設計付着強度 (N/mm^2) と設定する。

表-4.17 ETAG 式と ACI 式のひび割れ想定ありの低減係数

耐力	ひび割れ想定	ETAG 式		ACI 式	
		ウエッジ式	拡底式	ウエッジ式	拡底式
コーン状破壊耐力 影響係数	なし k_{ucr}	10.1	11.6	24	24
	あり(幅 0.3mm) k_{cr}	7.2	8.3	17	24
付着破壊耐力	なし	$\tau_{Rk,ucr}: 15 (N/mm^2)$		$\tau_{ucr}: 1960 (psi)$	
	あり(幅 0.3mm)	$\tau_{Rk,cr}: 8 (N/mm^2)$		$\tau_{cr}: 1240 (psi)$	
コーン状破壊低減率	あり(幅 0.3mm)	0.71	0.72	0.71	1.0
付着破壊低減率	あり(幅 0.3mm)	0.53		0.63	

表-4.18 PIPE 式ひび割れ性能試験による低減係数

耐力	ひび割れ想定	単位	芯棒打込式	ウエッジ式	接着系注入式
引抜き耐力 (95%信頼値)	なし	kN	24.0	36.6	65.4
	あり(幅 0.2mm)	kN	17.3	26.2	50.1
	あり(幅 0.5mm)	kN	11.4	15.4	32.9
残存率①(幅 0.2mm)	あり(幅 0.2mm)	%	0.72	0.71	0.76
残存率②(幅 0.5mm)	あり(幅 0.5mm)	%	0.47	0.42	0.50
ひび割れ低減係数 β_c (コーン状破壊耐力)	あり(幅 0.3mm)		0.60	0.57	—
ひび割れ低減係数 β_p (付着破壊耐力)	あり(幅 0.3mm)		—	—	0.63

以上を元に、土木学会式をベースにあと施工アンカーの引抜き耐力式を提案する。

【あと施工アンカーの引抜き耐力式（提案式）】

(1) 金属系アンカー

・ 鋼材破壊耐力	$T_{yd} = K_t \cdot f_{yk} \cdot A_s / \gamma_b$	(kN)
・ コンクリートコーン状破壊耐力		
ひび割れ想定無し :	$T_{cd} = K_t \cdot 0.31 \cdot A_c \cdot \sqrt{f'_{cd}} / \gamma_b$	(kN)
ひび割れ想定有り :	$T_{cd} = K_t \cdot \beta_c \cdot 0.31 \cdot A_c \cdot \sqrt{f'_{cd}} / \gamma_b$	(kN)

(2) 接着系アンカー

・ 鋼材破壊耐力	$T_{yd} = K_t \cdot f_{yk} \cdot A_s / \gamma_b$	(kN)
・ 付着破壊耐力		
ひび割れ想定無し :	$T_{cd} = K_t \cdot \pi \cdot D_a \cdot l_e \cdot \tau_{ucr} / \gamma_b$	(kN)
ひび割れ想定有り :	$T_{cd} = K_t \cdot \pi \cdot D_a \cdot l_e \cdot \beta_p \cdot \tau_{ucr} / \gamma_b$	(kN)
・ コンクリートコーン状破壊耐力		
ひび割れ想定無し :	$T_{cd} = K_t \cdot 0.23 \cdot A_c \cdot \sqrt{f'_{cd}} / \gamma_b$	(kN)
ひび割れ想定有り :	$T_{cd} = K_t \cdot \beta_p \cdot 0.23 \cdot A_c \cdot \sqrt{f'_{cd}} / \gamma_b$	(kN)

K_t : 使用期間の係数 (短期 1.0 長期 0.5) f_{yk} : 降伏強度 (N/mm²)

A_s : 有効断面積 (mm²) γ_b : 部材係数 (鋼材=1.1, コンクリート=1.6)

A_c : 有効水平投影面積 (mm²) D_a : アンカー本体直径 (mm)

f'_{cd} : コンクリートの設計圧縮強度=34.2 (N/mm²)

