

論文 表層が凍害劣化したコンクリートに対する種々の接着系アンカーの付着すべり特性と耐力評価

矢野 悠佑雅*1・高瀬 裕也*2・石垣 勉*3・石田 雄太郎*4

要旨：あと施工アンカーは耐震補強や設備機器の固定等に用いられるが、表層が劣化したコンクリートに定着した際の付着性状に関する研究は極めて少ない。著者らはこれまでに、表層が凍害劣化したコンクリートに異形鉄筋による有機系アンカーの付着実験を行い、劣化程度と付着強度に相関があることを明らかにし、付着強度式を構築した。本稿では、新たに無機系接着剤や全ネジボルトのパラメータを追加し、これらの違いがあと施工アンカーの付着すべり挙動に与える影響を検証し、既報で提案した強度式で評価した。その結果、提案強度式の補正係数を調整することで実験値を精度よく評価できた。

キーワード：耐震補強、あと施工アンカー、凍害、付着すべり

1. はじめに

寒冷地の鉄筋コンクリート（以下、RC）構造物は凍害を受けることによって、建物の経年とともに、コンクリート表層から劣化が進行し、強度の低下やひび割れ、スケーリングを引き起こすおそれがある。

図-1 (a), (b) にアンカー筋の適用例を示す。RC 構造物の耐震補強では、一般に接着系あと施工アンカー¹⁾によって既存建物と補強フレームが接合される。あと施工アンカーを確実に定着させるためには既存コンクリートが健全であることが原則であるが、RC 構造物を長期的に利用するためには耐震補強や設備機器の固定など、劣化したコンクリートにアンカー筋を定着しなければならない場合もある。しかし、劣化したコンクリートに対するあと施工アンカーの定着性能に関する研究例は極めて少ない。例えば緒方ら²⁾は現場打ちフリュームの側壁で金属系アンカーの引抜実験を実施し、採取したコンクリートコアの超音波速度と最大引抜荷重に相関性があることを報告しているが、定量評価するまでには至っていない。

著者らはこれまで、三好らが提案する液体窒素を用いた劣化手法³⁾によりコンクリートを劣化させ、アンカー

筋を定着した試験体を用いて、付着実験を行った。その結果、劣化程度が大きいほど付着性能が低下することがわかった⁴⁾。さらにはこれらの定量評価を行うべく、コンクリートの劣化程度とアンカー筋の定着長さを考慮することで、付着強度式および付着すべり挙動を再現可能な力学モデルを構築してきた。本研究では、さらに接着剤種、アンカー筋種、コンクリート圧縮強度を違えた付着実験を新たに実施し、これらの違いが付着すべり特性に及ぼす影響を検証するとともに、付着強度式を用いて耐力評価することを目的とする。

2. 実験概要

2.1 試験体パラメータ

表-1 に試験体パラメータを示す。著者らはこれまで、表層を凍害劣化させたコンクリートに対し、アンカー筋径を違えたアンカー筋を定着し、劣化度合いと定着長さに着目することで、これらの付着強度の評価を行ってきた。アンカー筋の付着特性はアンカー筋形状や接着剤種、コンクリート強度により異なる挙動を示すことから、これらをパラメータとし実験を実施する。試験体名は接着剤種(Ep: 有機系, Ce: 無機系)、アンカー筋の呼び名、コンクリート圧縮強度 $f_{c,100}$ 、相対動弾性係数 DM の順で構成される。表-2 に母材コンクリートの調合を示す。コンクリートは劣化しやすいよう、AE 剤を含まないプレーンなコンクリートを用いた。Series-1 の試験体は、既報⁴⁾と同じ試験体である。接着剤は有機系、無機系ともに、注入式の接着剤を使用する。

