

論文

表層部が凍害劣化したコンクリートに定着したあと施工アンカーのせん断抵抗性能

末長 大佑*1, 木林 巧*2, 矢野 悠佑雅*1, 松永 健也*1, 高瀬 裕也*3

Shear Resistance of Post-installed Anchors for Freezing Damaged Concrete Surface

Daisuke SUENAGA*1, Takumi KIBAYASHI*2, Yuga YANO*1, Kenya MATSUNAGA*1 and Yuya TAKASE*3

要旨：寒冷地の鉄筋コンクリート構造物は、凍結融解作用によって表層の強度が低下する懸念がある。本研究では、表層が強度低下した構造物の補修・補強に寄与すべく、劣化コンクリートに対する接着系アンカーのせん断抵抗性能の把握を目的とし、コンクリート表層部を凍結融解作用により強度低下させ、せん断載荷実験と有限要素解析を行った。その結果、表層部の強度低下により、アンカー筋の塑性ヒンジ点が深くなり、コンクリートが負担する応力範囲が広がることで、健全時と同程度のせん断抵抗性能を発揮する可能性があることが確認された。

キーワード：耐震補強、あと施工アンカー、凍害、せん断抵抗性能、有限要素解析

1. はじめに

積雪寒冷地の鉄筋コンクリート構造物（以下、RC 構造物と呼ぶ）は、凍結融解作用により、コンクリート表層が凍害劣化することが危惧される。このような構造物は、十分な耐久性・耐震性を有していない懸念があるため、これらを有効活用するためには、適切に補修・補強する必要がある。

図-1 にあと施工アンカーの適用例を示す。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（以下、接着系アンカーと呼ぶ）により既存躯体と耐震補強フレームは接合される。コンクリート表層が凍害劣化している場合、アンカー筋が良好に定着されず、外側耐震改修マニュアル（以下、外付けマニュアルと呼ぶ）¹⁾が規定するせん断耐力を満たさない恐れがある。接着系アンカーに関する研究は多く見られる^{例え(ば)2)}が、劣化コンクリートに接着系アンカーを施工した研究例は少ない。石田ら³⁾は、コンクリート表層が強度低下した際の接着系アンカー

の有限要素解析（以下、FEM 解析と呼ぶ）により、接着系アンカーのせん断耐力が低下することを報告しているが、実験による検討は行われていない。

本研究では、表層が凍害劣化した構造物の補修・補強に寄与すべく、劣化コンクリートに定着した接着系アンカーのせん断載荷実験を実施し、せん断力-せん断変位 ($Q-\delta_s$) 関係を比較する。また、FEM 解析により応力場を評価することで、表層部の凍害劣化が接着系アンカーのせん断抵抗性能に与える影響を明らかにすることを目的とする。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

図-2 に試験体の諸元寸法を示す。本実験では、凍結融解作用により凍害劣化した既存建物のブレース補強による間接接合部を模擬した試験体を対象とする。施工手順は、1)既存部コンクリートを打設、2)三好ら⁴⁾が提案した液体窒素を用いた凍結融解手法によりコンクリート表層を劣化、3)湿式コアドリルで穿孔後、接着剤を注入してアンカー筋を定着、4)新設部グラウトの圧入である。図-3 に熱電対埋込位置を、図-4 に超音波測定位置を、図-5 に凍結融解サイクルにおける温度履歴および相対動弾性係数の推移の一例を示す。凍結融解サイクルは、①5 分間水に浸漬させ劣化部に水分を供給、②表層 30mm に埋め込んだ熱電対が -15°C 程度を目標に液体窒素を吹き付け、③ 50°C 程度のお湯に浸漬させ、 5°C 以上になる

