

論文

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

矢野 悠佑雅*1, 末長 大佑*1, 松永 健也*1, 高瀬 裕也*2

Bond Property of Post-installed Adhesive Anchors to Frozen Damaged Concrete

Yuga YANO*1, Daisuke SUENAGA*1, Kenya MATSUNAGA*1 and Yuya TAKASE*2

要旨： 寒冷地の鉄筋コンクリート (RC) 構造物は、凍結融解作用によって表層部から劣化が進行することが危惧される。そこで、表層部が劣化した RC 部材に対する接着系アンカーの付着性能について検証した。まず、液体窒素を用いてコンクリート表層部に凍結融解作用を与え、劣化度合いをパラメータとしてアンカー筋の付着実験を行った。その結果、表層部の劣化度合いが大きいほど付着強度が小さくなった。さらに、既往の鉄筋とコンクリートの付着すべりモデル (CEB-FIP モデル) の係数を調節することで、本実験結果を良好に再現することができた。

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

鉄筋コンクリート (以下, RC) 構造物は、中性化、塩害、凍害劣化など、様々な外的要因によって、建物の経年とともに、コンクリート表層から劣化が進行する懸念がある。また、脱炭素社会, SDGsなどを鑑みると、劣化部の補修や補強を繰り返し、RC 構造物を長期間使用することが望まれる。

図-1 にアンカー筋の適用例を示す。RC 構造物を耐震補強する際には、一般に接着系あと施工アンカー¹⁾によって既存部材と新設部材が接合される。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 構造物の長期的利用を考えれば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。

そこで本研究では、三好ら³⁾が提案する液体窒素を用いた劣化手法により、簡易的にコンクリートを劣化させてから、アンカー筋を定着し、あと施工アンカーの引張抵抗性能を検証する。また、劣化したコンクリートにアンカー筋を定着した際の付着すべり挙動を定量評価するには、劣化度合いのみならず、

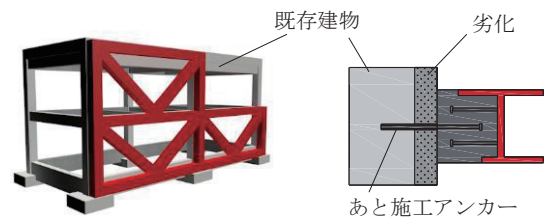


図-1 あと施工アンカーの適用例

アンカー筋の定着長さも考慮する必要がある。

そこでこれらの影響を考慮した付着強度式、および付着すべり挙動を再現する力学モデルを構築する。

2. 実験概要

2.1 試験体パラメータおよび材料特性

表-1 に試験体パラメータおよび材料特性の一覧を、表-2 にコンクリートの調合を示す。主な試験パラメータはアンカー筋径 d_a とコンクリートの劣化程度を表す相対動弾性係数 DM (表層から 30mm) であり、それぞれ 13~19 mm, 100~60% に設定し、定着長さ l_e は付着破壊となるように $4.5d_a$ とした。試験体名は、接着剤種 (E_p :エポキシ系) に d_a と DM を組み合わせる構成される。コンクリートは古い構造物を想定しているため、目標圧縮強度を 20~25N/mm²とし、コンクリートが劣化し易くなるように Non-AE コンクリートを使用した。なお、劣化程度の評価としてはコンクリート内部の微細ひび割れ等を緻密に評価する方が望ましいが、部材レベルの試験体では極めて困難であるため DM のみを用いた。