β_c β_p : ひび割れ低減係数 ※ PIPE 式ひび割れ性能試験の評価値

τ_{ucr} : 設計付着応力 (N/mm²) ※ PIPE 式ひび割れ性能試験の評価値

図-4.5, 図-4.6, 図-4.7 に提案式を用いて算出した引抜き耐力結果を示す。

金属系アンカーは、PIPE 式ひび割れ性能試験結果から評価するひび割れ低減係数 β_c を乗じることにより、ひび割れ幅 0.3mm におけるコーン状破壊耐力の算出が可能となった。

接着系アンカーは、土木学会式で一律に設定されている付着応力 (10N/mm²) に代わり、PIPE 式ひび割れ性能試験 (拘束試験) 結果から、ひび割れが無い条件における付着応力 (N/mm²) を評価し、ひび割れ幅 0.3mm における付着破壊耐力は、ひび割れ無い条件における付着応力 (N/mm²) にひび割れ低減係数 β_p を乗じた値を、ひび割れ幅 0.3mm における付着応力 (N/mm²) と設定することで、耐力の算定が可能となった。

コーン状破壊耐力は、金属系アンカーと同様にひび割れ低減係数 β_p を乗じることにより、ひび割れ幅 0.3mm におけるコーン状破壊耐力の算出が可能となった。

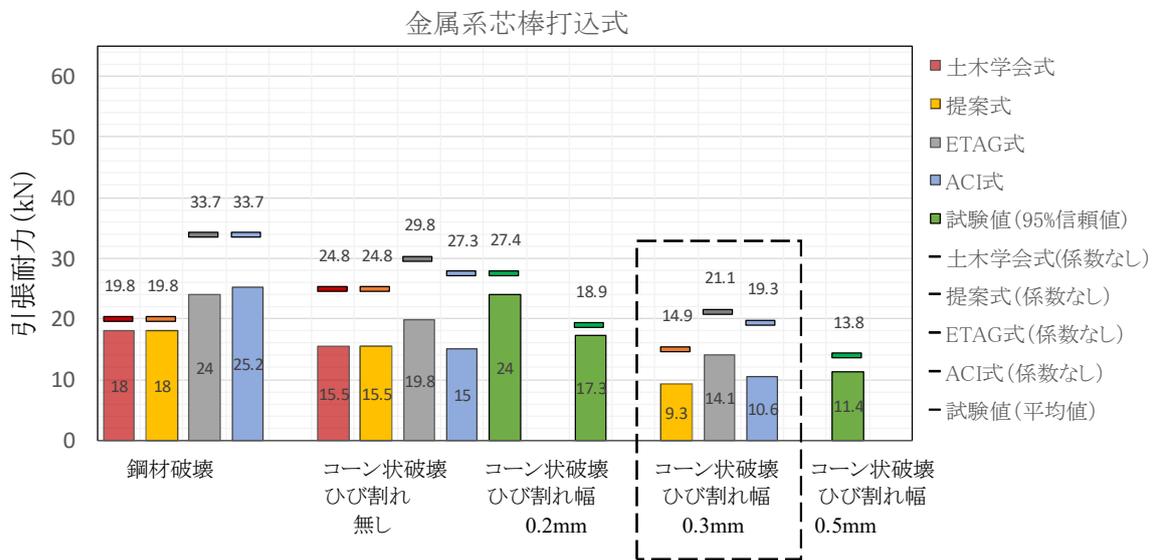


図-4.5 設計耐力および試験値(金属系芯棒打込み式)

