

論文 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ャキーの 3 次元 FEM 解析

石田 雄太郎*1・坂田 弘安*2・高瀬 裕也*3・久保田 雅春*4

要旨：本論文では、外付け耐震補強接合部における既存コンクリート表層部の材料特性があと施工アンカーおよびディスク型シャキーのせん断特性に与える影響を把握するために 3 次元 FEM 解析を行った。その結果、既存コンクリート表層部の圧縮強度を 30%まで低下させた場合においても、相対水平変位 2mm 以内で概ね設計用せん断耐力を発揮することを確認した。しかし、設計用せん断耐力に対する解析値の比は概ね 1.0 となることから表層部の強度低下が懸念される場合には表面処理に留意する必要があることを示した。さらに、既存コンクリート表層部の強度低下に伴う内部応力状態の変化も明らかにした。

キーワード：あと施工アンカー、シャキー、表層コンクリート、有限要素解析、外付け耐震補強

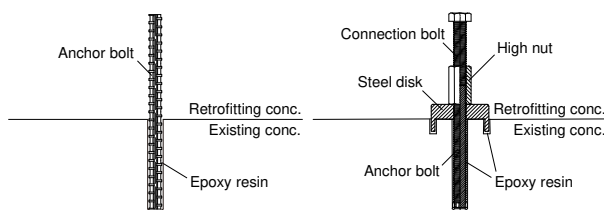
1. 序論

既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震補強工法の一つである外付け耐震補強^{1),2)}は、建物の現状の機能を維持しながら施工ができる点で有用である。

筆者らはこれまでに図-1(a)に示す一般的な接合要素であるあと施工アンカーと、図-1(b)に示すせん断抵抗性能に優れた接合要素であるディスク型シャキーを対象として、耐震補強の接合部における各接合要素の力学的挙動を実験や解析により検証してきた。³⁾⁻⁷⁾

しかしながら、これまでの実験や解析で扱った試験体や解析モデルにおける既存コンクリートは劣化のない健全なものであり、実際の既存建物のコンクリート表層部は過去に経験した地震から生じるひび割れ等による損傷が懸念される。そのため、既存コンクリート表層部が損傷している場合の各接合要素のせん断特性を把握しておくことは設計を行う上で重要である。

本論文では、あと施工アンカーおよびディスク型シャキーの FEM 解析モデルを用いて、既存コンクリート表層部の損傷を模擬するために、かぶりコンクリートの圧縮強度を低下させた解析を行う。そして、外付け耐震補強接合部における既存コンクリート表層部の強度低下があと施工アンカーおよびディスク型シャキーのせん断特性に与える影響を把握することを目的とする。



(a) あと施工アンカー (b) ディスク型シャキー
図-1 外付け耐震補強接合部に用いる接合要素

2. 対象とする試験体と FEM 解析モデルの概要

2.1 対象とする試験体概要

本論文で対象とする試験体の概要を表-1 に示す。あと施工アンカーの試験体は D19-0-15³⁾、ディスク型シャキーの試験体は D-Mg⁶⁾を対象とし、試験体寸法やアンカー径、各材料の諸元等の条件が概ね等しい 2 体とした。

表-1 対象とする試験体の概要

試験体名	D19-0-15 ³⁾	D-Mg ⁶⁾
既存部(コンクリート)サイズ [mm]	440×400×250	580×400×200
新設部(グラウト)サイズ [mm]	350×170×170	540×200×200
接合面の表面処理	-	金ごて仕上げ+グリス塗布
載荷方法	-	正負交番繰り返し載荷
アンカーボルトの径 d_a [mm]	19 (D19)	20 (M20)
アンカーボルトの埋込み長さ l_e [mm]	190 ($10d_a$)	90 ($4.5d_a$)
アンカーボルトの降伏強度 σ_y [N/mm ²]	402	325*
アンカーボルトのヤング係数 E_s [N/mm ²]	189,000	205,000*
接続ボルトの降伏強度 σ_y' [N/mm ²]	-	725*
接続ボルトのヤング係数 E_s' [N/mm ²]	-	205,000*
コンクリートの圧縮強度 σ_B [N/mm ²]	19.0	15.8
コンクリートのヤング係数 E_c [N/mm ²]	23,700	23,200
コンクリートの割裂引張強度 σ_t [N/mm ²]	1.9	1.7
グラウトの圧縮強度 σ_G [N/mm ²]	59.1	67.9
グラウトのヤング係数 E_G [N/mm ²]	23,400	22,100
グラウトの割裂引張強度 σ_{Gt} [N/mm ²]	3.3	3.2

※規格値を掲載

2.2 FEM 解析モデル概要

ここでは紙面の都合上、ディスク型シャキーの解析モデル D-Mg⁷⁾の概要について述べる。あと施工アンカーの解析モデル D19-0-15⁴⁾も材料構成則や接合要素の特性等は同様にモデル化されたものである。