2.2 試験体形状および試験体作成方法

図-2 に試験体の諸元寸法を示す。試験体諸元は $DM100$ の試験体ではコンクリートベッドを用い、 $DM80$,

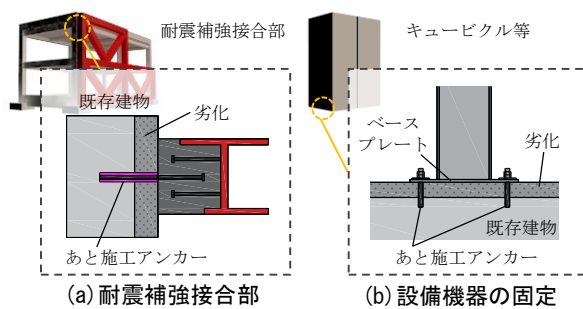


図-1 あと施工アンカーの適用例

*1 室蘭工業大学 大学院工学研究科 環境創生工学系専攻 環境建築学コース (学生会員)

*2 室蘭工業大学 大学院工学研究科 もの創造系領域 准教授 博士 (工学) (正会員)

*3 日本ヒルティ (株) マーケティング本部 製品ポートフォリオ課

*4 飛島建設 (株) 技術研究所 研究開発 G 副主任研究員 博士 (工学) (正会員)

表-1 試験体パラメータおよび材料特性

Series	アンカー筋	試験体名	d_a	ϕ	l_e	f_b	$f_{c,100}$	E_c	f_y	E_s	n	DM	
												実測値	平均値
1	異形 (SD490)	Ep-D13-24-100	13	16	$4.5d_a$	228	24.5	23.6	455	170	3	—/—/—	—
		Ep-D13-24-80									2	82.1 / 84.0	83.1
		Ep-D13-24-60									3	57.9 / 59.0 / 64.0	60.3
		Ep-D16-24-100	16	22	$4.5d_a$	228	24.5	23.6	556	197	2	—/—	—
		Ep-D16-24-80									3	79.9 / 80.9 / 83.6	81.5
		Ep-D16-24-60									3	52.4 / 57.4 / 63.8	57.9
		Ep-D19-24-100	19	24	$4.5d_a$	228	24.5	23.6	541	179	2	—/—	—
		Ep-D19-24-80									3	54.8 / 57.1 / 61.6	57.8
		Ep-D19-24-60									3	—/—/—	—
		Ep-D16-39-100	16	22	$4.5d_a$	228	39.0	26.8	568	187	3	82.7 / 80.0 / 79.0	80.6
2	全ネジ (SNB7)	Ep-D16-39-80									3	64.6 / 61.6 / 64.8	63.7
		Ep-D16-39-60									3	—/—/—	—
		Ce-D16-39-100	16	22	$4.5d_a$	44.0	39.0	26.8	568	187	3	75.0 / 84.6 / 79.7	79.8
		Ce-D16-39-80									3	60.5 / 61.4 / 60.5	60.8
		Ce-D16-39-60									3	—/—/—	—
		Ep-M16-39-100	16	22	$4.5d_a$	228	39.0	26.8	819	170	3	—/—/—	—
		Ep-M16-39-80									2	80.3 / 83.8	82.1
		Ep-M16-39-60									3	60.2 / 50.9 / 66.0	59.0

d_a : アンカー筋径(mm), ϕ : 穿孔径(mm), l_e : アンカー筋の定着長さ(mm), f_b : 接着剤の圧縮強度(N/mm²)⁵⁾,
 $f_{c,100}$: 凍結融解前の実験時のコンクリート圧縮強度(N/mm²), E_c : コンクリートのヤング係数(kN/mm²),
 f_y : アンカー筋の降伏強度(N/mm²), E_s : アンカー筋のヤング係数(kN/mm²), DM : 相対動弾性係数(%), n : 試験体数(体)
 ※ DM 実測値(%) : 表層から深さ 30mm 地点での計測値

DM60 の試験体はコンクリート表面を均一に劣化するため、コンクリートブロックを用いた。ただし、アンカー筋の引張実験時に割裂破壊する懸念があるため、コンクリートブロックを複数配置し、周囲にグラウトと鉄筋を用いて連結することで割裂破壊を防止した。