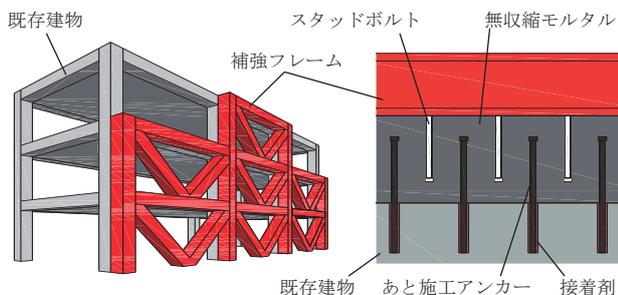


図-1 あと施工アンカーの適用例

*1 室蘭工業大学環境創生工学系専攻 博士前期課程
*2 室蘭工業大学建築社会基盤系学科
*3 室蘭工業大学もの創造系領域 准教授

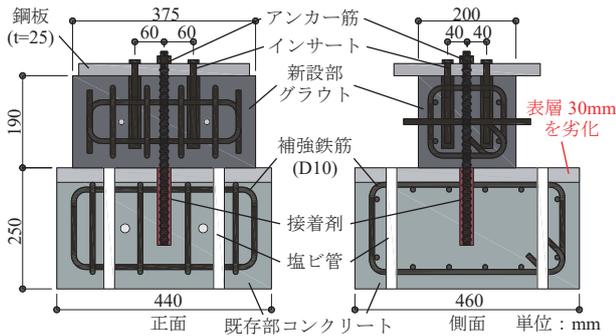


図-2 試験体の諸元寸法

まで融解，④お湯から取り出し，表面水分をふき取り，図-4 に示す位置で超音波伝播速度を測定する。これを 1cycle とする。また，動弾性係数 E_d (N/mm²) は次式により求められる⁵⁾。

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

ここで， V は超音波伝播速度 (km/s) である。劣化前の値を基準として，相対動弾性係数 DM (%) を求め，表層から深さ 30mm 地点の DM の平均が 80%，60%程度になるまで凍結融解を繰り返す。

表-1 に試験体パラメータを，表-2 にコンクリートの調査を示す。本論文では，耐凍害性の劣る Non-AE コンクリートを用いる。ここで，表層 30mm の DM が 100%，80%，60%となるように劣化したが，表層 90mm まで大きな影響が見られた。また，アンカー筋に D13，D16，D19 を使用した，計 8 体の試験体を対象とする。アンカー筋の定着長さはすべて $10d_a$ (d_a : アンカー筋径) としている。表-3 にコンクリート，グラウト，接着剤⁶⁾の材料特性を，表-4 にアンカー筋の機械的性質を示す。なお，本研究ではアンカー筋の負担する純粋なせん断力を計測するため，既存部と新設部の接合面にはグリースを塗布しており，摩擦の影響を最小限に抑えた。

2.2 荷重方法

図-6 に加力装置を示す。加力装置は，鉛直方向に最大荷重 150kN のスクリージャッキを 2 本，せん断方向に最大荷重 500kN の油圧アクチュエータを 1 本用い，3 本のジャッキを加力梁に接続する。図-2 に示すよう，試験体新設部に埋設したインサートに鋼板をボルト締めし，鋼板と加力梁を連結することで試験体に鉛直荷重を伝達し，軸方向力の和が 0kN で，新設部を平行に保つようにスクリージャッキを自動制御している。また，加力梁に取り付けた固定治具で直接新設部グラウトを挟み，油圧アクチュエータで手動制御により繰り返しせん断力を与えた。

荷重サイクルは，外付けマニュアル¹⁾における δ_s の許容値の 4 倍である 8mm までを実験対象とし，文献²⁾と同様に $\delta_s=0.25$ mm を 1 回， $\delta_s=0.5, 1.0, 2.0$ mm を 2 回， $\delta_s=3.0, 4.0, 6.0, 8.0$ mm を 1 回とした。

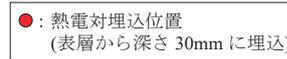


図-3 熱電対埋込位置



図-4 超音波測定位置

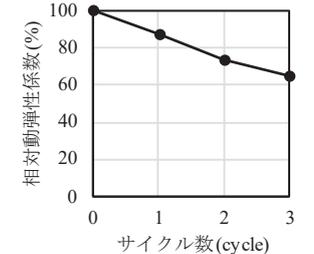
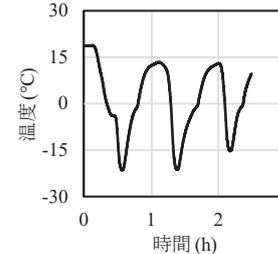


図-5 凍結融解サイクルにおける温度履歴および相対動弾性係数の推移の一例

表-1 試験体パラメータ

試験体名	DM (%)			アンカー筋	穿孔径 (mm)
	表層 30mm	表層 60mm	表層 90mm		
D13-100	100	100	100		
D13-80	78.2	84.5	97.2	D13	16
D13-60	64.6	64.9	78.3		
D16-100	100	100	100		
D16-80	77.5	91.4	94.4	D16	22
D16-60	64.7	74.3	95.3		
D19-100	100	100	100	D19	24
D19-60	64.3	73.4	82.9		

