

論文 上向き拡張型あと施工アンカーの引抜き耐力特性

畑中 友*1・船木 尚己*2・田中 礼治*3・藤田 正吾*4

要旨：筆者らは、アンカー先端部を放射状に拡張させてコンクリート母材に固着する形式のあと施工アンカーを提案し、その基本的な力学的特性を確認するための引張载荷試験を行った。アンカーの形状をパラメータとした3種類の試験体に対して载荷試験を行った結果、最終破壊形式がいずれもアンカー筋破断を示し、安定した耐力を発揮することを確認した。また、コンクリートの施工面にひび割れがある場合の本アンカーの耐力特性を実験的に確認した。さらに、3次元有限要素解析により概ね試験結果を再現することができ、構築したモデルの妥当性と応力分布を明らかにした。

キーワード：あと施工アンカー、拡底式、引張载荷試験、ひび割れ、3次元有限要素解析、応力分布

1. はじめに

昨今の地球環境問題に対して、地球温暖化ガス排出の抑制につながる「建物の長寿命化」が果たすべき役割は大きい。建物の寿命を決める要因は主に2つあり、一つは経年による耐震性能の低下、もう一つは建物に求められる機能上の要求が時代とともに変化し陳腐化することである。これらの要因に対する解決策として、耐震改修やリノベーションがあげられる。既存建物に耐震部材や設備機器等を取り付ける際、多種多様なあと施工アンカーが使用されており、建物の長寿命化を実現するために、あと施工アンカーの利用が今後ますます増加するものと予想される。その一方で、アンカーの経年劣化やコンクリート造躯体のひび割れ等に起因した事故が発生していることから、アンカーを広範囲かつ長期的に使用していくためには、過酷な条件下においても安定した性能を発揮するアンカーが必要である。

そこで筆者らは、これまでに形状の異なる複数の拡底式あと施工アンカーを提案してきた。前報においては、これらのアンカーを対象として実施した载荷試験の結果に基づき、アンカーの基本的な力学特性と、その性能の優位性について確認した^{1)~5)}。本報は、筆者らが新たに提案した拡底式あと施工アンカーの引張载荷試験と3次元の有限要素解析を行って得られた結果に基づき、本アンカーの基本的な引張耐力特性について確認することを目的とする。

2. 引張载荷試験

2.1 試験体概要

本報で対象とするアンカーの詳細を図-1に、アンカーの全景を写真-1に示す。本アンカーは、本体と拡張

コマ、アンカー筋（全ねじ棒）で構成される。図-2に示すとおり、アンカーは底部が拡張された穿孔に挿入される。アンカー筋先端に固定された拡張コマには、4本のスリットが入っており、本体を打ち込むことにより、くさび状に加工された本体先端部が拡張コマに食い込むことで拡張コマがアンカーの先端部を中心に施工するコンクリート表面に向かって放射状に拡張し、コンクリート母材に固着される仕組みである。アンカーを挿入する孔は、ストレート型のドリルを取り付けたハンマー

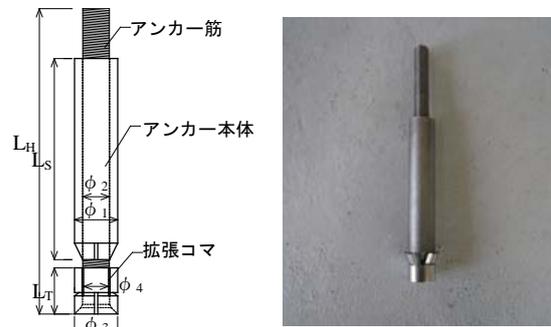
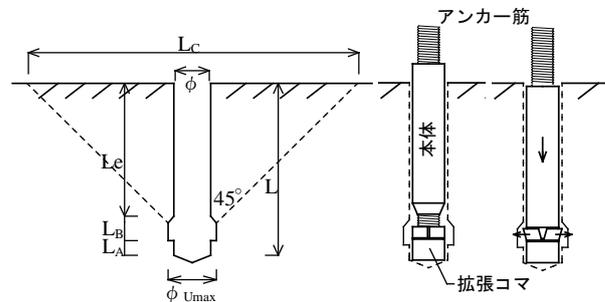