ディスク型シャキーの解析モデル D-Mg の概要を図-2 に示す。解析には汎用非線形 FEM 解析プログラム⁸⁾を使用した。本解析モデルでは対称性を利用し、加力軸を通る鉛直面に対して半分をモデル化した。

*1 飛島建設株式会社 建築事業本部 コンシェルジュゼネラルオフィス 耐震技術 G 博士(工学) (正会員)

*2 東京工業大学 環境・社会理工学院 建築学系 教授 工学博士 (正会員)

*3 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)

*4 飛島建設株式会社 建築事業本部 コンシェルジュゼネラルオフィス 耐震技術 G (非会員)

コンクリート、グラウト、アンカーボルト、接続ボルト、鋼製ディスク、高ナットは8節点アイソパラメトリック立体要素でモデル化した。各要素の間にはそれぞれの界面の特性を考慮した厚みが零の8節点アイソパラメトリック接合要素を挿入し、接着剤は厚みを与えた同要素でモデル化した。部材内部の補強鉄筋は要素内の分散鉄筋としてモデル化した。コンクリートの下面は全自由度を拘束し、両端 Y-Z 平面は X 方向並進のみ拘束した。載荷は梁要素でモデル化した加力ビーム左右の加力点に X 方向の強制変位を与え、本解析では単調載荷とした。

2.3 材料構成則

コンクリートおよびグラウトの材料構成則を図-3(a)に示す。圧縮側の特性は、圧縮強度までは修正 Ahmad モデル⁹⁾を用い、圧縮強度到達後の軟化域には破壊エネルギーに基づく Nakamura-Higai モデル¹⁰⁾を用いた。三軸応力下の破壊条件には William-Warke の 5 パラメータモデルに大沼らの係数¹¹⁾を用いた。一方、引張側の特性は引張強度まで線形と仮定し、引張強度以降は出雲モデル¹²⁾を用いてテンションステフニングを考慮した。ひび割れ後のせん断伝達特性には山田・青柳モデル¹³⁾を用いた。

鋼材の材料構成則を図-3(b)に示す。圧縮側、引張側ともに Bi-linear モデルとし、降伏後の剛性は材料試験の結果を基に弾性剛性 E_s に対して $1/100E_s$ とした。また、立体要素でモデル化したアンカーボルトの多軸応力下の降伏条件には、von Mises の降伏条件を用いた。

2.4 接合要素の特性

接着剤の特性を図-4に示す。せん断方向の特性については、後述するアンカーボルトおよび鋼製ディスクの付着すべりで考慮するため、ここでは図-4(a)のように十分に大きな剛性($1.0 \times 10^4 \text{ N/mm}^3$)を与えた。垂直方向の特性は Bi-linear 型を仮定し、折点の座標は表-2に示す接着剤の諸元³⁾と接着剤の厚さ(アンカーボルト周辺: 2.0mm, 鋼製ディスク周辺: 2.5mm)から算出した。

アンカーボルトおよび接続ボルト周辺の界面の特性を図-5に示す。せん断方向の特性について、アンカーボルト周辺は本解析で対象とする試験体と同様の材料・施工方法が用いられたあと施工アンカーの付着性能実験¹⁴⁾、接続ボルト周辺は異形鉄筋の付着性能実験¹⁵⁾を参考にして決定した。アンカーボルトの付着すべりは接着剤とコンクリートの界面で生じると仮定した。垂直方向の特性は圧縮時には十分に大きな剛性($1.0 \times 10^7 \text{ N/mm}^3$)を有し、引張時には応力度を伝達しないようにした。

鋼製ディスクおよび高ナットの表面は平滑であるため、本解析ではこれら周辺の界面では付着は生じないものとし、せん断応力は伝達しないようにモデル化した。また、垂直方向の特性は図-5(b)と同様にモデル化した。