コンクリート表面の劣化は前述した通り、三好らの劣化手法を用いた³⁾。手順は、水中養生後の試験体表面に液体窒素を吹き付け、基準温度が-10℃程度になったところでお湯に浸し、5℃以上になるまで融解させる。その後、超音波試験によりコンクリートの動弾性係数 E_d を求める。最後に試験体を5分間ほど常温水に浸し、水分を供給する。以上の過程を1サイクルとし、深さ30mmのDMが目標値の±5%以内に達するまで繰り返す。 E_d (N/mm²)は次式⁶⁾より求めた。

$$E_d = 4.038V^2 - 14.438V + 20.708 \quad (1)$$

ここで、 V は超音波伝播速度(km/s)である。この値から相対動弾性係数DMを求める。

コンクリート表層を劣化後、穿孔作業を行い接着剤を注入後、アンカー筋を定着する。

2.3 載荷および測定方法

図-3(a), (b)にそれぞれ Series-1 と Series-2 の加力装

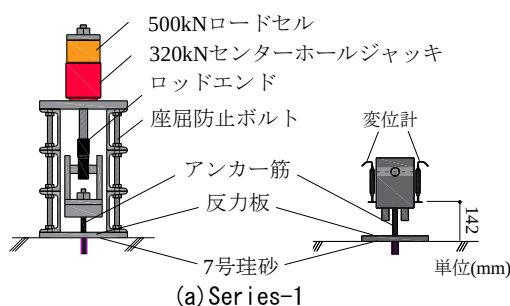


表-2 母材コンクリートの調査と受入検査結果

Series	W/C (%)	s/a (%)	単位質量(kg/m ³)				空気量 (%)
			W	C	S	G	
1	71.1	48.8	187	263	885	941	2.5
2	69.3	48.6	187	270	880	944	1.3

W:水 C:セメント S:細骨材 G:粗骨材 s/a:細骨材率

※種類はNon-AEコンクリートを使用

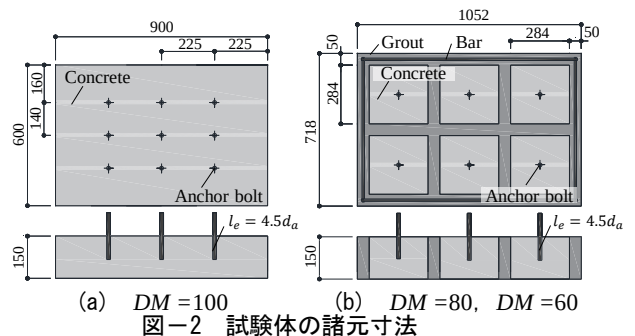


図-2 試験体の諸元寸法

置を示す。320kNのセンターホールジャッキで引張力を与え、500kNのロードセルで荷重を計測した。破壊形式が付着破壊となるように、加力装置底部に反力板(330mm×250mm×15mm、孔径: D13, D16の時25mm, D19の時30mm)を設置した。また、反力板とコンクリートの間に7号珪砂を敷き詰め、不陸による応力集中を防止する。変位の計測方法は、鉛直方向に2カ所、変位計を設置し、これらの平均値をすべり量 s (mm)とした。このすべり量