図-1 アンカー詳細 写真-1 アンカー全景



(a) 穿孔形状 (b) アンカーの挿入 (c) 本体打ち込み

図-2 アンカーの機構

*1 東北工業大学 工学部建築学科助教 博士（工学）（正会員）

*2 東北工業大学 工学部建築学科教授 博士（工学）（正会員）

*3 東北工業大学 名誉教授 工博（正会員）

*4 FS テクニカル株式会社 取締役社長

ドリルを用いて穿孔した後、拡張用ビットを付けた専用の穿孔ドリルにより底部を拡張させたものである。

表-1 アンカー試験体寸法 (単位: mm)

| 試験体名称 | アンカー本体 | | | 拡張コマ | | | アンカー筋 ^{※1} |
|-------|----------------|------|------|----------------|------|------|---------------------|
| | L _S | φ1 | φ2 | L _T | φ3 | φ4 | |
| M12 | 104.0 | 20.5 | 12.3 | 22.0 | 20.0 | 12.3 | 180.0 |
| M16 | 142.0 | 26.0 | 16.3 | 28.0 | 26.0 | 16.3 | 240.0 |
| M20 | 177.0 | 32.0 | 20.3 | 38.0 | 32.0 | 20.2 | 300.0 |

L_S: アンカー本体全長, φ1: アンカー本体外径, φ2: アンカー本体径, L_T: 拡張コマ全長, φ3: 拡張コマ外径, φ4: 拡張コマ内径, L_H: アンカー筋 (全ねじ棒) 全長
 ※1: アンカー筋は試験体名称に示した全ねじ棒

表-2 穿孔寸法 (単位: mm)

| 名称 | φ | φ _{Umax} | L | L _A | L _B | L _C | L _e |
|-----|------|-------------------|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| M12 | 21.0 | 28.0 | 132.0 | 12.0 | 14.0 | 240.0 | 106.0 |
| M16 | 27.0 | 36.0 | 176.0 | 15.0 | 19.0 | 320.0 | 142.0 |
| M20 | 33.0 | 44.0 | 220.0 | 18.0 | 25.0 | 394.0 | 175.0 |

φ: 穿孔径, φ_{Umax}: 最大拡底径, L: 穿孔深さ, L_A: 穿孔底部から拡底開始点までの高さ, L_B: 拡底部分の高さ, L_C: コーン状破壊面の直径, L_e: 有効埋込深さ

表-1 および表-2 に示すとおり、試験体はアンカー筋径が異なる3種類とし、それぞれ5本ずつ荷重試験を行った。各試験体の寸法については、アンカーの最終破壊形状がアンカー筋破断となること、アンカーがコンクリート供試体から抜け出してこないことを目標に、試行錯誤を重ねて定めたものである。アンカーを施工するコンクリート供試体は、平面形状が1,200mm×1,800mm、厚さ400mmの鉄筋コンクリート板で、底面に亀裂防止のための鉄筋(D13)を格子状に配筋した。コンクリート供試体の目標圧縮強度は、18N/mm²の1種類とした。荷重試験直前に計測したコンクリートの実圧縮強度は19.0N/mm²であった。一つの供試体に対して10~12本のアンカーを下向きに施工した。アンカーの本体と拡張コ

マの材質はSUS316、全ねじ棒はSUS316Lである。

2.2 試験方法

荷重試験に使用した加力装置の概要を図-3、全景を写真-2に示す。荷重試験には、最大容量が400kNの電動油圧ジャッキを用い、チャックで固定したアンカー筋に引張力を与える方法により行った。測定については、荷重は最大容量が200kNのセンターホール型ロードセルで計測した。また、アンカーの変位を計測するために、図-3に示すようにアンカー筋に変位測定用プレートを取り付けられた。プレートの取り付け位置は、荷重によるアンカー筋の伸びの影響を極力少なくするために、供試体表面から10mm程度のところとした。アンカーの変位は、プレートと、供試体上に設置した変位計測用治具との間に取り付けた3つのひずみ式変位計を用いて計測した。ここで示した変位は、3つの変位計で計測した値の平均値を採用している。各試験体の反力離隔距離(M12試験体は320mm、M16とM20試験体は460mm)は、本アンカーがコーン状破壊する場合の面積を図-2(a)のように仮定し、反力台の影響が出ないようにその距離を決めた。