表-2 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	1.7

W: 水, C: セメント, S: 細骨材, G: 粗骨材, s/a: 細骨材率

表-3 コンクリート，グラウト，接着剤の材料特性

材料	圧縮強度 f_c (N/mm ²)	ヤング係数 E_c (kN/mm ²)	割裂強度 f_t (N/mm ²)
コンクリート	35.5	27.0	2.9
グラウト	69.1	27.4	2.8
接着剤 [*]	228	3.67	50.8

※接着剤の材料特性はメーカーより引用⁶⁾

表-4 アンカー筋の機械的性質

アンカー筋種	降伏強度 f_y (N/mm ²)	ヤング係数 E_s (kN/mm ²)	終局強度 f_u (N/mm ²)	伸び (%)
D13	385	162	581	15.4
D16	387	175	551	20.3
D19	395	160	610	17.0

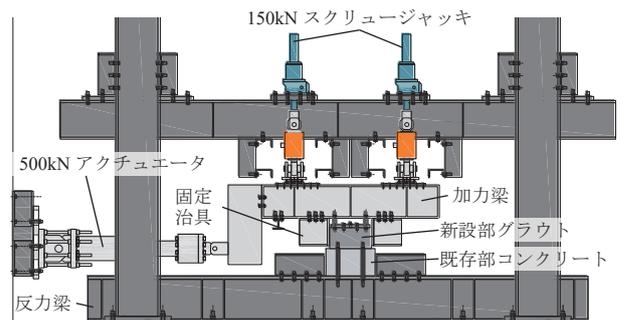


図-6 加力装置

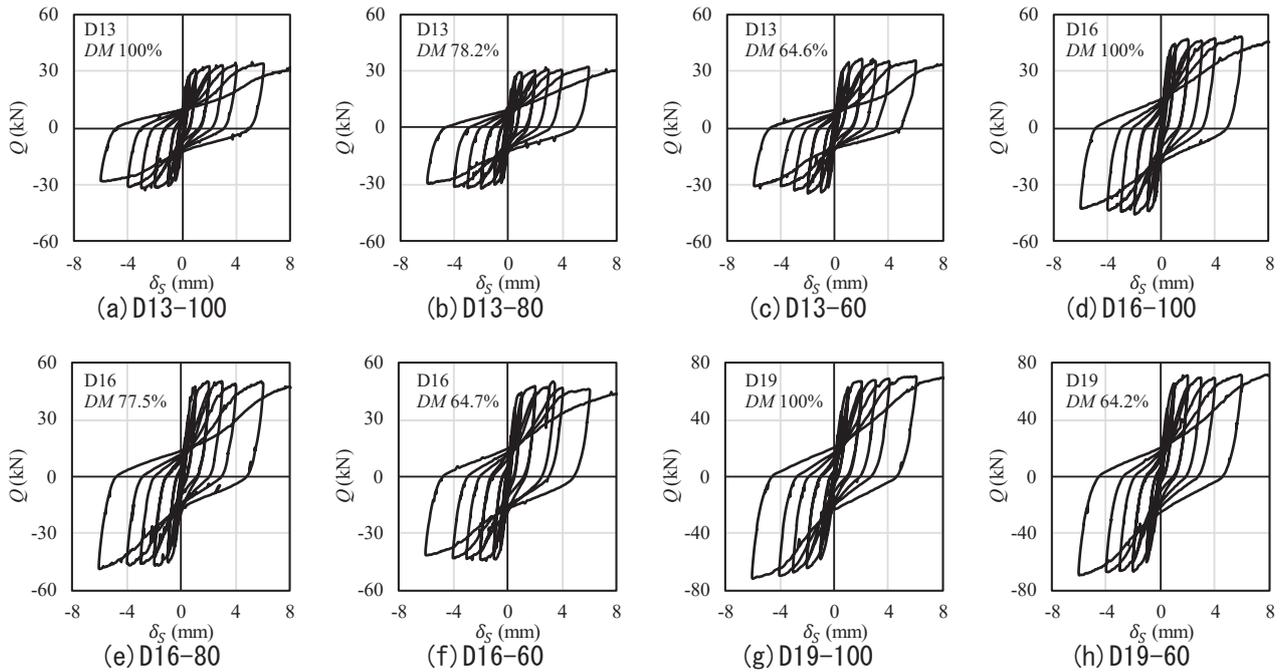


図-7 $Q-\delta_s$ 関係

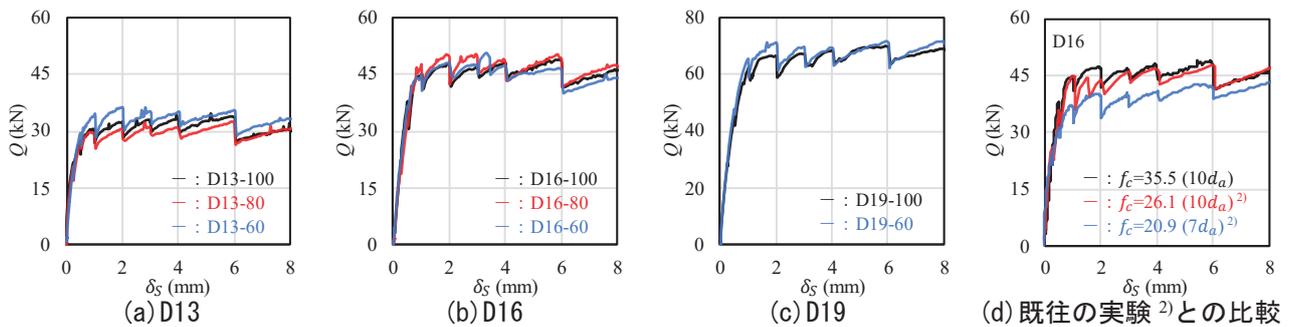


図-8 $Q-\delta_s$ 関係の正側包絡曲線の比較

2.3 実験結果

図-7に実験結果の $Q-\delta_s$ 関係を、図-8に $Q-\delta_s$ 関係の正側包絡曲線の比較を示す。せん断荷重実験の結果より、すべてのアンカー筋種で、DMが低下してもせん断力は同程度となり、D13とD19についてはDM60%が最もせん断力が高くなった。また、およそ $\delta_s=1.0\sim 2.0\text{mm}$ で荷重が横ばいとなったことから、塑性ヒンジ点が形成（アンカー筋が降伏）され、アンカー筋の幾何学的な変形によって、支圧抵抗が生じていると推察される。図-8(d)にD16-100、D16-60とコンクリート強度以外の条件に近い既往の実験結果²⁾との比較を示す。同図では、定着長さが $7d_a$ の試験体が含まれるが、文献²⁾より $7d_a$ 以上でせん断力は同程度であると報告されているため、定着長さによる影響は十分に小さいものとする。これを見ると、本実験のDM100%の $f_c=35.5\text{N/mm}^2$ の実験結果は、 $f_c=20.9\text{N/mm}^2$ の実験結果と比べるとせん断力が大きくなっている。一方で、 $f_c=26.1\text{N/mm}^2$ の実験結果と比べるとせん断力は大きくなっている程度で、大きな差異は見られない。ここで、DM低下後の圧