コンクリートとグラウトの界面の特性を図-6に示す。

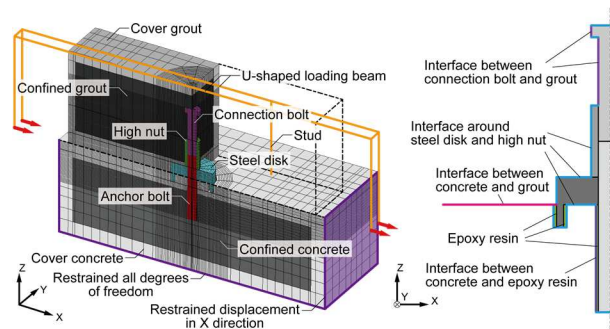
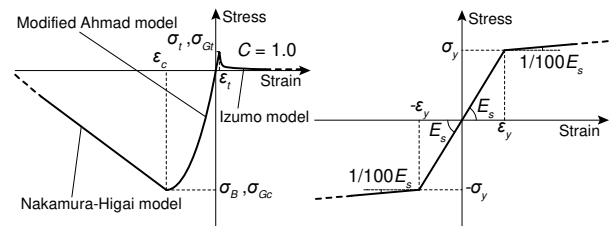
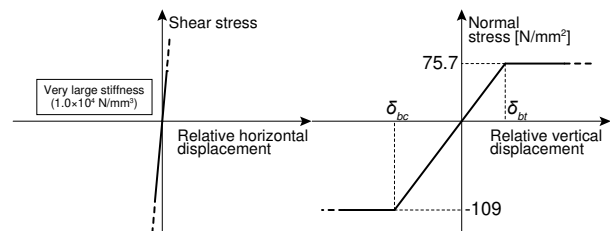


図-2 ディスク型シャキーの解析モデル(D-Mg)の概要



(a)コンクリート・グラウト (b) 鋼材

図-3 応力度-ひずみ関係



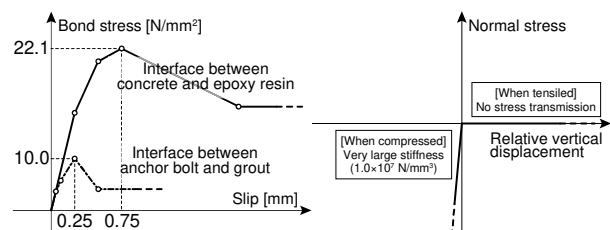
(a) せん断方向 (b) 垂直方向

図-4 接合要素の特性(接着剤)

表-2 接着剤の材料諸元³⁾

d_b [-]	σ_{bc} [N/mm ²]	σ_{bt} [N/mm ²]	E_b [N/mm ²]
1.2	109	75.7	2,730

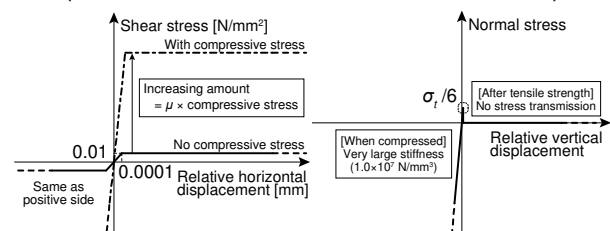
d_b : 比重, σ_{bc} : 圧縮強度, σ_{bt} : 引張強度, E_b : ヤング係数



(a) せん断方向 (b) 垂直方向

図-5 接合要素の特性

(アンカーボルトおよび接続ボルト周辺の界面)



(a) せん断方向 (b) 垂直方向

図-6 接合要素の特性

(コンクリートとグラウトの界面)

対象とする試験体の接合面にはグリスが塗布されているため、本解析では接合面の固着が全体のせん断耐力に影響を及ぼさないように 0.01N/mm² で一定とし、圧縮応力度が作用した際には摩擦の影響を考慮した。摩擦係数 μ は文献 16) を参考に 0.974 とした。垂直方向の特性は図-5(b)と同様の剛性を有し、引張強度到達後は接合が解けるようにモデル化した。接合面の引張強度は文献 17) を参考にコンクリートの割裂引張強度 σ_t の 1/6 とした。

2.5 解析精度

解析精度の検証として、せん断力-相対水平変位関係の対応を図-7 に示す。相対水平変位は実験と対応した 2 箇所の相対水平変位の平均値を用いた。また両モデルともに文献 2) によるずれ変形量の許容値 2mm の 2 倍である 4mm までを解析の対象範囲とした。

対象とした実験は繰り返し载荷で行われたのに対して、本解析は解析時間の短縮、解析の安定性等の観点から単調载荷とした。この载荷条件の違いが要因の一つともなり、実験結果の包絡線と若干一致していない部分もみられるが、ここでは概ねの傾向を評価できていると判断し、次章以降の検討を行うこととした。

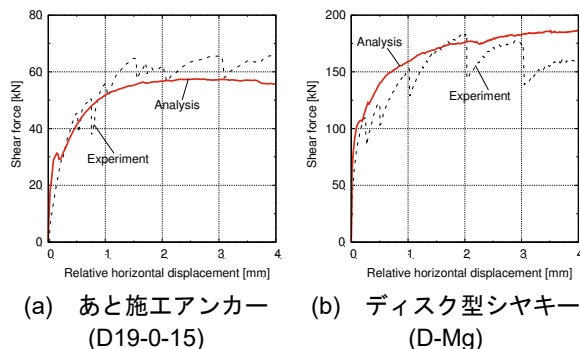


図-7 解析精度の検証(せん断力-相対水平変位関係)