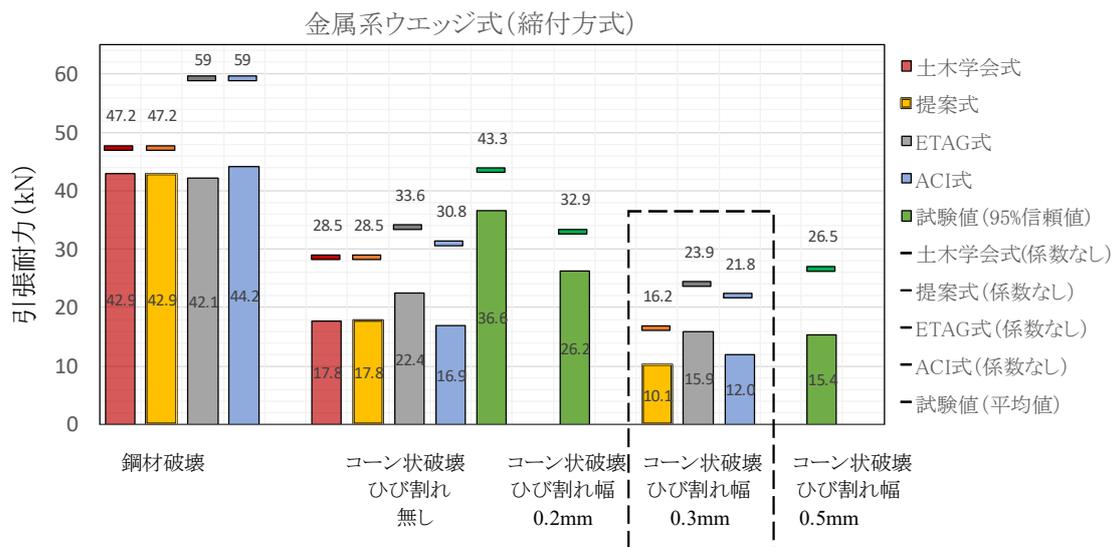


図-4.6 設計耐力および試験値(金属系ウエッジ式)

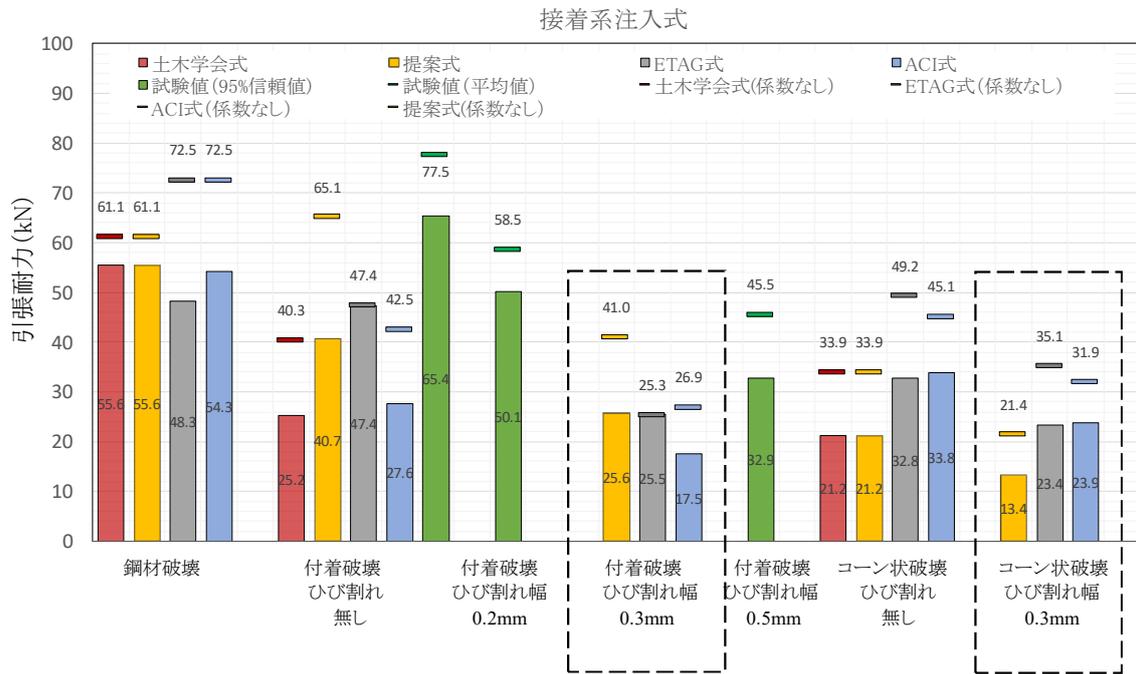


図-4.7 設計耐力および試験値(接着系注入式)