表-5 実験結果の一覧

試験体名	$Q_{exp}(\text{kN})$			$Q_a(\text{kN})$	α
	$\delta_s=2.0\text{mm}$	$\delta_s=4.0\text{mm}$	$\delta_s=6.0\text{mm}$		
D13-100	32.6	34.5	34.1	23.9	1.36
D13-80	30.6	31.0	32.6	23.9	1.28
D13-60	36.2	35.1	35.4	23.9	1.51
D16-100	47.5	47.9	48.3	37.7	1.26
D16-80	49.8	48.5	49.2	37.7	1.32
D16-60	48.3	47.4	46.4	37.7	1.28
D19-100	66.7	68.5	69.1	55.5	1.20
D19-60	71.0	69.1	71.1	55.5	1.28

$$\alpha = Q_{exp \delta_s=2.0\text{mm}} / Q_a$$

縮強度 f'_c を次式⁷⁾により算出する。

$$f'_c = f_c \cdot \{0.0074 \cdot (DM - 100) + 1\} \quad (2)$$

式(2)より、D16-60は $f'_c=26.2\text{N/mm}^2$ となったため、本実験は劣化によりコンクリート強度が低下したが、せん断力に与える影響は小さかったと考えられる。表-5に $\delta_s=2.0, 4.0, 6.0\text{mm}$ でのせん断力 Q_{exp} 、せん断耐力 Q_a 、 $\delta_s=2.0\text{mm}$ での安全率 α の一覧を示す。 Q_a は外付けマニュアル¹⁾より、次式で算出される。

$$Q_a = 0.7 \cdot \min(Q_{a1}, Q_{a2}) \quad (3)$$

$$Q_{a1} = 0.7f_y \cdot A_s \quad (4)$$

$$Q_{a2} = 0.4\sqrt{E_c \cdot f_c} \cdot A_s \quad (5)$$

ここで、 A_s はアンカー筋の公称断面積 (mm^2) である。本実験では、 $f_c=35.5\text{N/mm}^2$ と十分に高いためすべての試験体で Q_{a1} により Q_a が決まり、 $\alpha=1.20\sim 1.51$ と安全側に評価された。