2.3 試験結果

荷重試験を行って得られた荷重-変位曲線を図-4に示す。また、各試験体の最大荷重とその時の変位量の関係を図-5に、試験結果の一覧を表-3に示す。

これらの結果、アンカー筋が太い程最大荷重は大きくなること、すべての試験体において破壊形式はアンカー筋破断となることがわかった。また、アンカー筋径による最大荷重の変動係数は、いずれの径においても1%以下でばらつきが小さく、再現性のある荷重-変位曲線が得られた。一方、図-5および表-3に示すように、最大荷重を示した点の変位は、最大荷重と比較して変動係

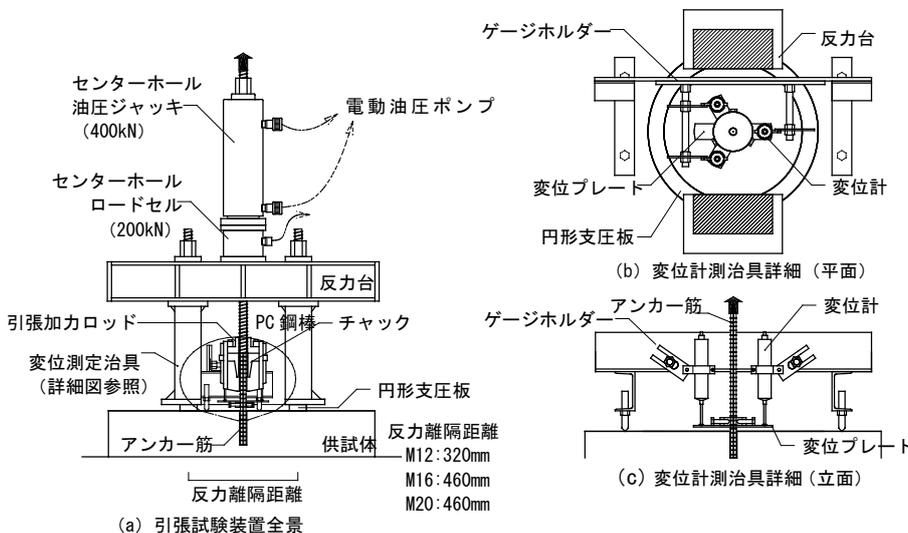


図-3 引張試験装置



写真-2 荷重試験機全景

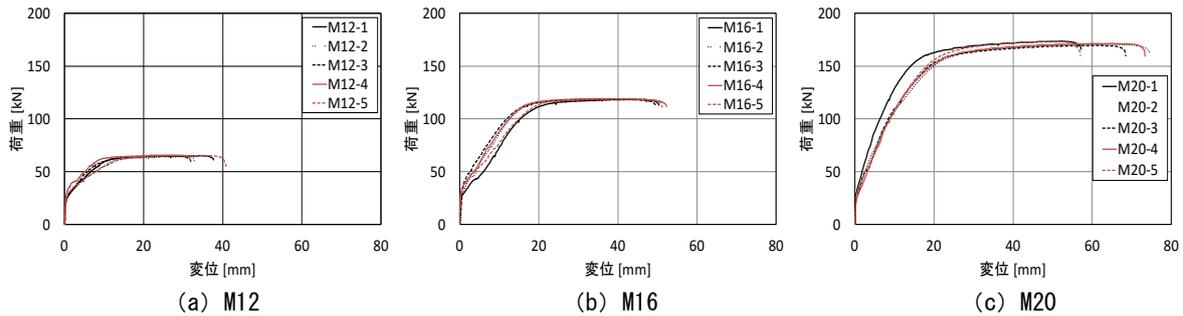


図-4 荷重 - 変位曲線

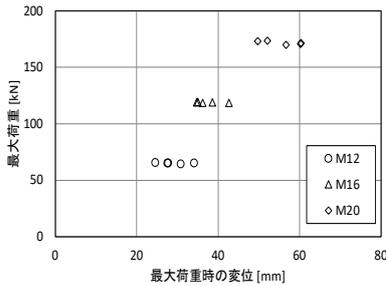
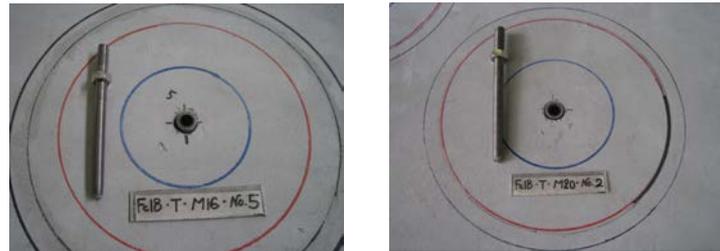


図-5 最大荷重と変位の関係



(a) 試験体番号：M16-5 (b) 試験体番号：M20-2
写真-3 試験後のアンカーの破壊の様子

表-3 試験結果一覧

| 試験体番号 | 荷重 [kN] | | | | 最大荷重時変位 [mm] | | | | 破壊形式 ※1 |
|-------|---------|-------|-------|---------|--------------|------|-------|---------|------------|
| | 最大値 | 平均値 | 標準偏差 | 変動係数[%] | 変位 | 平均値 | 標準偏差 | 変動係数[%] | |
| M12-1 | 65.2 | 65.0 | 0.323 | 0.50 | 34.1 | 28.9 | 3.241 | 11.2 | H |
| M12-2 | 64.5 | | | | 30.8 | | | | H |
| M12-3 | 65.0 | | | | 27.5 | | | | H |