4.6 第4章のまとめ

ひび割れを有するコンクリートを用いて評価した試験結果を用いて、土木学会の耐力式に基づく評価方法を提案した。

- (1)PIPE 式ひび割れ試験方法によって、耐力への影響のばらつきと付着応力およびひび割れ低減係数を評価し、耐力式にこの低減係数を用いることでひび割れを想定した場合のあと施工アンカーの引抜き耐力の算定が可能であることを示した。
- (2)金属系アンカーのひび割れ条件下でのあと施工アンカー引き抜け破壊モードを評価し、これにより低減係数を設定しコーン破壊耐力を算定が可能であることを示した。
- (3)接着系アンカーのひび割れ条件下での付着応力の評価と、低減係数の評価が出来ることで、ひび割れを考慮した耐力算定が可能であることを示した。
- (4)あと施工アンカーの近傍に発生したコンクリートのひび割れに対して、注入補修を行う場合においても、先に提案したひび割れ性能試験にて低減係数を評価し、引抜き耐力を算出することが可能であることを示した。

今後の課題としては、本評価方法ではひび割れの影響は考慮してはいるものの、ひび割れ発生直後の状態を対象としている。コンクリートのひび割れが発生した状態に加えて、水や温度、振動などが複合的に作用した場合の評価方法の確立が期待される。

第4章の参考文献

- 【4.1】 公益社団法人土木学会 コンクリート委員会:コンクリートライブラリー141 コンクリートのあと施工アンカー工法の設計・施工指針(案), 公益社団法人土木学会, 2014年3月31日
- 【4.2】 ETAG001 GUIDELINE FOR EUROPEAN TECHNICAL APPROVAL OF METAL ANCHORS FOR USE IN CONCRETE Annex C: DESIGN METHODS FOR ANCHORAGES, European Organisation for Technical Assessment, August /2010
- 【4.3】 ACI Committee 318: ACI318-14 Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, ACI, 2014
- 【4.4】 European Technical Assessment ETA-11/0374 of 28 August 2017
- 【4.5】 ICC-ES Evaluation Report ESR-0917 05/2019
- 【4.6】 ICC-ES Evaluation Report ESR-3814 01/2016
- 【4.7】 あと施工アンカーの耐久性評価と設計方法の高度化に関するシンポジウム委員会報告書, あと施工アンカーの耐久性の評価方法の確立と設計の高度化研究委員会, 2016年6月27日

第5章

結論

本研究は、コンクリートのひび割れがあと施工アンカーの引抜き挙動への影響およびその評価方法について、一連の研究成果をまとめたものである。

コンクリートのひび割れの簡易試験方法を開発し、あと施工アンカーのひび割れに対する性能を評価するとともに、設計式を提案した。本研究によって得られた結論をおよび今後の課題について以下に列挙する。

【第2章ひび割れを有するコンクリートを対象とした引抜き試験方法の提案】では、あと施工アンカーのひび割れの影響試験の小型化と簡易試験方法(PIPE式)をETAG式と比較し、試験方法と適用範囲の妥当性について検討し、以下の結論を得た。

- (1) 金属系アンカーに関しては、PIPE式の結果とETAG式の結果は、引抜き耐力および破壊モードもほぼ同じであり、PIPE式の簡易試験法として妥当性が確認された。
- (2) 接着系アンカーに関しては、ひび割れ幅調整時の拘束力が付着力にわずかに影響を与え、破壊モードは同様であるにも関わらず、引抜き耐力がETAG式の結果に比べてやや高い傾向にあった。しかしながら、いずれのあと施工アンカーの結果も既往の文献のデータのばらつきの範囲内にあり、ひび割れの影響を評価できる可能性が示された。