3. FEM 解析の概要

3.1 解析モデルの概要

本研究では、汎用有限要素解析ソフト Diana10.5 を用いて二次元 FEM 解析を行う。図-9 に解析モデルの概要を示す。本解析モデルでは、凍結融解作用によるコンクリート表層部の段階的な劣化を再現するため、表層から 30mm, 60mm, 90mm を境に構成則を区別する。ここで、図-9 にコンクリートの支圧抵抗領域の概念図を示すが、平面応力要素を用いて解析すると、奥行き方向の全断面が均一に応力を負担する。このため、本試験体と同様に要素厚さを 460mm とすると、アンカー筋周囲に生じる応力が過少に算出される。そこで、既往の力学モデル²⁾を参考に、支圧抵抗領域が加力軸から ± 45 度の範囲で、半径 $5d_a$ の扇状になると仮定し、これと面積が等価となる幅が $5d_a$ の長方形に置き換え、要素厚さ t を決定した。アンカー筋および接着剤の要素厚さについても、断面積が等価な長方形に置き換え、要素厚さを決定した。この設定値の妥当性については、解析結果と実験結果の $Q-\delta_s$ 関係の比較から検証する。

拘束条件は、コンクリート両側面では X 方向並進を拘束、コンクリート底面では全自由度を拘束し、グラウト上面は実験と同様に平行を保持させている。また、グラウト側面片側を加力面として強制変位を与える。本解析では、外付けマニュアル¹⁾の δ_s の許容値の2倍である 4mm まで単調載荷で解析する。

メッシュサイズは、コンクリートおよびグラウトは 20mm、アンカー筋および接着剤は 4mm である。

3.2 材料構成則

図-10(a)にコンクリートおよびグラウトの材料構成則を示す。前節で述べた通り、本解析モデルはコンクリート表層から 30mm, 60mm, 90mm を境に構成則を区別するため、DM 低下後の圧縮強度 f'_c 、引張強度 f'_t 、ヤング係数 E'_c を、前述の式(2)および次式により算出し、適用した。

$$f'_t = f_t \cdot \{0.0074 \cdot (DM - 100) + 1\} \quad (6)$$

$$E'_c = E_c \cdot \{0.014 \cdot (DM - 100) + 1\} \quad (7)$$

圧縮側は支圧抵抗領域周囲からの拘束効果を考慮して、 f'_c 到達後の応力を一定とし、引張側には引張破壊エネルギー G_{ft} を考慮した Hordijk モデルを用いる。破壊エネルギーは、次式により算出される⁸⁾。