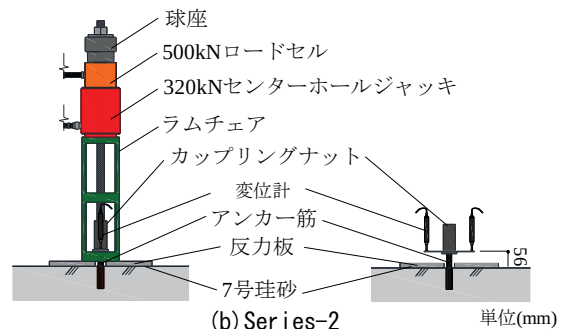


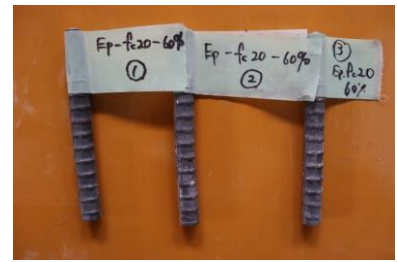
図-3 加力装置



(a) Ep-D16-39-100



(b) Ep-D16-39-80



(c) Ep-D16-39-60



(d) Ce-D16-39-100



(e) Ce-D16-39-80



(f) Ce-D16-39-60



(g) Ep-M16-39-100



(h) Ep-M16-39-80



(i) Ep-M16-39-60

写真-1 series-2 のアンカー筋引き抜き後の様子

には、コンクリート表面から変位測定位置までのアンカー筋の伸び変形が含まれるが、本論文では付着強度に焦点を当てるため、この影響は考慮しないこととする。

3. 実験結果

3.1 破壊状況

付着破壊形式は、主に鉄筋-接着剤界面と、接着剤-コンクリート界面による破壊の二つに分類され、付着の小さい界面によって破壊が決まる。写真-1 (a)~(i)に载荷後の試験体の状況として、アンカー筋引き抜き後の様子を示す。Series-1と接着剤種、アンカー筋種が同条件の同図(a)~(c)は既報⁴⁾と同様に、アンカー筋に接着剤が残存しておらず、コンクリート表面の劣化程度によらず鉄筋-接着剤界面で付着破壊した。無機系アンカーの破壊状況 (d)~(f)においても、鉄筋-接着剤界面によって付着破壊したが、節と節の間に、一部、接着剤が残存している。(g)~(i)はDM100の試験体ではアンカー筋-接着剤界面での破壊であったが、DM80、DM60ではほとんどの試験体で接着剤-コンクリート界面による破壊となった。これは、劣化によりコンクリート強度が低下したことに起因するものと考えられる。アンカー筋の下部(深部)では、劣化の影響が小さかったためか、鉄筋-接着剤界面での破壊となったものも見られた。

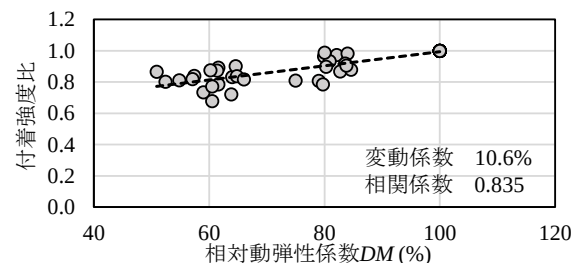


図-4 付着強度比-DM関係

3.2 付着強度および付着すべり挙動

図-4に付着強度比とDMの関係を示す。ここで、付着強度比はDM60とDM80の各試験体の τ_{bmax} をDM100の τ_{bmax} の平均値で除した値である。 τ_{bmax} は最大引張力 T_{max} をアンカー筋の定着長さ l_e までの表面積で除すことにより次式で表す。

$$\tau_{bmax} = T_{max} / (\pi d_a l_e) \quad (2)$$

同図からわかるように、変動係数が10.6%と多少のバラツキはあるものの、相関係数が0.835と、高い相関が得られた。図-5(a)~(f)より、DM100の τ_{bmax} と劣化させた試験体の τ_{bmax} を比較すると、DM80では3~17%低下し、DM60では19~23%と大きく低下した。接着剤種が異なる同図(d), (e)を比較すると無機系アンカーの方が、DM80、DM60ともに低下率が大きい、同図(b)のDM60は無機系アンカーの低下率と同程度であることから、接着剤に

よる低下率の違いは明確ではない。続いて、全ネジボルトの結果を観察する。異形鉄筋と比べると、リングテンション効果が小さくなるため、劣化の影響を受けにくい可能性も考えられたが、図-5(d)と(f)を比べると、大きな違いは確認されなかった。

図-6(a)～(i)に実験値の付着すべり挙動を示す。同図(a)，(b)のDM100とDM80の一部の試験体では最大付

着強度時変位 s_{bmax} が大きい。この要因として、 $f_{c,100}=39.0\text{N/mm}^2$ と、想定よりもかなり大きく、このために付着力が降伏強度よりも高くなり、アンカー筋が降伏した後に付着破壊が生じたと考えられる。しかしながら、同図(c)では劣化により付着力が降伏強度よりも下回ったため、純粹に付着破壊したと推察される。また、Ep-D16-39は荷重低下後に $s=11\sim13\text{mm}$ の間で応力が再上昇