3. 既存コンクリート表層部の強度低下を考慮した解析の概要

3.1 解析モデルの概要

本章では「既存コンクリート表層部」を「かぶりコンクリート」と定義し、図-8 に示す接合面から 30mm のかぶりコンクリートの材料特性をパラメータとすることで、表層部の損傷を模擬した解析を行う。

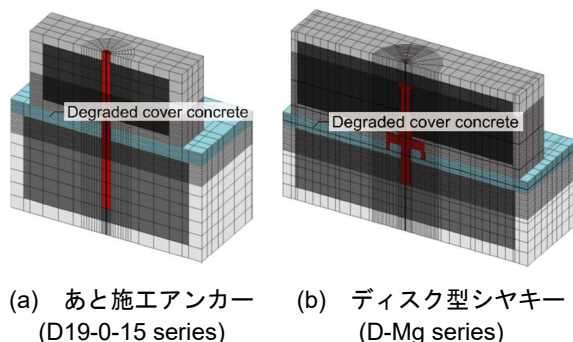


図-8 既存コンクリート表層部の強度低下を考慮した解析モデルの概要

3.2 既存コンクリート表層部のモデル化

前述のとおり、解析パラメータは図-8 に示すかぶりコンクリートの材料特性とする。ここで、文献 18) では非破壊試験による既存コンクリートの圧縮強度の推定において、材齢 8 年以上を経過した既存躯体の圧縮強度については材齢 1 年以内の推定強度に補正係数 0.63 を乗じることとされている。本解析ではこの補正係数の範囲内で既存コンクリート表層部の圧縮強度 σ_B を 100% (表-1 の値) から 10% 刻みで 70% まで低下させることとした。ヤング係数 E_c は式(1)¹⁹⁾等、圧縮強度時のひずみ ε_c は式(2)²⁰⁾により算出し、引張強度 σ_t は $\sigma_B/10$ として算出した。

$$E_c = 3.35 \times 10^4 \cdot \left(\frac{\gamma}{24}\right)^2 \cdot \left(\frac{\sigma_B}{60}\right)^{1/3} \quad (1)$$

$$\varepsilon_c = 13.97 \sigma_B + 1690 \quad [\mu] \quad (2)$$

ここに、 γ は気乾単位体積重量[kN/m³]である。

上記より算出した両モデルの既存コンクリート表層部の材料特性を表-3 に示す。

表-3 既存コンクリート表層部の材料特性
(a) あと施工アンカー (D19-0-15 series)

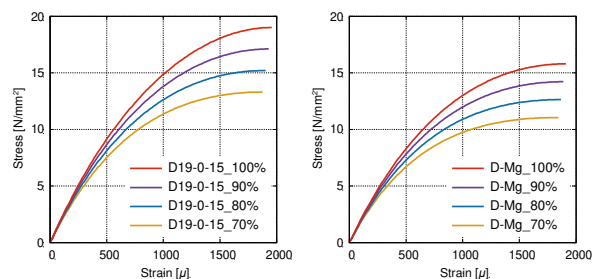
Model	σ_B [N/mm ²]	E_c [N/mm ²]	ε_c [μ]	σ_t [N/mm ²]
D19-0-15 100%	19.0	22,800	1,960	1.90
D19-0-15 90%	17.1	22,100	1,930	1.71
D19-0-15 80%	15.2	21,200	1,900	1.52
D19-0-15 70%	13.3	20,300	1,880	1.33

(b) ディスク型シャキー (D-Mg series)

Model	σ_B [N/mm ²]	E_c [N/mm ²]	ε_c [μ]	σ_t [N/mm ²]
D-Mg 100%	15.8	21,500	1,910	1.58
D-Mg 90%	14.2	20,700	1,890	1.42
D-Mg 80%	12.6	19,900	1,870	1.26
D-Mg 70%	11.1	19,100	1,850	1.11

σ_B : 圧縮強度, E_c : ヤング係数, ε_c : 圧縮強度時のひずみ, σ_t : 引張強度

また、修正 Ahmad モデル⁹⁾による一軸応力下の応力度-ひずみ関係を図-9 に示す。第 2 章で述べたように、圧縮強度以降の軟化勾配は Nakamura-Higai モデル¹⁰⁾により、破壊エネルギーと要素サイズにより変化する。



(a) あと施工アンカー (D19-0-15 series) (b) ディスク型シャキー (D-Mg series)

図-9 一軸応力下の応力度-ひずみ関係(圧縮強度まで)