$$G_{fc} = 8.8\sqrt{f'_c} \quad (8)$$

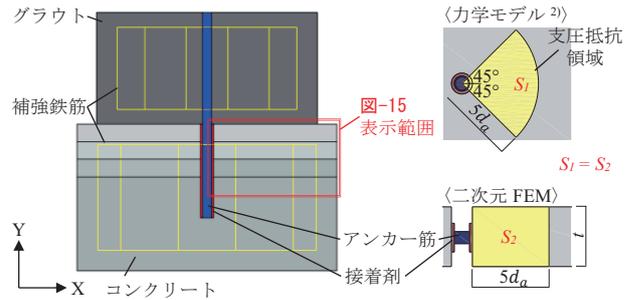


図-9 解析モデル概要

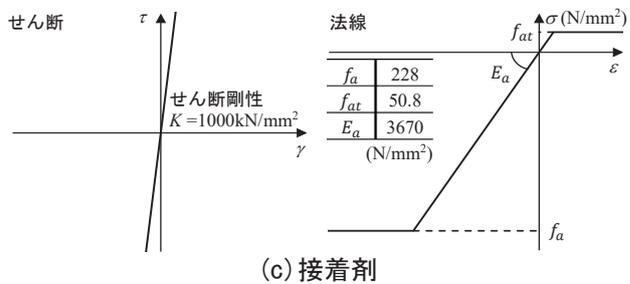
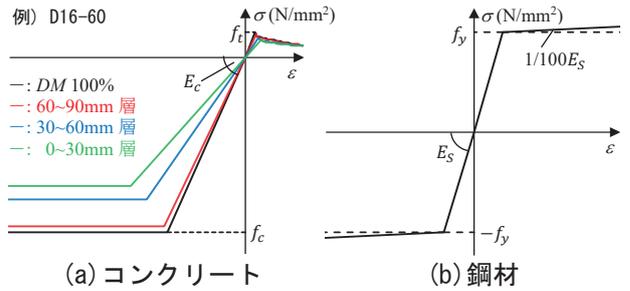
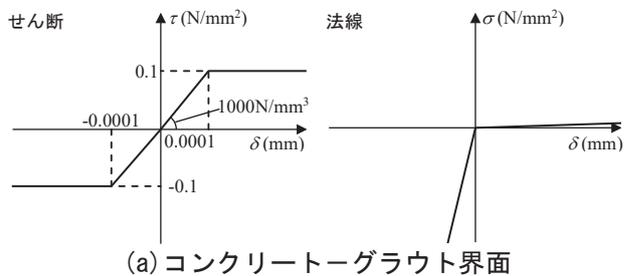
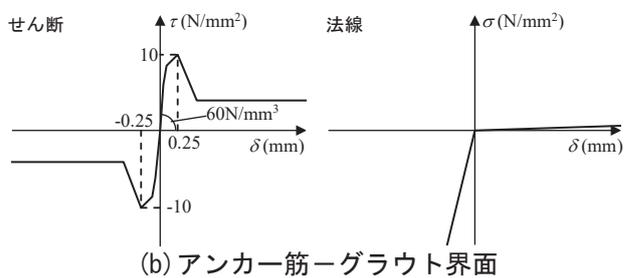


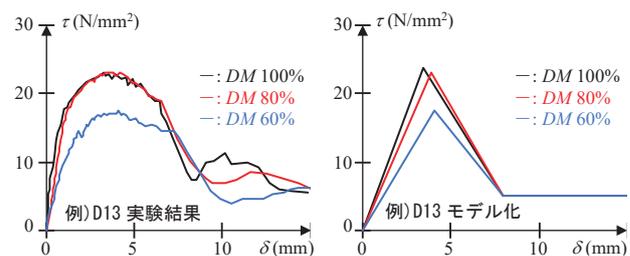
図-10 材料構成則



(a) コンクリート-グラウト界面



(b) アンカー筋-グラウト界面



(c) アンカー筋-接着剤界面

図-11 インターフェース要素

$$G_{ft} = G_{fc}/250 \quad (9)$$

ここで、 G_{fc} は圧縮破壊エネルギーである。

図-10(b)に鋼材の材料構成則を示す。構成則は圧縮側、引張側ともに Bi-linear モデルを適用し、降伏後の剛性は $1/100E_s$ とした。

図-10(c)に接着剤の材料構成則を示す。せん断方向は十分に大きな剛性とし、法線方向は圧縮側、引張側ともに最大応力到達後、一定としている。

3.3 インターフェース要素

図-11(a)にコンクリート-グラウト界面のインターフェース要素を示す。実験ではこの界面にグリースを塗布しており、摩擦の影響を十分に小さくしているため、せん断方向については最大せん断応力度を 0.1N/mm^2 とした。法線方向については圧縮時には十分に大きな剛性、引張時には低い剛性とした。

図-11(b)にアンカー筋-グラウト界面のインターフェース要素を示す。文献³⁾を基にせん断方向、法線方向を決定している。

図-11(c)にアンカー筋-接着剤界面のインターフェース要素を示す。同界面のせん断方向の特性は、本論文で対象とする試験体と同時期に行った、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実験の結果を基に決定した。図-12に示すよう、320kN 油圧ジャッキでアンカー筋の軸方向に引張力を与える。また、加力装置底部に厚さ 15mm の反力板を設置し、反力板に応力が均一に作用するよう、コンクリートと反力板の間には 7号珪砂を敷き詰めている。なお、付着実験の結果、アンカー筋-接着剤界面での破壊が多く見られたため、接着剤-コンクリート界面については剛接合とした。

4. FEM 解析結果と考察

4.1 Q - δ_s 関係の比較

図-13に実験結果の Q - δ_s 関係の正側包絡曲線と解析結果の比較を示す。これを見ると、実験結果では DM が低下してもせん断力が同程度であったが、本解析では DM の低下に伴い最大荷重が低下する傾向が見られた。しかし、実験結果から大きく外れた値とはなっていないため、本解析モデルは要素厚さを支圧抵抗領域の面積が等価となる面積の長方形に置き換えて算出したが、この要素厚さをを用いることで概ね良好に再現できた。