*1 室蘭工業大学環境創生工学系専攻 博士前期課程

*2 室蘭工業大学もの創造系領域 准教授

表-1 試験体パラメータおよび材料特性

試験体名	d_a	ϕ	l_e	f_b	$f_{c,100}$	E_c	f_y	E_s	n	DM	
										目標値	実測値
Ep-D13-100									3	100	-/-/-
Ep-D13-80	13	16	$4.5d_a$	228	24.5	23.6	455	170	2	80	82.1 / 84.0
Ep-D13-60									3	60	57.9 / 59.0 / 64.0
Ep-D16-100									2	100	-/-
Ep-D16-80	16	22	$4.5d_a$	228	24.5	23.6	556	197	3	80	79.9 / 80.9 / 83.6
Ep-D16-60									3	60	52.4 / 57.4 / 63.8
Ep-D19-100	19	24	$4.5d_a$	228	24.5	23.6	541	179	2	100	-/-
Ep-D19-60									3	60	54.8 / 57.1 / 61.6

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)⁴⁾,
 $f_{c,100}$: 凍結融解前の実験時(材齢 114 日)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, $f_{c,100}$ は材齢 2 週と 4 週でそれぞれ 12.7 N/mm², 18.3 N/mm²

2.2 試験体の諸元寸法および作成方法

図-2 に試験体の諸元寸法を示す。同図 (a) に示すよう、DM=100 の健全な試験体には複数のアンカー筋を定着可能なコンクリートベッドを用いたが、DM = 80, DM = 60 の試験体では試験体表面を均一に劣化できるように、アンカー筋を一本ずつ定着可能なコンクリートブロック (284mm×284mm) を用いた。コンクリート打設後、材齢 28 日~37 日に試験体を劣化させ、材齢 39, 40 日に湿式コアドリルを用いて穿孔作業を行い、材齢 55 日に注入型接着剤を用いてアンカー筋を定着した。また、アンカー筋の引張実験時にコンクリートが割裂破壊する懸念から、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。

前述した通り、本研究では液体窒素を用いてコンクリート試験体の表面を劣化させた。また、かぶりコンクリートの劣化を想定し、図-3 に示す深さ 30mm の位置に熱電対を 2 箇所配置し、この計測温度の平均値を凍結融解サイクルの基準温度とした。図-4 に示す位置で超音波伝播速度を測定し、次式⁵⁾より動弾性係数 E_d (N/mm²)を求めた。

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

ここに、 V は超音波伝播速度(km/s)である。この値から、相対動弾性係数を求める。次に液体窒素を用いた劣化方法の手順として、液体窒素をコンクリート表面に吹付け、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 E_d を求め、最後に、試験体を 5 分間程常温水に浸し、劣化部に水分を供給する。以上の過程を 1cycle とし、深さ 30mm の DM が目標値の±5%以内に達するまで繰り返し行う。図-5 に、温度履歴と凍結融解作用による DM の推移の一例を示す。同図から理解されるよう、1 サイクルの凍結融解作用で、DM がおよそ 0~15%低下しており、3~4 サイクルで DM = 80, 6~7 サイクルで DM = 60 まで低下した。

表-2 母材コンクリートの調査

種類	W/C (%)	s/a (%)	単位質量(kg/m ³)			空気量 (%)	
			W	C	S		
Non-AE	71.1	48.8	187	263	885	941	2.5

W:水 C:セメント S:細骨材 G:粗骨材 s/a:細骨材率

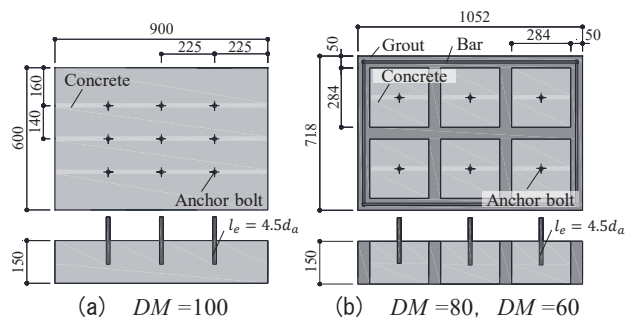


図-2 試験体の諸元寸法

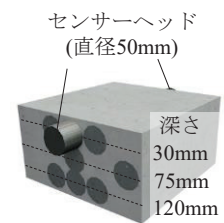
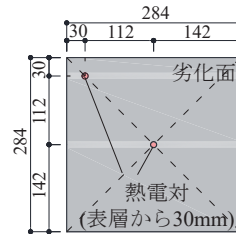