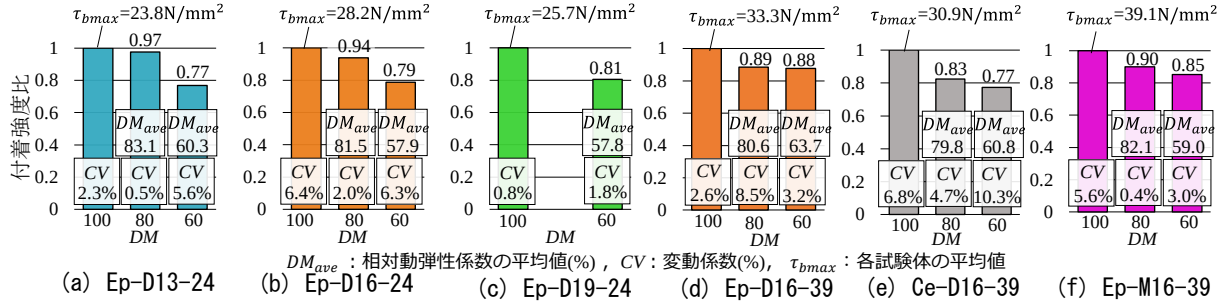


図-5 付着強度比

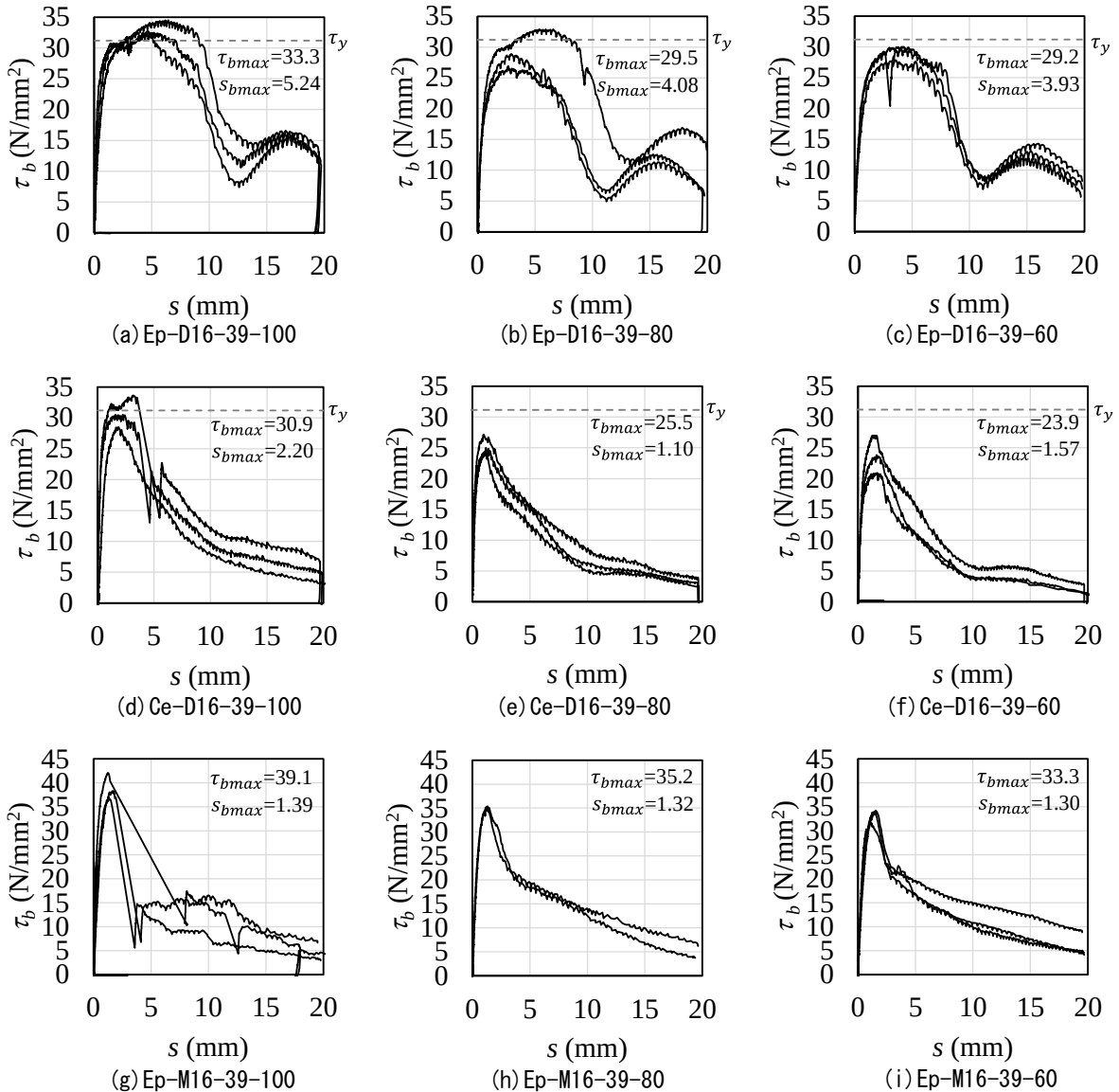


図-6 Series-2の付着すべり関係 ($f_{c,100}=39.0\text{N/mm}^2$, τ_y はアンカー筋降伏時の付着応力)

し、Ep-D13～19でも同様の傾向が見られた。実験後の穿孔内部には接着剤が残存しており、有機系接着剤のようなプラスチック樹脂では最大応力後も、接着剤がせん断破壊せずにアンカー筋の節による噛み合い作用が生じた可能性がある。無機系アンカーの場合は写真－1(d)～(f)からわかるように、接着剤が節と節の間でせん断破壊しており、そのため噛み合いが生じず、荷重低下後の応力上昇は見られなかった。Ep-M16-100は最大耐力以降、急激に荷重が降下したが、DM80、DM60では破壊形式がコンクリート－接着剤界面であり、ネジ部による接着剤のせん断破壊が生じなかったためか、DM100よりも緩やかに荷重が降下した。Ce-D16、Ep-M16の s_{bmax} は劣化程度による大きな違いは見られなかった。

4. 付着強度式による実験結果の評価

著者らはこれまでに劣化したコンクリートに定着したあと施工アンカーの付着特性の定量評価を行うために、劣化度合い、アンカー筋の定着長さを考慮した付着強度式を提案した。本稿ではこれらを用いて、実験結果の付着強度を評価できるか検証する。

4.1 付着強度式の構築