| M12-4 | 65.5 | | | | 24.6 | | | | H |
| M12-5 | 65.0 | | | | 27.7 | | | | H |
| M16-1 | 118.6 | 118.8 | 0.313 | 0.26 | 42.6 | 37.4 | 2.931 | 7.83 | H |
| M16-2 | 119.3 | | | | 35.0 | | | | H |
| M16-3 | 118.4 | | | | 36.2 | | | | H |
| M16-4 | 119.0 | | | | 34.7 | | | | H |
| M16-5 | 118.9 | | | | 38.6 | | | | H |
| M20-1 | 173.6 | 171.7 | 1.414 | 0.82 | 52.1 | 55.8 | 4.270 | 7.65 | H |
| M20-2 | 170.7 | | | | 60.2 | | | | H |
| M20-3 | 169.8 | | | | 56.6 | | | | H |
| M20-4 | 171.4 | | | | 60.3 | | | | H |
| M20-5 | 173.0 | | | | 49.7 | | | | H |

※1：Hはアンカー筋の破断を示す。

数が大きくなることが確認された。これは、アンカー筋の破断位置が試験体毎に違ったことによるものと思われる。なお、写真-3は載荷後のアンカーの様子を示したものであるが、アンカー本体の位置は載荷前とほぼ同じで、載荷によるアンカー本体の抜け出しはほとんど見られなかった。

3. 施工面にひび割れがある場合の引張載荷重試験

3.1 試験装置概要

一般的には、アンカーの施工個所にひび割れが生じた場合、アンカーの耐力は著しく低下する。そこで、ひび割れが本アンカーの耐力特性に与える影響を確認するため、図-6および写真-4に示すような試験機（以降、ひび割れ試験機とする。）を製作し、引張載荷試験（以降、ひび割れ試験とする。）を行った。図示のとおり、ひび割れ試験機はコンクリート供試体が固定された一対のガ