図-3 熱電対の埋込位置 図-4 超音波測定位置

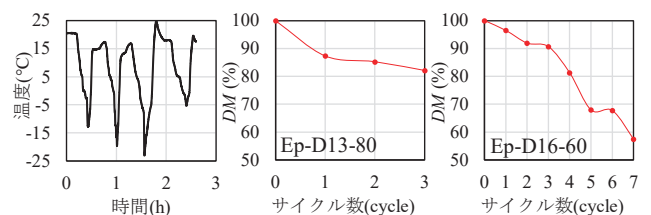


図-5 温度履歴および DM の推移の一例

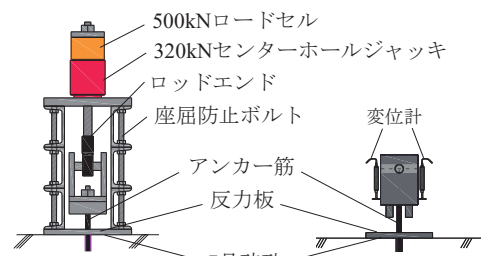


図-6 加力装置

2.3 加力装置および計測方法

図-6に加力装置を示す。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。コンクリートのコーン状破壊を防ぐため、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ブロックの間に7号珪砂を敷き詰め、反力板に均一に応力が作用するよう配慮している。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。加力方式は単調載荷である。

3. 付着実験

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る。図-7に載荷後の試験体の状況として、(a)引き抜き後のアンカー筋と、(b)穿孔周囲の状況を示す。図-7(a)および(b)から理解されるよう、穿孔部周囲にひび割れが発生しているが、コーン状破壊には至っておらず、アンカー筋のみが抜け出していることから、意図した通り付着破壊が主となって破壊したと判断される。また全ての試験体において、アンカー筋に接着剤がほとんど残存していないことから、鉄筋-接着剤界面で付着破壊していると考えられる。

3.2 付着強度

図-8に $DM=100$ の付着強度 τ_{bmax} で各試験体の τ_{bmax} を除した付着強度の比を示す。ここで、 τ_{bmax} は引張力 T 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。

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

$DM=100$ の τ_{bmax} と比較すると、 $DM=80$ ではD13とD16で、3%および6%とわずかな低下であったが、 $DM=60$ ではD13、D16、D19でそれぞれ23%、21%、19%と大きく低下した。この結果から、凍結融解によるコンクリートの劣化が、あと施工アンカーの付着強度に大きく影響を及ぼしていることが明らかとなった。また、同図の $DM=100$ において、アンカー筋径の違いにより τ_{bmax} が異なる値を示している。一般に鉄筋の付着強度は、寸法効果により径が大きいくほど小さくなるが、D16の τ_{bmax} が最も大きい値を示した。この理由として、穿孔径比が関係していると考えられるが、詳細は4章のモデル化で説明する。破壊形式は全て鉄筋-接着剤界面であったが、異形鉄筋が引き抜かれる時に生じるリングテンション効果により、アンカー筋周囲のコンクリートにも円周方向に引張応力が作用するため、コンクリートの強度が影響したと考えられる。