4. 解析結果と考察

4.1 設計用せん断耐力との比較

せん断力-相対水平変位関係の解析結果を図-10 に示す。図中には外付け耐震補強接合部におけるあと施工

アンカーおよびディスク型シャキーの設計用せん断耐力を併せて示す。あと施工アンカーおよびディスク型シャキーの設計用せん断耐力は下式より求めることができる。

[あと施工アンカーの設計用せん断耐力 Q_a ²⁾]

$$Q_a = \phi_s \cdot 0.7 \cdot s_{ca} \cdot \sigma_y \quad (3)$$

ここに、 Q_a はあと施工アンカーの設計用せん断耐力[N]、は接合部のずれ変形量を許容値 2mm 以下に制限するための低減係数(=0.7)、 s_{ca} はアンカーボルトの断面積[mm²]、 σ_y はアンカーボルトの降伏強度[N/mm²]である。

[ディスク型シャキーの設計用せん断耐力 Q_{jd} ⁵⁾]

$$Q_{jd} = 0.8 \cdot Q_{disk} \quad (4)$$

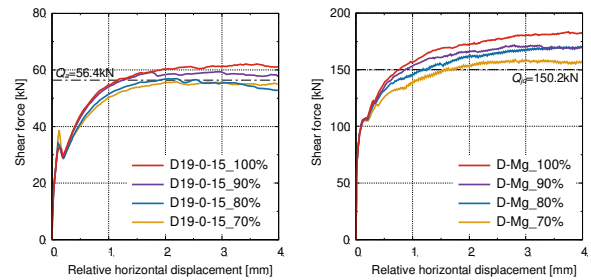
$$Q_{disk} = 0.24 \cdot K_1 \cdot K'_2 \cdot A_B \sqrt{E_c \cdot \sigma_B} \quad (5)$$

$$A_B = \int_R dA_B = \int_{-\pi/4}^{\pi/4} h_d \cdot \frac{R_d}{2} d\theta = \frac{\pi \cdot R_d \cdot h_d}{4} \quad (6)$$

ここに、 Q_{disk} はディスク型シャキーの終局せん断耐力[N]、 Q_{jd} はディスク型シャキーの設計用せん断耐力[N]、 A_B は支圧応力を求めるための有効見つけ面積[mm²]、 h_d は鋼製ディスクの埋込み深さ[mm]、 K_1 はへりあきによる補正係数、 K'_2 はアンカーボルトの埋込み長さによる補正係数、 E_c はコンクリートのヤング係数[N/mm²]、 σ_B はコンクリートの圧縮強度[N/mm²]である。また、本論文で対象とする試験体では $K_1=K'_2=1.0$ である。

本論文では相対水平変位 2mm 時のせん断耐力 Q_{2mm} を解析値と定義し、それぞれの設計用せん断耐力 Q_a 、 Q_{jd} に対する比を表-4 に示す。

図-10 および表-4 より、既存コンクリート表層部のコンクリート強度を 30%まで低下させた場合においても、文献2)に示されている外付け耐震補強接合部のずれ変形量の許容値 2mm 以内で概ね設計用せん断耐力を発揮し得ることが確認できる。しかし、設計用せん断耐力に対する解析値の比は概ね 1.0 となることから、あと施工アンカーまたはディスク型シャキーを施工する既存コンク



(a) D19-0-15 series (b) D-Mg series
図-10 解析結果(せん断力-相対水平変位関係)

表-4 設計用せん断耐力に対する解析値の比

(a) D19-0-15 series				(b) D-Mg series			
Model	Q_{2mm} [kN]	Q_a [kN]	Q_{2mm}/Q_a [-]	Model	Q_{2mm} [kN]	Q_{jd} [kN]	Q_{2mm}/Q_{jd} [-]
D19-0-15_100%	60.3	56.4	1.07	D-Mg_100%	172.9	150.2	1.15
D19-0-15_90%	58.3		1.03	D-Mg_90%	166.5		1.11
D19-0-15_80%	56.8		1.01	D-Mg_80%	161.2		1.07
D19-0-15_70%	55.6		0.99	D-Mg_70%	154.3		1.03

リート表層部で強度低下が懸念される場合には、耐震改修設計指針¹⁾に準拠してかぶりコンクリートを研る等、既存コンクリートの表面処理に留意する必要がある。

4.2 部材内部の損傷状況と応力度分布

相対水平変位 2mm 時におけるコンクリートの損傷状況を図-11、コンクリートの最小主応力度分布を図-12、あと施工アンカーおよびディスク型シャキーの Mises 応力度分布を図-13 に示す。

コンクリートの損傷状況(ひび割れ:Crack, 圧縮軟化要素: Softened element, 圧縮軟化経験要素: Post softened element)をみると、あと施工アンカーの D19-0-15 シリーズについては、コンクリートが圧縮強度に達して軟化する範囲に大きな差はみられない。ディスク型シャキーの D-Mg シリーズについては、アンカーボルト周辺は D19-0-15 シリーズと同様に大きな差はみられない。しかし、鋼製ディスク周辺は D-Mg_90%では大きな変化はないものの、D-Mg_80%、D-Mg_70%では図中に黄色枠で示すよ