4.2 アンカー筋の曲率分布の比較

図-14に $\delta_s=2.0\text{mm}$ のときのアンカー筋の曲率分布を示す。曲率 ϕ (1/mm) は次式により算出される。

$$\phi = (\varepsilon_L - \varepsilon_R)/d_a \quad (10)$$

ここで、 ε_L , ε_R はアンカー筋の最外縁の節点の軸ひずみ (μ) である。

コンクリート側でアンカー筋のヒンジ点が形成される深さに着目すると、すべてのアンカー筋において、 DM 100%と DM 80%の解析結果に差は無いが、 DM 60%の解析結果のみ、ヒンジ点が深くなった。

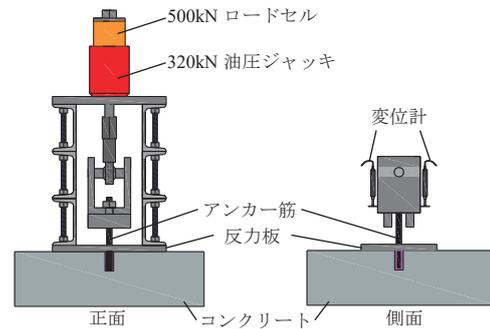


図-12 付着実験の加力装置

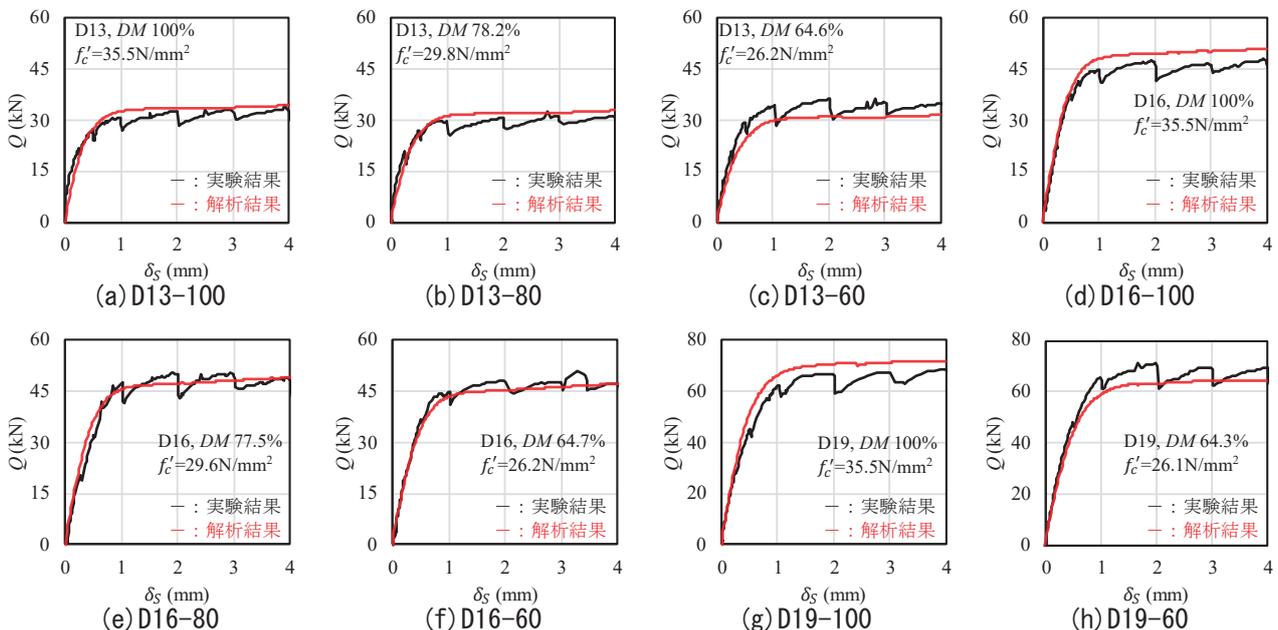


図-13 実験結果と解析結果の Q - δ_s 関係の比較

4.3 コンクリートの最小主応力度分布の比較

図-15 に $\delta_s=2.0\text{mm}$ のときの D13 を使用した解析結果のコンクリートの最小主応力度分布を示す。図中の丸で囲った領域に注目すると、前節で述べた通り DM 60%でアンカー筋のヒンジ点の形成位置が深くなったが、それに伴い応力範囲（図-15 の丸で囲った領域）も広がっている。