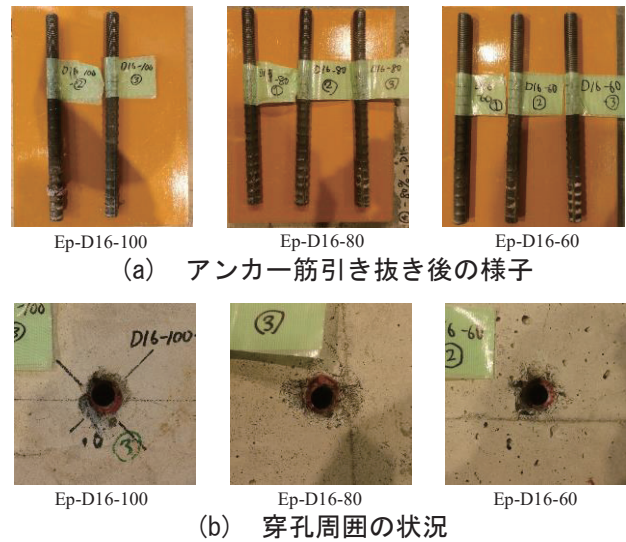


図-7 載荷後の試験体の様子

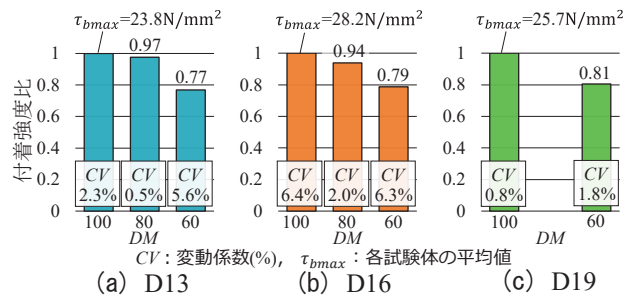


図-8 実験値 τ_{bmax} の比較

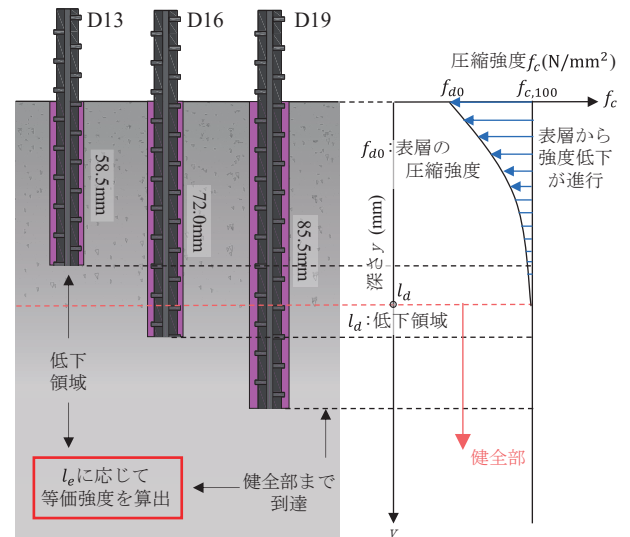


図-9 コンクリート表面における劣化の影響の違い

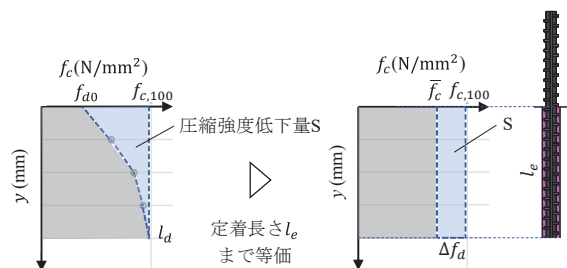


図-10 等価圧縮強度の算出方法

4. 付着応力度-すべり量 (τ_b-s) 関係のモデル化

4.1 表層の劣化を考慮した圧縮強度の算出

コンクリートの劣化は、表層で影響が大きく、深くなるに伴い、劣化による影響は少なくなる。つまり、図-9に示すように l_e によって影響の度合いが異なる可能性があり、実際に図-8より、 $DM=60$ で l_e が小さい方が、わずかながら τ_{bmax} の低下率が大きい。そこで、図-10に示すような等価圧縮強度の概念を用いて劣化程度と l_e を考慮する。各深さのコンクリート圧縮強度は次式⁶⁾より算出される。