鉄筋の付着強度は一般に、コンクリート圧縮強度の平方根に比例するため^{7, 8)}、付着強度を評価するにはコンクリート強度を用いることで算出できる。しかし、劣化したコンクリートでは表層のコンクリート強度が低下し、アンカー筋の定着長さによって劣化による影響が異なる可能性がある。そこで、図－7に示すように、圧縮強度の低下量を l_e まで等価な値に置換することで、これらの影響を考慮する。劣化後の表層から深さ y (mm)の圧縮強度の算出は動弾性係数を用いて以下の式⁹⁾より表した。

$$R_{cs}(y) = 0.0074 \cdot (DM(y) - 100) + 1 \quad (3)$$

ここで $DM(y)$ 、 $R_{cs}(y)$ はそれぞれ深さ y (mm)のときの相対動弾性係数、圧縮強度比であり、 $R_{cs}(y)$ に $f_{c,100}$ を乗ずることで劣化後の圧縮強度を算出する。

既報⁴⁾より、劣化後の DM の推移はほぼ直線的であることから、 $DM(y)$ を次式で算出する。

$$DM(y) = \kappa y + DM(0) \quad (4)$$

ここで、 κ は直線の勾配で次式より表す。

$$\kappa = \frac{100 - DM(0)}{l_d} \quad (5)$$

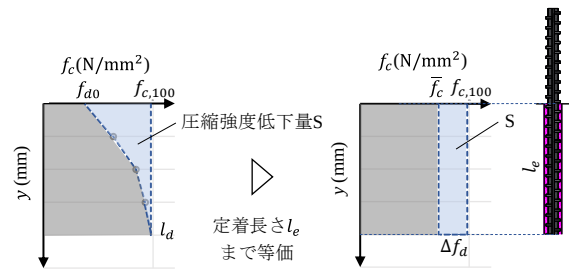
ここで、 l_d は表層から $DM(y)=100$ となる位置までの深さである。