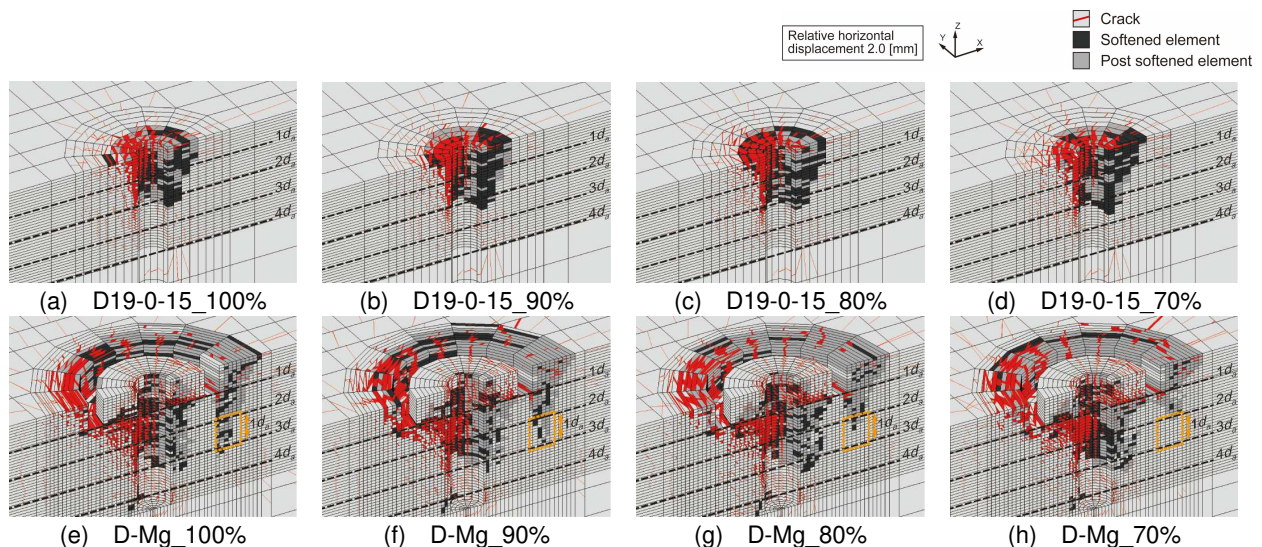


図-11 コンクリートの損傷状況

うに損傷範囲が垂直方向に $1d_a$ 程度減少している。

コンクリートの最小主応力度分布をみると、あと施工アンカー、ディスク型シャキーともに既存コンクリート表層部の強度が低下するほど、接合面近傍において最小主応力度が大きく(圧縮応力度が小さく)なり、図中に黄色○印で示す拘束コンクリートの境界近傍で最小主応力度が減少(圧縮応力度が増加)する傾向にある。以上より、あと施工アンカー、ディスク型シャキーともにコンクリートの支圧抵抗領域が減少し、支圧応力が小さくなることでせん断耐力および剛性が低下することが推察できる。

あと施工アンカーおよびディスク型シャキーの Mises

応力度分布より、あと施工アンカーの D19-0-15 シリーズでは Mises 応力度の分布やその最大値に大きな差はみられない。一方で、ディスク型シャキーの D-Mg シリーズでは既存コンクリート表層部の強度が低下するにつれて、鋼製ディスクの底部近傍でアンカーボルトの Mises 応力度が増加しており、ひずみ硬化が進展している。つまり、ディスク型シャキーについては、既存コンクリート表層部の強度が低下するほどアンカーボルトが寄与するせん断耐力が増加する傾向にある。そのため、アンカーボルトの降伏強度が高いものを使用することで、せん断耐力の低下率を小さくできる可能性がある。