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

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。

図-11に $DM(y)-y$ 関係を示す。ここで、本試験体では図-4より30, 75, 120mmの位置で DM を計測しているため、さらに図-12に示す劣化分布を把握する試験体から、60, 90mmの位置を含む計測値を追加する。図-11にプロットしてある値は、全試験体で、同じ深さの全計測位置の平均値である。

図-11より表層($y=30$ mm)の DM がもっとも小さく、深くなる(y が増加する)につれ、徐々に100%に収束する。また、 $DM=80$ 、 $DM=60$ では、それぞれ $y=90$ mm、120mmまでは、ほぼ直線的に DM が推移している。そこで、直線でプロットされた範囲で、直線回帰式より DM の推移を評価すると、次式のように表される。

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

ここで、 κ は直線の勾配で次式より表す。

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

図-13、図-14に $DM(0)-DM$ 関係、 l_d-DM 関係をそれぞれ示す。 $DM(0)$ 、 l_d はコンクリートの劣化程度により異なるため、 DM を用いた関数で表す。

既述の通り、本研究では $y=30$ mmの DM を基準値としているが、 $DM=0$ と100では、 $DM(0)$ もそれぞれ0と100になる。これを考慮し、回帰分析の結果から $DM(0)$ を次式で表す。

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

l_d は $DM=100$ の時に、 $l_d=0$ になることを考慮し、回帰分析から次式で表される。

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

さらに式(3)~(7)から、等価圧縮強度を算出するための Δf_d は、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。

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

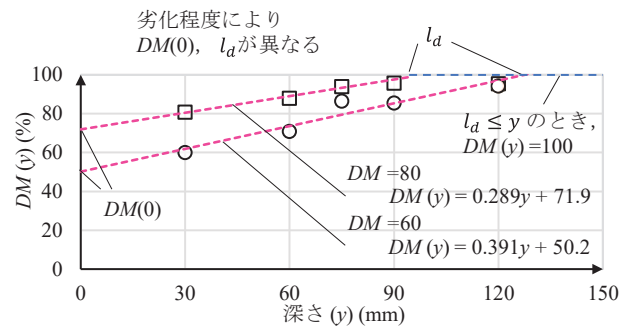


図-11 劣化によるDMの低下分布

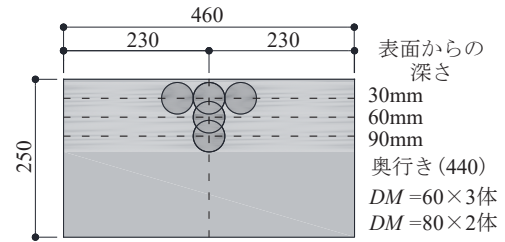


図-12 劣化分布を測定するための追加試験体

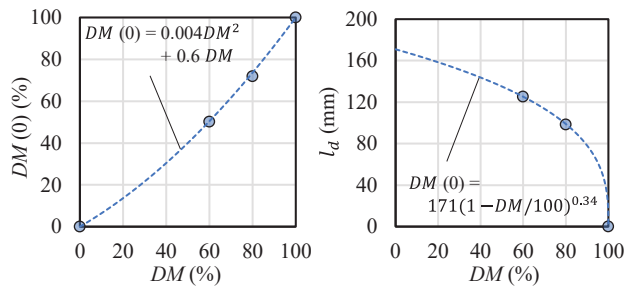


図-13 $DM(0)-DM$ 関係 図-14 l_d-DM 関係

表-3 各試験体パラメータの等価圧縮強度

試験体名	l_e	Δf_d	\bar{f}_c
Ep-D13-100	58.5	0.0	24.5
Ep-D16-100	72.0	0.0	24.5
Ep-D19-100	85.5	0.0	24.5
Ep-D13-80	58.5	3.4	21.1
Ep-D16-80	72.0	3.0	21.5
Ep-D13-60	58.5	6.9	17.6
Ep-D16-60	72.0	6.4	18.1
Ep-D19-60	85.5	5.9	18.6