今後の課題としては、接着系アンカーをPIPE式で評価する場合、ひび割れ幅が大きい場合に鋼管の拘束力の影響がやや顕著となることに注意する必要がある。また本研究では、アンカーサイズ M12 を中心に検討を行ったため、土木分野で使用される太径のアンカーに対する適用性およびデータの蓄積が必要である。

【第3章ひび割れ注入補修があと施工アンカーの引抜き耐力に与える影響】では、アンカー一近傍のひび割れに対してエポキシ樹脂を主剤とするひび割れ注入材を用いて補修し、引抜き試験を実施した結果、以下の知見を得た。

- (1) アンカー種類やひび割れ幅の違いによらず、ひび割れ発生により発生したコンクリートとアンカー間の空隙に注入材が充填することで、アンカーの引抜き耐力が向上する傾向が確認された。
- (2) 金属系アンカーの破壊モードは、注入補修によって拡張部以外での樹脂による化学付着が形成され、金属系アンカーおよび接着系アンカーの複合的な破壊モードとなった。
- (3) 接着系アンカーの破壊モードは、ひび割れにより分割されるコンクリートが樹脂により接着し、ひび割れのない場合と同様となることが確認された。

今後の課題としては、補修材料の物性値の違いや、注入方法の違いがあと施工アンカーの性能に及ぼす影響についてデータの蓄積が必要である。

【第4章ひび割れを考慮したあと施工アンカーの引抜き耐力式の提案と検証】では、ひび割れを有するコンクリートを用いて評価した試験結果を用いて、土木学会の耐力式に基づく評価方法を提案した。

- (1) PIPE 式ひび割れ試験方法によって、耐力のばらつきと付着応力およびひび割れ低減係数を評価し、耐力式にこの低減係数を用いることでひび割れを想定した場合のあと施工アンカーの引抜き耐力の算定が可能であることを示した。
- (2) 金属系アンカーのひび割れ条件下でのあと施工アンカー引き抜け破壊モードを評価し、これにより低減係数を設定しコーン状破壊耐力を算定が可能であることを示した。
- (3) 接着系アンカーのひび割れ条件下での付着応力の評価と、低減係数の評価が出来ることで、ひび割れを考慮した耐力算定が可能であることを示した。
- (4) あと施工アンカーの近傍に発生したコンクリートのひび割れに対して、注入補修を行う場合においても、先に提案したひび割れ性能試験にて低減係数を評価し、引抜き耐力を算出することが可能であることを示した。

今後の課題としては、本評価方法ではひび割れの影響は考慮してはいるものの、ひび割れ発生直後の状態を対象としている。コンクリートのひび割れが発生した状態に加えて、水や温度、振動などが複合的に作用した場合の評価方法の確立が期待される。

本論文に関連する著者の発表論文・報告

1. 本論文に関連する著者の発表論文・報告（査読あり）

- (1) 石原力也, 国枝稔, 川口潤, 高橋宗臣: コンクリートのひび割れがあと施工アンカーの力学性能に与える影響評価のための試験方法の開発, 日本材料学会 コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文集, 第15巻, 2015年
- (2) 石原力也, 国枝稔, 高橋宗臣: コンクリートのひび割れがあと施工アンカーの力学性能に与える影響評価のための試験方法の開発と実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 39, No. 1, pp.1723-1728, 2017
- (3) 高橋宗臣, 佐藤靖彦, 石原力也: 日本と欧米のあと施工アンカー設計手法の比較, コンクリート工学年次論文集, Vol. 40, No. 2, pp. 571-576, 2018年
- (4) 石原力也, 国枝稔, 荒川 遙, 高橋宗臣: ひび割れ注入補修があと施工アンカーの引抜き耐力に与える影響, 日本材料学会 コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文集, 第19巻, 2019年