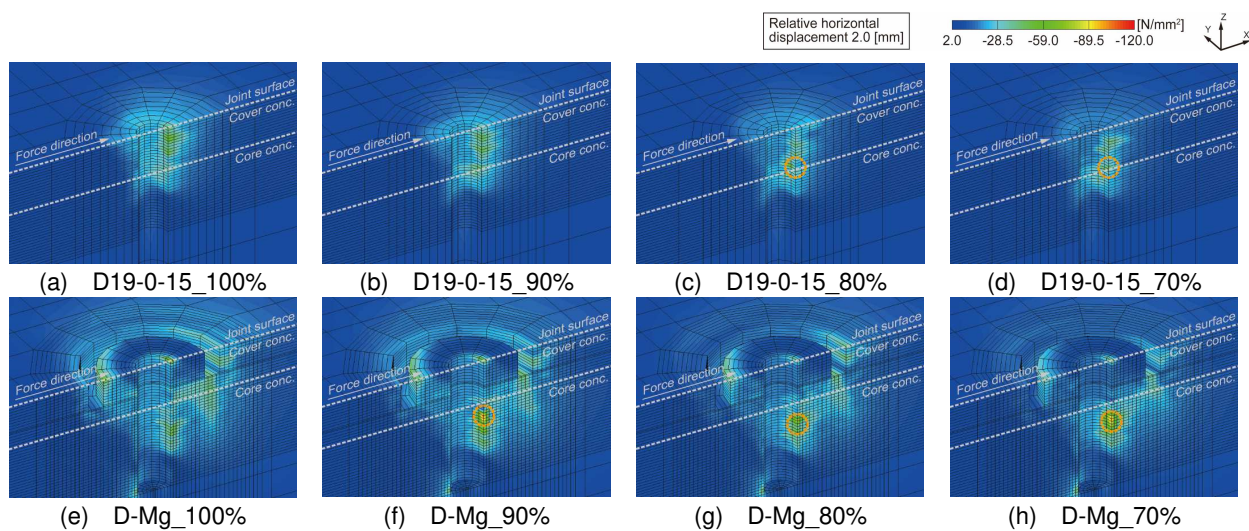


図-12 コンクリートの最小主応力度分布

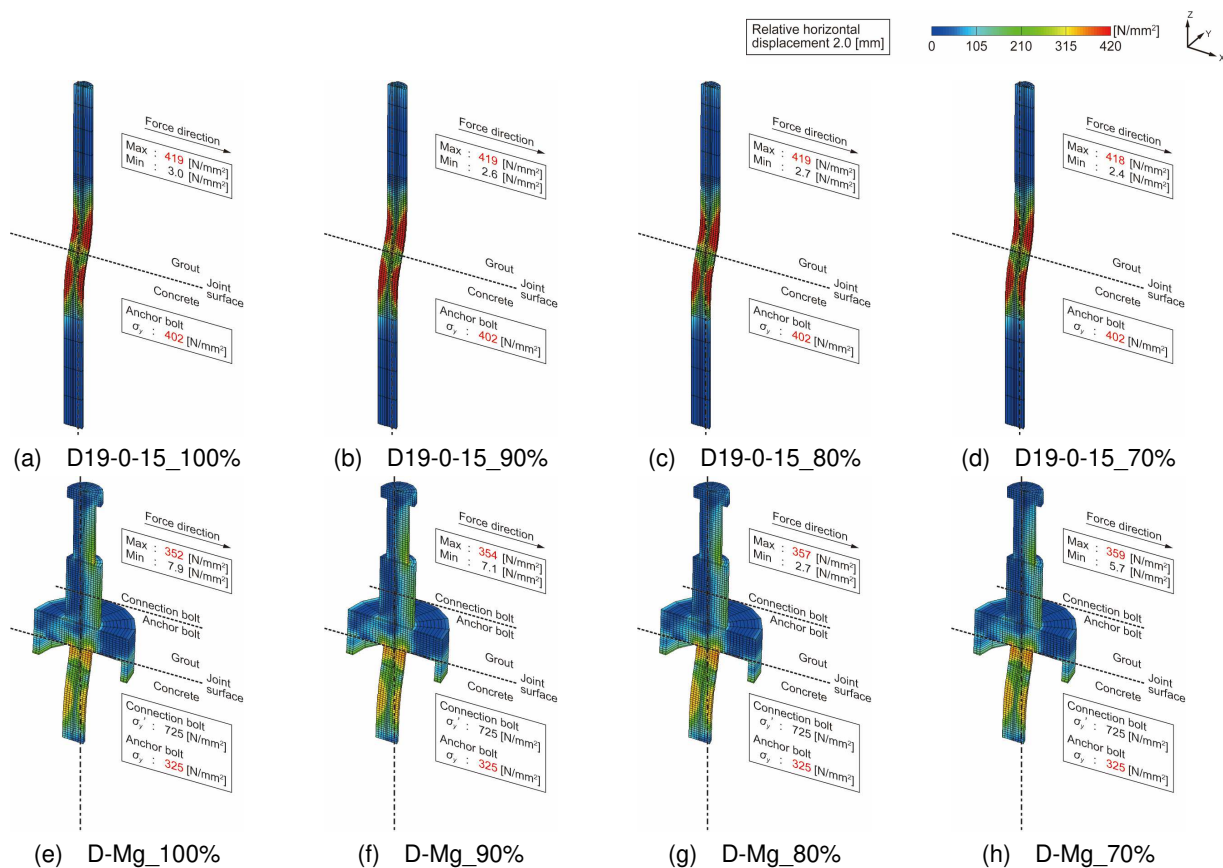


図-13 あと施工アンカーおよびディスク型シャキーの Mises 応力度分布 (変形量: 5 倍表示)