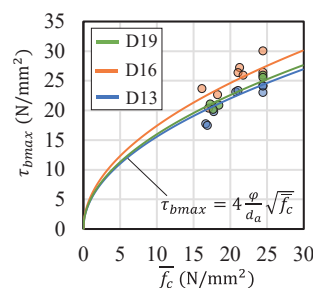


図-15 $\tau_{bmax}-\bar{f}_c$ 関係

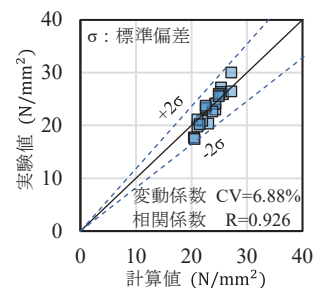


図-16 式(11)と実験値の比較

表-4 穿孔径比

d_a	ϕ	$\phi - d_a$	ϕ/d_a
13	16	3	1.23
16	22	6	1.38
19	24	5	1.26

以上より、次式によって等価圧縮強度が得られる。

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

表-3に各試験体パラメータにおける \bar{f}_c の値を示す。式(10)を用いることにより、 l_e が大きいかほど劣化による影響が小さくなり、 l_e を考慮している。

4.2 付着強度式の構築

式(10)より本試験体の \bar{f}_c を算出し、図-15に付着強度ー等価圧縮強度($\tau_{bmax} - \bar{f}_c$)関係を示す。同図より \bar{f}_c の増大に伴い、 τ_{bmax} も大きくなっていることがわかる。また、 d_a の違いにより τ_{bmax} が異なる値となった要因は、本試験体に用いている接着剤の圧縮強度は表-1に示すように、 $f_{c,100}$ のおよそ10倍程度のものを使用しており、 d_a に対する穿孔径 φ の割合が大きいかほど接着剤の充填量も多くなるため、穿孔径比の違いが付着強度に影響を与えた可能性がある。

表-4に穿孔径比を示す。本試験体ではD13, D19の φ/d_a は同程度であり、D16が最も大きいことから接着剤量を考慮すべく、 φ/d_a をパラメータに追加する。付着強度式を構築するにあたり、一般に、鉄筋の τ_{bmax} はコンクリート圧縮強度の平方根に比例することから^{7), 8)}、 \bar{f}_c を用いて次式を提案する。

$$\tau_{bmax} = \beta \frac{\varphi}{d_a} \sqrt{\bar{f}_c} \quad (11)$$

ここで β は補正係数であり、実験値より $\beta=4$ とする。

図-16に式(11)による計算値と実験値の比較を示す。同図を見ると、提案式により良好に実験値を評価しており、相関係数が0.926と高い値を示していることから、本提案式は妥当であると判断される。

4.3 包絡曲線

図-17に提案モデルとそのパラメータを示す。本論文では、鉄筋の付着すべりモデルの一つであるCEB-FIP model⁷⁾を参考にし、包絡曲線を再現する。CEB-FIP modelは次式で表される。

$$\tau_b = \tau_{bmax} \left(\frac{s}{s_1}\right)^\alpha \quad (0 \leq s \leq s_1) \quad (12)$$

$$\tau_b = \tau_{bmax} \quad (s_1 < s \leq s_2) \quad (13)$$

$$\tau_b = \tau_{bmax} -$$

$$(\tau_{bmax} - \tau_{bf}) \frac{s-s_2}{s_3-s_2} \quad (s_2 < s \leq s_3) \quad (14)$$

ここで、 α はかぶり厚により決まる係数であるが、CEB-FIP modelではこれによらず $\alpha=0.4$ とされているため本モデルでも同様の値を用いる。