また、 $DM(0)$ 、 l_d は劣化程度により異なるため、回帰分析を行い、それぞれ以下に示す関数で表した。

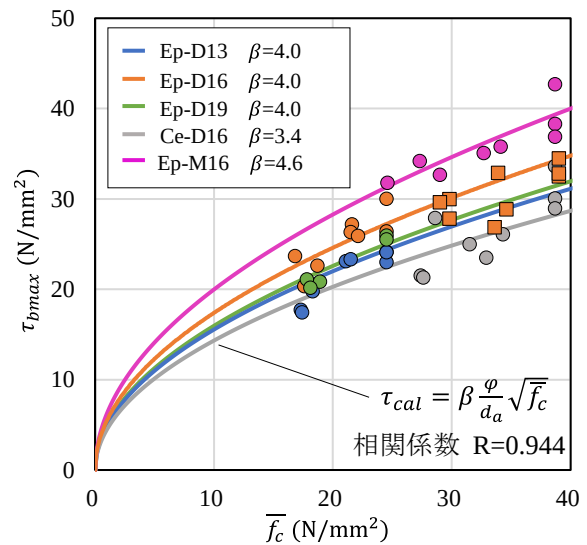
$$DM(0) = 0.004DM^2 + 0.6DM \quad (6)$$

$$l_d = 171(1 - DM/100)^{0.34} \quad (7)$$

式(2)～(7)から、等価圧縮強度を算出するための Δf_d は、



図－7 等価圧縮強度の算出方法



図－8 $\tau_{bmax} - \bar{f}_c$ 関係

表－3 耐力評価結果の一覧

試験体名	τ_{bmax}	$\bar{f}_c$	β	τ_{cal}	τ_{bmax}/τ_{cal}
Ep-D13-24-100	23.8	24.5	3.9	24.4	0.98
Ep-D13-24-80	23.2	21.1	4.1	22.6	1.03
Ep-D13-24-60	18.3	17.6	3.6	20.7	0.88
Ep-D16-24-100	28.2	24.5	4.1	27.2	1.04
Ep-D16-24-80	26.5	21.5	4.2	25.5	1.04
Ep-D16-24-60	22.2	18.1	3.9	23.4	0.96
Ep-D19-24-100	25.7	24.5	4.1	25.0	1.03
Ep-D19-24-60	20.7	18.6	4.0	21.8	0.96
Ep-D16-39-100	33.3	39.0	3.9	34.3	0.97
Ep-D16-39-80	29.5	34.3	3.7	32.2	0.92
Ep-D16-39-60	29.2	29.8	3.9	30.0	0.97
Ce-D16-39-100	30.9	39.0	3.6	29.2	1.06
Ce-D16-39-80	25.5	34.1	3.2	27.3	0.93
Ce-D16-39-60	23.9	29.0	3.4	25.2	0.95
Ep-M16-39-100	39.1	39.0	4.6	39.5	0.99
Ep-M16-39-80	35.2	34.7	4.6	37.3	0.95
Ep-M16-39-60	33.3	28.5	4.5	33.8	0.99

τ_{bmax} ：実験値、 τ_{cal} ：式(11)による計算値

次式のように求められる。

$$\Delta f_d = \frac{f_{c,100}}{l_e} \int_0^{l_e} (1 - R_{cs}(y)) \cdot dy \quad (8)$$