イドと可動ブロックで構成される。図示のように、供試体の接合部上面にアンカーを施工し、可動ブロックを左右にスライドさせてひび割れを発生させる機構となっている。アンカーは、ロードセルを介してエアージャッキに接続され、引張方向の力が与えられる。ここでは、ひび割れに対する本アンカーの耐力特性の変化を明らかにすることに加え、本試験機で精度の高い試験結果が得られるか確認するため、アンカーに一定の引張力を与えながら供試体のひび割れ幅を徐々に大きくする方法で試験を行った。試験には、前節に示したM12、M16アンカー試験体を用い、それぞれ1本ずつ載荷した。引張荷重はジャッキとアンカーの間に接続したロードセルで計測した。また、アンカーの変位は、アンカー筋に固定した計測用プレートに取り付けた3台のレーザー変位計で、ひび割れ幅は供試体の両側面と上面に設置した6

台のレーザー変位計により測定した。ここで示すアンカーの変位とひび割れ幅は、各変位計で測定した値の平均値とした。本試験で用いたコンクリート供試体の実圧縮強度は 19.0N/mm^2 である。

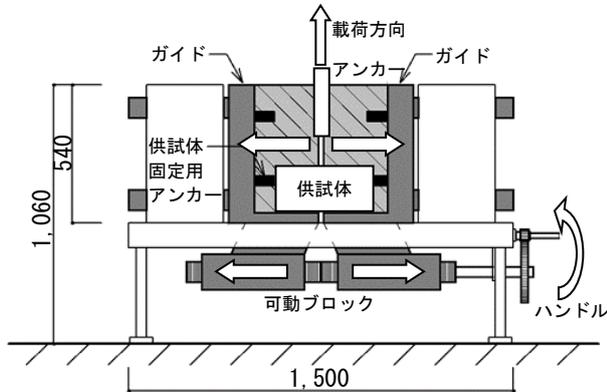


図-6 ひび割れ試験機の概要 (単位: mm)



写真-4 ひび割れ試験機全景

3.2 試験結果

ひび割れ試験を行って得られた結果の代表的な例を図-7に、荷重後のアンカーの様子を写真-5示す。図は、長期許容引張荷重相当の力を与えながらひび割れ幅を徐々に大きくして得られた、ひび割れ幅に対するアンカーの抜け出し量および引張荷重の関係を表したものである。

これらの結果、アンカー本体が完全に抜け出した時のひび割れ幅は、M12 試験体で 4.7mm, M16 試験体では 7.1mm であった。既往の研究⁹⁾より、一般的な接着系アンカー (アンカーボルト M16, 埋込深さ 8d) の場合、ひび割れがない時の最大荷重は 72.4kN であったのに対して、施工面に 0.2mm のひび割れがある状態では 31.7kN にまで低減することが実験的に確認されている。それに対し本アンカーの場合、ひび割れ幅が大きくなってもアンカーが抜け出すまで荷重の低下がみられなかったことから、本アンカーの優位性が示されたと思われる。また、本試験機が目標とするひび割れ幅に対して十分な精度で制御できることを確認した。