以上の結果より、劣化によるコンクリート強度の低下により、アンカー筋のヒンジ点位置が深くなることで、コンクリートの負担する応力範囲が広がる可能性がある。さらに、本試験体の f_c が 35.5N/mm^2 と高かったことから、コンクリート表層を凍害劣化させても、DM100%の試験体と同程度のせん断力を発揮したと考えられる。

5. おわりに

本論文では、表層が凍害劣化したコンクリートに定着したあと施工アンカーのせん断载荷実験および二次元 FEM 解析を実施し、以下の知見を得た。

- 1) コンクリート表層を DM 60%まで低下させたが、DM 100%と同程度のせん断力を発揮した。
- 2) 本 FEM 解析モデルでは、平面応力要素を適用したが、コンクリートの要素厚さを支圧抵抗領域と等価な面積の長方形に置き換えることで、概ね良好に Q - δ_s 関係を再現できた。
- 3) 本 FEM 解析の結果、コンクリート表層の強度低下により、アンカー筋のヒンジ点が深くなり、コンクリートの負担する応力範囲が広がった。今後は、他の f_c でも検討を行う予定である。

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) 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
- 2) Matsunaga K. et al. : Modeling of dowel action for cast-in and post-installed anchors considering bond property, *Engineering Structures*, Vol.245, 2021.10
- 3) 石田雄太郎，他 3 名：既存コンクリート表層部の材料特性をパラメータとしたあと施工アンカーおよびディスク型シヤキーの 3 次元 FEM 解析，*コンクリート工学年次論文集*，Vol.43, No.2, pp.637-642, 2021.6
- 4) 三好慶大，他 3 名：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

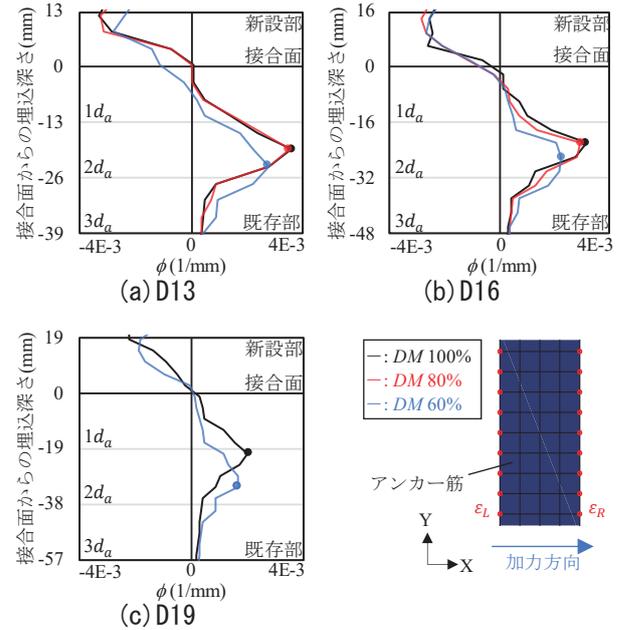


図-14 アンカー筋の曲率分布 ($\delta_s=2.0\text{mm}$)

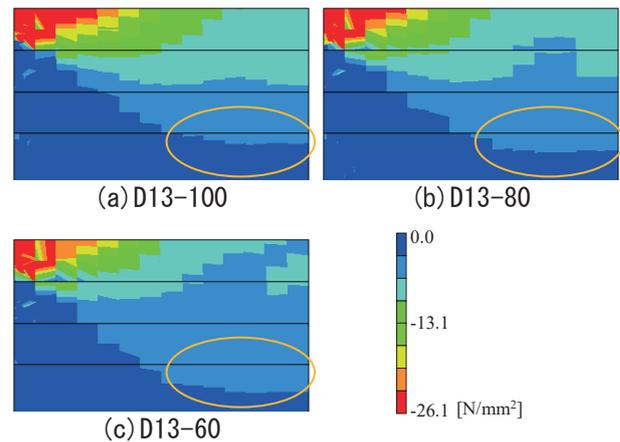


図-15 最小主応力度分布 (D13, $\delta_s=2.0\text{mm}$)

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

- 5) 緒方英彦，他 3 名：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) 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：2022.4.9)
- 7) 周藤将司，他 3 名：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
- 8) 日本建築学会：コンクリート系構造の部材解析モデルと設計への応用，2008.3