ここで、 $l_d \leq y$ のとき、次式が成立する。

$$DM(y) = 100 \quad (9)$$

以上より、次式によって等価圧縮強度が得られる。

$$\bar{f}_c = f_{c,100} - \Delta f_d \quad (10)$$

付着強度式は、劣化による影響を考慮するため式(10)をパラメータとし、さらに接着剤量を考慮した穿孔径比を用いることで、以下の式を構築した。

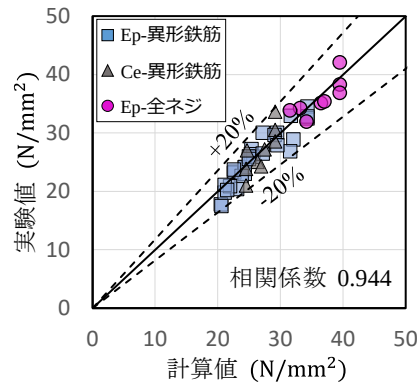


図-9 実験値と計算値の比較

$$\tau_{cal} = \beta \frac{\varphi}{d_a} \sqrt{f_c} \quad (11)$$

ここで、 β は補正係数である。

4.2 耐力評価

式(10)より各試験体の $\bar{f}_c$ を算出し、図-8に付着強度ー等価圧縮強度($\tau_{bmax} - \bar{f}_c$)関係をプロットする。 τ_{bmax} はEp-M16が最も大きく、Ce-D16が最も低い値であった。この要因として、それぞれの穿孔径 $\varphi 22\text{mm}$ に対して、全ネジボルトM16は公称直径が14.3mmであり、異形鉄筋D16の公称直径15.9mmよりも小さく、コンクリートよりも強度が高い接着剤の量が多かったためであると推察される。Ce-D16は表-1に表記してある通り、無機系接着剤は有機系接着剤よりも強度が小さいため、Epを用いた試験体よりも τ_{bmax} が小さい値となったことが示唆される。

表-3に耐力評価結果の一覧を示す。同表に示す β は式(11)を変換し、下式で算出した。

$$\beta = \tau_{bmax} / \left(\frac{\varphi \sqrt{f_c}}{d_a} \right) \quad (12)$$

同表の β の平均値から、Ep-D13～D19で $\beta=4.0$ 、Ce-D16で $\beta=3.4$ 、Ep-M16で $\beta=4.6$ とした。全試験体の安全率の平均は0.98であり、図-9による実験値と計算値の比較においても相関係数が0.944となり実験結果を精度よく評価できている。以上のことから、著者らが提案する付着強度式は、無機系アンカーと全ネジボルトにおいても適用可能であると判断される。

5. 結論

著者らは、劣化したコンクリートに対するあと施工アンカーの付着実験を実施した。実験結果を定量評価することを目的として、コンクリート表層の劣化を考慮した付着強度式を用い、耐力評価を行った。提案する付着強度式では補正係数を調整することで無機系接着剤および全ネジボルトを用いた試験体においても、良好に実験値を評価することができた。

今後は丸鋼や、アンカー筋定着後にコンクリートが劣

化した場合などを想定した実験を行い、付着強度式の汎用性を高めていく予定である。

謝辞

本研究の一部は日本建築あと施工アンカー協会より助成を受け実施しました。また、住友大阪セメント・安藤博士、日本ヒルティ・高橋氏、飛島建設・阿部博士より、多大なるご協力を頂きました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 広沢雅也、松崎育弘：あと施工アンカー設計・施工読本一初歩から応用まで、建築技術、1991
- 2) 緒方英彦、清水邦宏、石神暁郎、田場一矢：凍害劣化したコンクリートのアンカー引抜試験における最大引抜荷重と超音波伝播速度の関係、H28 農業農村工学会大会講演会講演要旨集、pp.755-756、2016
- 3) 三好慶大、及川雄大、高瀬裕也、濱幸雄：凍害劣化を模擬したコンクリートに対する断面修復材の付着すべり特性に関する基礎的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、Vol.21、pp.544-549、2021.10
- 4) 矢野悠佑雅、末長大佑、松永健也、高瀬裕也：表層部が凍害劣化したコンクリートに対する接着系アンカーの付着特性、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.22、pp.463-468、2022.10
- 5) 日本ヒルティ株式会社：材料規格書、https://www.hilti.co.jp/medias/sys_master/documents/he9/hbe/9485957496862/Specification-Text-ASSET-DOC-LOC-7248537.pdf（閲覧日：2023年1月6日）
- 6) 緒方英彦、服部九二雄、高田隆一、野中資博：超音波法によるコンクリートの耐凍結融解特性の評価、コンクリート工学年次論文集、Vol.24、No.1、pp.1563-1568、2002.1
- 7) CEB FIP Model Code 1990 First,Comite Euro-International du Beton,1990
- 8) ACI Building Code Requirements for Reinforced Concrete, ACI(318-77), 1992
- 9) 周藤将司、緒方英彦、石神暁郎、佐藤智：凍害劣化の生じたコンクリートの力学特性および現地非破壊試験による動弾性係数の評価法に関する研究、農業農村工学会論文集、No.303(84-3)、pp.I_291-I_299、2016.12