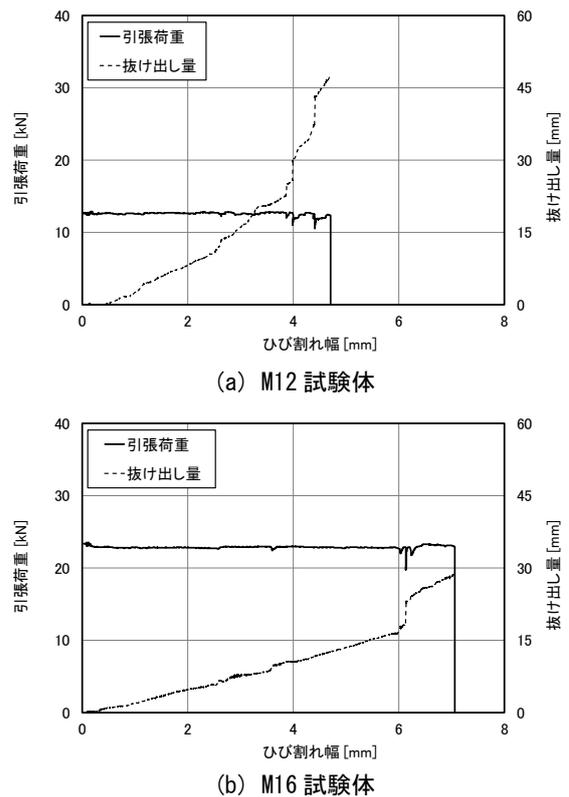


図-7 引張荷重試験結果



写真-5 荷重後のアンカーの様子 (M16 試験体)

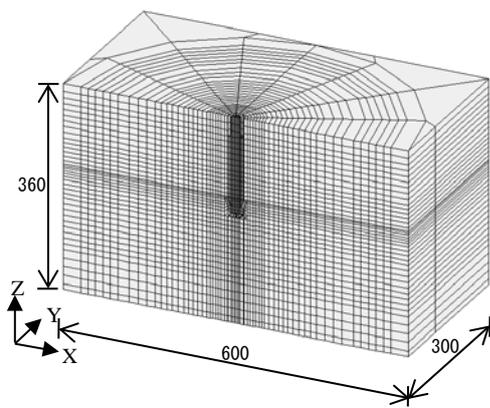
4. FEM 解析

4.1 解析モデルの概要

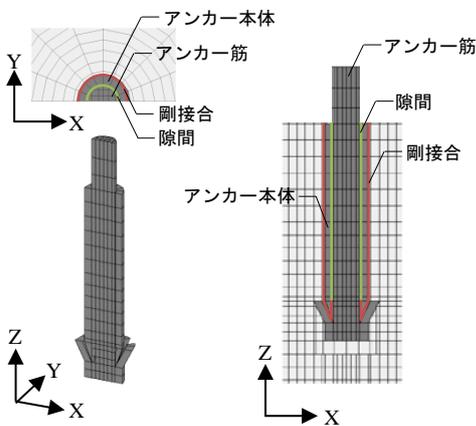
本アンカーの力学的挙動と応力度分布を確認するため、3次元 FEM 解析を行った。解析には汎用非線形 FEM 解析プログラム FINAL⁷⁾を用いた。解析モデルの概要を図-8に示す。本報では前述の M16 試験体を対象とし、対称性を利用してアンカーの中心線を通る鉛直面に対して半分をモデル化した。コンクリートは、 $600\text{mm} \times 300\text{mm} \times 360\text{mm}$ としてモデル化した。各要素のメッシュについては、アンカー周辺の応力分布を詳細に確認できるようにアンカー本体周辺を細かく分割している。X-Y 平面は、アンカーの中心から軸対称に放射状に要素を分割した。X-Z 平面は、アンカーが埋め込まれた部分を 2~10mm, それより深い部分については 8~15mm 間隔に要

素を分割した。コンクリートおよびアンカーは 8 節点アイソパラメトリック要素（以降、六面体要素とする。）とした。

引張載荷試験の結果、載荷によるアンカー本体の抜け出しはほとんど見られなかったことから、アンカー本体とコンクリートとの境界面は剛接合とした。アンカー本体とアンカー筋の間には隙間を設け、応力の伝達を考慮して拡張部周辺のみ剛接合とした。また、拡張部の節点のみをコンクリートと共通の節点とした。境界面の拘束条件については、X-Z 平面では Y 方向並進、Y-Z 平面では X 方向並進のみを拘束した。コンクリート底面については、X、Y、Z 方向並進を拘束した。