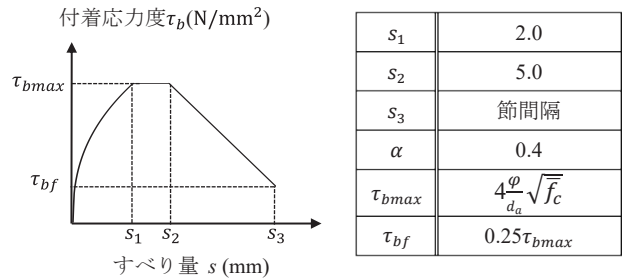


図-17 提案モデルのパラメータ

表-5 節間隔の検討

d_a (mm)	節間隔 ⁹⁾ (mm)	応力上昇時の 平均変位(mm)
13	8.9	9.5
16	11.1	11.9
19	13.4	15.3

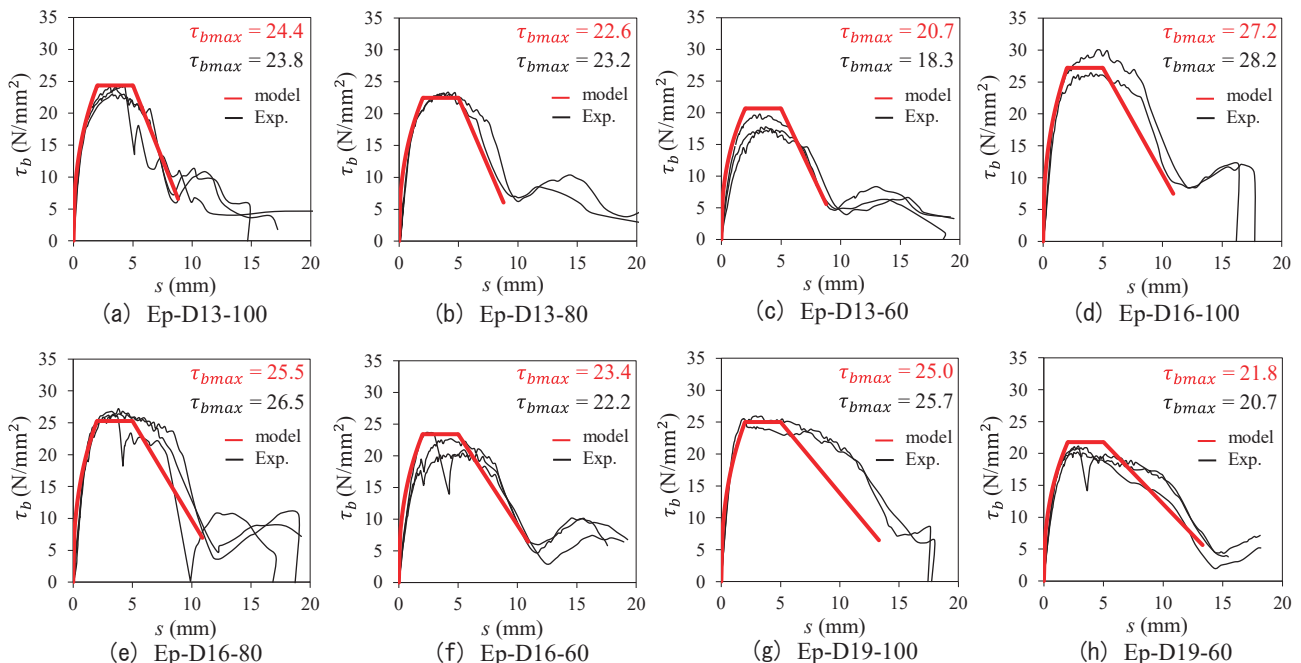


図-18 モデルと実験値の比較

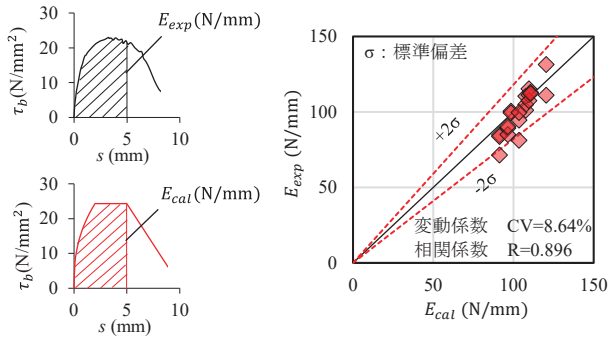


図-19 エネルギー吸収量の比較

s_1 , s_2 は実験値の付着強度時変位の最小値と最大値から $s_1=2.0$, $s_2=5.0$ とした. 次に荷重降下後の変位 s_3 について考察する. 本実験結果ではほとんどの試験体で荷重降下後に τ_b が再び上昇している. そこで, この時の応力再上昇時の変位を求めたところ, 表-5に示すように鉄筋の節間隔⁹⁾と同程度の値を示すことがわかった.

前掲の図-7からもわかるように実験後の試験体では, 穿孔内部に接着剤が残存していることから, 鉄筋の節による噛み合い作用が生じ, 軟化後に応力上昇したと考えられる. CEB-FIP modelにおいても, 鉄筋がコンクリート内部の補強筋などにより十分に拘束されている場合は, s_3 を節間隔としている. 以上より, 本モデルでは s_3 を節間隔とした. τ_{bf} は上記の応力が上昇するときの値の平均値である.

4.4 提案モデルと実験値の適合性

図-18に提案モデルと実験値の付着応力度—すべり量(τ_b-s)関係を, 図-19にモデルと実験値のエネルギー吸収量の評価を示す. τ_b-s 関係では, 荷重降下域でモデルを直線で表しているため, 図-18(g)においては過小評価する傾向が見られるが, その他の試験体では概ね良好に実験値の挙動を評価できている. また, 引張抵抗に対する, 抜け出し変位の許容値に関する規定はないようであるが, せん断ずれ変位の許容値¹⁰⁾を参考とし, この2~3倍となる5mmまでの範囲におけるエネルギー吸収量を比較した. その結果, 相関係数が0.876と高い相関が得られた.

5. まとめ