2. 本論文に関連する著者の発表論文・報告（査読なし）

- (1) 石原力也, 国枝稔, 川口潤: ひび割れを導入したコンクリートに対するあと施工アンカーの耐荷力評価のための試験方法, 日本土木学会 第70回年次学術講演会, V-181, 2015年
- (2) 石原力也, 国枝稔: あと施工アンカーのコンクリートのひび割れに対する耐荷力評価のための試験方法, 日本土木学会 第71回年次学術講演会, V-652, 2016年
- (3) 石原力也, 高橋宗臣: 接着系拡張アンカーのコンクリートのひび割れに対する性能の評価, 日本土木学会 第72回年次学術講演会, V-297, 2017年
- (4) 石原力也, 国枝稔, 荒川遙, 高橋宗臣: あと施工アンカーの引抜き耐力に与えるコンクリートのひび割れの影響, 日本土木学会 第73回年次学術講演会, V-484, 2018年
- (5) 石原力也, 国枝稔, 荒川遙: ひび割れ注入補修があと施工アンカーの引抜き耐力に与える影響, 日本土木学会 第74回年次学術講演会, V-604, 2019年

3. 本論文に関連する著者の国際学会発表論文

- (1) R. Ishihara, M. Kunieda, Y. Arakawa, M. Takahashi : Testing method for evaluation of pull-out behavior of post-installed anchor in cracked concrete, IABMAS2020

謝辞

本論文は、コンクリートのひび割れがあと施工アンカーの引抜き挙動に与える影響についての研究成果を取りまとめたものであり、本研究の遂行に関して、多くの方々からの貴重なご指導、ご協力を賜りました。ここに感謝の意を表します。

岐阜大学国枝稔先生には、指導教官として浅学非才な私に本研究の遂行ならび本論文の取りまとめにあたり、懇切なるご指導を賜りました。ここに深く感謝の意を表します。岐阜大学を卒業後20年以上社会人として過ごしてきた私に、あと施工アンカーの共同研究を通じて、研究者として”世の中にとって何が重要で必要なのかを公平な視点で捉える”ための多くの示唆をいただきました。博士後期課程3年の間も、私が岐阜大学にてあと施工アンカーの実験に専念できる環境を与えていただき、そして本研究に多くのご指導とご教授をいただきました。ここに心より感謝と御礼を申し上げます。

岐阜大学内田裕市先生には、主査として論文の審査だけでなく、あと施工アンカーに対する貴重な視点や実験検討に対して丁寧なご指導と貴重なご教授を賜りました。岐阜大学小林孝一先生には副査として論文の審査だけでなく、本研究の個別の実験方法や結果の考察において適切なお指導と貴重なご教授を賜りました。両先生におきましては、日頃から大学にて温かい励ましと助言を賜り、3年間大変有意義な研究生活を送ることができました。ここに心より感謝と御礼を申し上げます。

本論文の個別の研究におきましては、岐阜大学荒川遥君には、3年間に及びあと施工アンカーの試験体の施工から試験まで多くの汗を流して苦楽を共にしていただきました。ここに厚く感謝の意を表すと同時に、今春からの社会人としてのご活躍をご祈願いたします。

筆者に岐阜大学大学院の博士後期課程での研究の機会を与えていただきました日本ヒルティ株式会社の関係者各位に厚く感謝の意を表します。下元紳志社長には、博士後期課程入学の機会を与えていただきました。ここに厚く感謝の意を表します。技術本部藤岡健介本部長には、博士後期課程の3年間の多大なるご理解とご支援をいただきました。ここに厚く感謝の意を表します。技術本部仕様認証課高橋宗臣課長には、業務と結びつく形での研究の方向性を付けていただき、日頃から研究への多大なるご指導とご支援をいただきました。ここに厚く感謝の意を表します。技術本部所属のエンジニアの皆様には、日頃から温かい支援と励ましをいただきました。ここに厚く感謝の意を表します。

最後に、単身赴任で日頃家族との時間が少ない中、博士後期課程3年間の取り組みを温かく理解し、いつも励ましてくれた妻貴子と息子大賀に心から感謝し、謝辞といたします。

令和2年3月