(a) 要素分割（単位：mm）

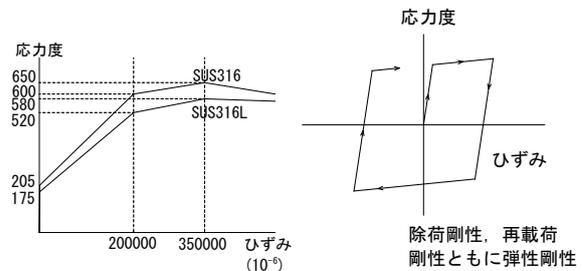


(b) アンカー詳細

図-8 解析モデル

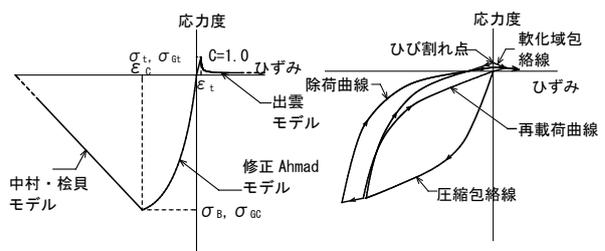
アンカーの材料構成則を図-9に示す。材料特性として、本アンカーの材質が SUS316, SUS316L であることから、初期応力度をそれぞれ 205 N/mm², 175 N/mm² とし、降伏後については応力度 - ひずみ関係を多点折線⁸⁾で定義した。また、アンカーの多軸応力下の降伏条件には von Mises の降伏条件を用いた。ポアソン比はそれぞれ 0.28 とした。コンクリートの材料構成則を図-10に示す。コンクリートの材料特性として、圧縮強度までは

修正 Ahmad モデル⁹⁾を用い、圧縮軟化域の特性は破壊エネルギーに基づく中村・楢貝モデル¹⁰⁾を用いた。また、三軸応力下の破壊条件は Willam-Warnke の 5 パラメータモデルに大沼らの係数⁹⁾を用いた。一方、引張側は引張強度までは線形と仮定し、出雲モデル¹¹⁾を用いて引張剛性を考慮した。圧縮強度を 19.0 N/mm²、ヤング係数を 2.0 × 10⁴N/mm² とし、ポアソン比は 0.2 とした。



(a) 応力度-ひずみ関係⁸⁾ (b) 履歴特性

図-9 アンカーの材料構成則



(a) 応力度-ひずみ関係 (b) 履歴特性

図-10 コンクリートの材料構成則

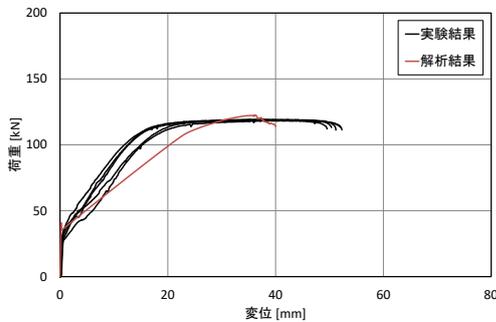
載荷は、アンカー頂部の頂点に Z 方向の強制変位を与える方法で行い、荷重がピークを示す点を確認するまで解析を継続した。引張力は、Z 方向の支点反力の総和を 2 倍して求めた。

4.2 解析結果

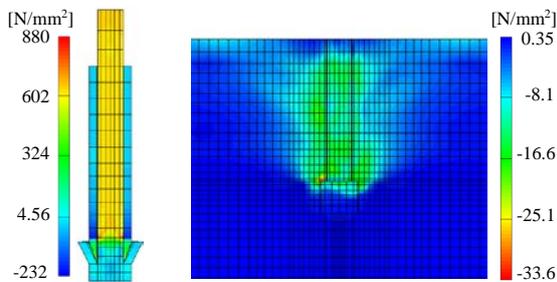
試験結果と、解析により得られた荷重 - 変位曲線との比較を図-11に示す。その結果、荷重 - 変位曲線における最大荷重と初期剛性は、試験結果と概ね対応することを確認した。一方、降伏後の剛性や最大耐力を示した後の履歴については、十分な精度で試験結果を再現することはできなかった。この要因として、施工後における拡張部の開き度合いが解析モデルと実際のアンカーでわずかに異なったことでコンクリート供試体への固着力に差が生じたことが考えられる。