5. 結論

本論文では、既存コンクリート表層部の強度低下があると施工アンカーおよびディスク型シヤキーのせん断特性に与える影響を把握するために3次元FEM解析を行い、以下の知見を得た。

- (1) 既存コンクリート表層部の圧縮強度を30%まで低下させた場合においても、相対水平変位2mm以内で概ね設計用せん断耐力を発揮する。しかし、設計用せん断耐力に対する解析値の比は概ね1.0となることから表層部の強度低下が懸念される場合には表面処理に留意する必要がある。
- (2) 既存コンクリート表層部の強度が低くなるに伴い、コンクリートの支圧応力が小さくなることでせん断耐力および剛性が低下する。また、ディスク型シヤキーのアンカーボルトはひずみ硬化が進展し、せん断耐力の寄与率が増加する傾向にある。

謝辞

本研究の一部は、JST 産学共創プラットフォーム共同研究推進プログラム(JPMJOP1723)によるものです。また、東京工業大学助教・毎田悠承氏より大変貴重なご助言をいただきました。ここに記して深い謝意を表します。

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耐震改修設計指針・同解説，2017.7
- 2) 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，2002.9
- 3) 高瀬裕也，和田俊良，篠原保二：一定引張力を受けながら繰り返しせん断力を受ける接着系あと施工アンカーの力学挙動に関する考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.2，pp.1105-1110，2016.7
- 4) 石田雄太郎ほか：複合応力下における接着系あと施工アンカーの3次元FEM解析，外付け耐震補強接合部の応力伝達メカニズムと力学的挙動に関する研究 その1，日本建築学会構造系論文集，Vol.83，No.751，pp.1307-1317，2018.9
- 5) 高瀬裕也ほか：ディスク型シヤキーを用いた内付け補強架構の接合部破壊時の保有水平耐力の評価手法，鋼製ディスクとアンカーボルトを併用した耐震補強用シヤキーに関する研究，日本建築学会構造系論文集，Vol.79，No.698，pp.507-515，2014.4
- 6) 坂本啓太ほか：鋼製ディスクとアンカーボルトを併用した耐震改修用接合部材の開発，(その20)断面修復を施した接合部におけるせん断耐力の評価，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造IV，pp.369-370，2017.7
- 7) 佐藤裕貴ほか：既存RC建築物の耐震補強接合部におけるディスク型シヤキーの3次元FEM解析，(その1)3次元FEM解析の概要，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造IV，pp.435-436，2018.7
- 8) 伊藤忠テクノソリューションズ(株)：FINAL HELP，2016.10
- 9) 長沼一洋：三軸圧縮下のコンクリートの応力～ひずみ関係，日本建築学会構造系論文集，No.474，pp.163-170，1995.8
- 10) Nakamura, H., Higai, T.: Compressive Fracture Energy and Fracture Zone Length of Concrete, Seminar on Post-peak Behavior of RC Structures Subjected to Seismic Load, JCI-C51E, Vol.2, pp.259-272, 1999.10
- 11) 大沼博志，青柳征夫：三軸圧縮応力下におけるコンクリートの強度特性，電力中央研究所報告，No.381021，1981.12
- 12) 出雲淳一，島弘，岡村甫：面内力を受ける鉄筋コンクリート板要素の解析モデル，コンクリート工学論文，Vol.25，No.87.9-1，pp.107-120，1987.9
- 13) 山田一字，青柳征夫：ひび割れ面におけるせん断伝達，第2回RC構造のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム論文集，JCI-C5，pp.19-26，1983.10
- 14) 瀬戸口英恵ほか：湿式コアドリル工法によるあと施工アンカーの性能確認実験，(その2)注入式アンカーを用いた付着性能実験，日本建築学会大会学術講演梗概集，C-2分冊，構造IV，pp.149-150，2010.9
- 15) 中野克彦，松崎育弘，杉山智昭：接着系あと施工アンカーの基本平均付着強度に関する実験的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，C-2分冊，構造IV，pp.149-150，2009.8
- 16) 香取慶一，林静雄，牛垣和正，乗物丈巳：直交鉄筋が配筋されたコンクリート接合面のせん断挙動と接合面表面粗さとの関係，日本建築学会構造系論文集，No.508，pp.101-110，1998.6
- 17) 金亨俊，野口貴文，米田信年，濱崎仁：有限要素逆解析による補修モルタルと躯体コンクリートの付着構成則構築，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.2，pp.577-582，2008.7
- 18) 建築研究振興協会：既存建築物の耐震診断・耐震補強設計マニュアル，2019.2
- 19) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，2018.12
- 20) 雨宮篤，野口博：超高強度鉄筋コンクリート部材の有限要素解析プログラムの開発，(その1)コンクリートモデルの構築，日本建築学会大会学術講演梗概集，C分冊，構造II，pp.639-640，1990.9