本論文では, 凍害劣化がアンカー筋の引張抵抗性能に及ぼす影響を把握することを目的に, 劣化させた試験体に対し, 付着実験を行った. その結果, 相対動弾性係数が低くなるにつれて, 付着強度が低下することがわかった. さらに, アンカー筋の定着長さが短い試験体ほど健全な試験体の付着強度に対する低下率が大きい傾向が見られた. このことから,

凍害によるコンクリート表面の劣化はアンカー筋の定着長さの違いにより, 付着強度に与える影響の度合いが異なる可能性がある. そこで, 本研究ではこれらを定量評価できるように, 劣化と定着長さの関係を考慮した付着強度式を構築した. また, この式を用いることにより実験値の付着すべり挙動を評価できるようモデル化した. 提案モデルでは本試験体の実験値を概ね良好に再現することができ, すべり量5mmまでのエネルギー吸収量の比較を行った結果, 高い相関を得ることができた.

謝辞

本論文の一部は, 日本学術振興会科学研究費補助金(研究代表者:高瀬裕也, 課題番号 19K04684)より助成を受け実施しました. 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—初歩から応用まで, 建築技術, 1991
- 2) 緒方英彦ほか: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) 日本ヒルティ株式会社:材料規格書, https://www.hilti.co.jp/medias/sys_master/document/s/he9/hbe/9485957496862/Specification-Text-ASSET-DOC-LOC-7248537.pdf (閲覧日:2022年3月30日)
- 5) 緒方英彦ほか: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
- 6) 周藤将司ほか: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
- 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) 日本産業規格:鉄筋コンクリート用棒鋼, JIS G 3112, 2021
- 10) 日本建築防災協会:既存鉄筋コンクリート造建築物の「外側耐震改修マニュアル」, 2002