次に、最大荷重時のコンクリートとアンカーの応力度分布を図-12に示す。図-12(a)に示すように、アンカーには拡張部付近を中心にアンカー筋全体に大きな応力が生じることを確認した。前述のとおり、本アンカーの破壊形式はアンカー筋破断であり、解析の結果はアンカーの破壊性状に対応する結果となった。また、図

ー 1 2 (b) に示すように、アンカー先端の拡張部を中心にコンクリート内部を放射状に応力が伝達している。このことから、コンクリートに対して拡張部が機能していることが確認できる。また、剛接合としたアンカー本体表面とコンクリートとの接合面にそって応力が高くなることがわかる。



図一 1 1 解析結果と試験結果の比較



(a) アンカー最大主応力分布 (b) コンクリート最小主応力分布

図一 1 2 最大荷重時の応力度分布
($\delta=36.2\text{mm}$, X-Z 面)

5. まとめ

筆者らが提案した拡底式あと施工アンカーを対象に、引張荷重試験とひび割れ試験、および3次元有限要素解析を行い、得られた結果に基づき、本アンカーの基本的な耐力特性について検証し、以下に示す知見を得た。

- 1) アンカーの拡底部を上向きに拡張することにより、コンクリート母材への固着度が高まり、安定した耐力を発揮する。
- 2) 長期荷重に相当する力が作用している場合、比較的大きなひび割れに対しても本アンカーは耐力を維持できる。
- 3) 本報で示した解析モデルによる最大荷重と初期剛性は、試験で得られた結果と概ね対応した。剛性については、初期剛性は試験結果に対応するものの、降伏後の剛性は試験結果に比べ低くなる。
- 4) アンカーには、拡張部付近を中心にアンカー筋全体に大きな応力が生じる。
- 5) アンカー先端の拡張部を中心にコンクリート内部を

放射状に応力が伝達しており、コンクリートに対して拡張部が機能していることを確認した。また、剛接合としたアンカー本体表面とコンクリートとの接合面にそって応力が高くなることがわかった。

参考文献

- 1) 船木尚己, 澁谷陽, 藤田正吾, 大沼正昭, 田中礼治: 拡底式あと施工アンカーに関する研究 その 1 突起金物を用いたアンカーの引張試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 23189, pp.377-378, 2017.9
- 2) 大沼正昭, 澁谷陽, 船木尚己, 田中礼治: 拡底式あと施工アンカーに関する研究 その 2 金属系と接着系を併用したハイブリッド型アンカーの引張試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 23190, pp.379-380, 2017.9
- 3) 船木尚己, 澁谷陽, 阿部伸, 藤田正吾, 畑中友, 大沼正昭, 田中礼治: 拡底式あと施工アンカーに関する研究 その 3 突起金物を用いたアンカーのせん断試験, 日本建築学会東北支部研究報告集構造系第 81 号, C-17, pp.61-64, 2018.6
- 4) 阿部伸, 澁谷陽, 船木尚己, 古寄滋, 畑中友, 大沼正昭, 田中礼治: 拡底式あと施工アンカーに関する研究 その 4 L 型アンカーの力学的性状, 日本建築学会東北支部研究報告集構造系第 81 号, C-18, pp.65-68, 2018.6
- 5) 畑中友, 船木尚己, 田中礼治, 藤田正吾: 突起金物を用いた拡底式あと施工アンカーの3次元有限要素解析による性能評価, コンクリート工学年次論文集 Vol.41, No.2214, pp.1279-1284, 2019.7
- 6) 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, 2015.7
- 7) 伊藤忠テクノソリューションズ(株): FINAL HELP
- 8) 新潟県工業技術総合研究所: <http://www.iri.pref.niigata.jp/topics/H30/30kin2.html> (閲覧日: 2019年12月30日)
- 9) 長沼一洋: 三軸圧縮応力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) H. Nakamura, T. Higai: Compressive Fracture Energy and Fracture Zone Length of Concrete, Seminar on Post-peak Behavior of RC Structures Subjected to Seismic Load, JCI-C1E, Vol.2, pp.259-272, Oct.1999
- 11) 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.87.9-1, pp.107-120, 1987.9