論文 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

畑中 友*1·船木 尚己*2·田中 礼治*3·藤田 正吾*4

要旨:突起金物によりコンクリート母材に固着させる形式の拡底式あと施工アンカーを対象に、その力学的 特性と応力分布を確認することを目的として、引張載荷試験および3次元有限要素解析を行った。アンカー 筋径およびコンクリート強度をパラメータとして行った載荷試験の結果、試験体ごとのばらつきが小さい安 定した耐力を発揮することがわかった。また、本アンカーを対象として行った3次元有限要素解析により概 ね試験結果を再現でき、本アンカーの引張載荷時の応力分布は、拡底部を中心に放射状に広がる性状を示す ことを確認した。

キーワード:あと施工アンカー,拡底式,引張載荷試験,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物理的な要因については, 経年による耐震性能の低下が挙げられる。また、機能的 要因として,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などがある。これらの問題を 解決するために耐震改修やリノベーションなどが施さ れており,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いる。 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、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を提 案するとともに,経年や地震等によるコンクリート母材 の劣化がアンカーの性能におよぼす影響を評価する手 法を構築することが喫緊の課題であると考える。

本研究は、効率の良い形状の拡底式あと施工アンカー を提案することを目標として、形状の異なる複数の拡底 式あと施工アンカーの引張およびせん断載荷試験を行 って得られた結果に基づき、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検証した^{1), 2)}。また、 拡底式アンカーのコンクリート母材へのより高い固着 性を得るために、接着剤を併用したハイブリッド型アン カーについて引張載荷試験に基づき、その基本的な力学 特性を確認してきた^{3), 4)}。さらに、アンカーの施工面に 生じたひび割れが、アンカーの性能におよぼす影響につ いて評価するためのひび割れ試験機を考案し、本試験機 による引張載荷試験を行って得られた結果に基づき、試 験方法の妥当性などを検証してきた。

本報では,筆者らが提案した拡底式あと施工アンカー を対象とした3次元の有限要素解析を行って得られた結 果に基づき,既発表の実験結果と比較することにより解 析モデルおよび解析手法の妥当性について検討する。ま た,解析によって得られた結果から,引張載荷時におけ るアンカーとコンクリート母材の応力度分布を確認す ることを目的とする。

2. 引張載荷重試験

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 ー全景を**写真-1**、アンカーを構成する各部材の寸法を

	本体			爪		リング		コーン				
名称	全長 [mm]	外径 [mm]	内径 [mm]	開口部 幅×高さ [mm]	長さ [mm]	幅 [mm]	厚さ [mm]	外径 [mm]	厚さ [mm]	全長 [mm]	外径 [mm]	ネジ 部 [mm]
M10	50.0	14.0	M10	9.9×5.2	7.0	9.7	5.0	3.5	4.5	27.0	6.0	10.0
M12	65.0	17.5	M12	12.4×5.2	8.6	12.2	5.0	5.0	4.0	35.2	7.7	12.9

表-1 アンカー寸法一覧(材質:SUS304)

*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

表-1に示す。本アンカーは、本体、突起金物(以降, 爪とする。), コーンおよびリングで構成されている。図 示のとおり、本体側面には矩形の開口が2ヵ所設けられ ており、その位置に爪が内蔵されている。コーンを本体 の先端方向にねじ込むことにより,本体開口部に内蔵さ れた爪が本体の外側にせり出すことでアンカーをコン クリート母材に固着させる。アンカー本体の先端に取り 付けられたリングは本体と一体化しており、コーンの先 端が本体から飛び出さないようにストッパーの役割を 持つ。アンカーの各部品の材質は SUS304, 施工後にア ンカー本体に取り付けるアンカー筋は SS400 である。ア ンカー試験体の一覧を表-2に示す。表に示すとおり, 試験体の条件は、アンカー本体の形状と供試体のコンク リート圧縮強度が異なる6種類とし、それぞれ5本のア ンカーについて引張載荷試験を行った。アンカーを施工 するコンクリート供試体は, 平面寸法 1,800mm× 1,200mm, 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。一 つの供試体に対し 10~12 本のアンカーを下向きに施工 した。図-2に示すとおり、アンカーの施工手順につい ては、ストレート型のドリルで供試体に穿孔した後、専 用の拡張ビットを用いて図-2(a)に示すような形状 に穿孔する。穿孔後、孔の内部に残ったほこり等を掃除 機で清掃した後アンカーを挿入し、インパクトドライバ ーでコーンをアンカー先端方向にねじ込み、爪を開かせ ることでアンカーを固定した。このとき、アンカーの最 大拡張幅は M10 で 19.0mm, M12 で 25.0mm であり, 支 圧を受ける面積は39.8mm²,75.7mm²となる。

2.2 試験方法

載荷試験に使用した加力装置について図-3に示す。 載荷試験には,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



(a)本体(c) A-A' 断面 (コーン挿入後)図ー1アンカー詳細

表-2 試験体概要

試験体名称 例:Fc18-M10-1~5 ① ② 番号	コンクリート供試体 圧縮強度 [N/mm ²]	アンカー筋 種類
Fc18-M10-1~5	18 (20.2) *	M10
Fc18-M12-1~5	18 (20.3)	M12
Fc27-M10-1~5	27 (20.5) *	M10
Fc27-M12-1~5	27 (30.5)	M12
Fc36-M10-1~5	26 (24.5) *	M10
Fc36-M12-1~5	50 (34.5)	M12

① 目標圧縮強度(18 N/mm², 27 N/mm², 36N/mm²)

アンカー筋種別 (M10, M12)

※:()内の数値は載荷試験当日に測定した供試体の実圧縮強度







写真一1 アンカー全景 (挿入後の状態) (左:M10 用, 右:M12 用)



方法により行った。測定について、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、図-3に示すようにア ンカー筋に変位プレートを設置した。このとき、変位プ レートを設置する位置はアンカー筋の弾性変形の影響 を極力少なくするため、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、変位プレートと供試体 上に設置した変位計測用治具の間に取り付けた3つの変 位計を用いて計測した。ここで示した変位量は、3箇所 の測定値の平均を採用している。

2.3 試験結果

載荷試験を行って得られた代表的な荷重 - 変位曲線 を図-4に、試験後の様子を写真-2にそれぞれ示す。 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、 供試体のコンクリート強度が同じ場合,アンカー筋径が 太い程最大荷重は大きくなることが確認された。アンカ 一筋径が等しい場合, Fc18 試験体の最大荷重は, Fc27, Fc36 両試験体の最大荷重と比較して小さくなる。また, Fc27 と Fc36 試験体の結果を比較した場合,最大荷重に は大きな差は見られず, その要因のひとつとして各試験 体の供試体の実圧縮強度に大きな差がなかったことが 考えられる。本試験においては、すべての試験体で供試 体のコーン状破壊が先行する結果となった。しかしなが ら,一部の試験体ではコーン状破壊した後にアンカーが 抜け出すものが見られた。抜け出したアンカーの全景を 写真-3に示す。写真に示すように、抜け出したアンカ



写真-2 試験後の様子



ーの開口部には歪みが生じていることがわかる。爪に応 力が集中することで開口部が歪み,爪が本体から抜けた ことにより供試体との固着度が小さくなったと考えら れる。

試験体名称		最大	最大荷重時	破壞 ※
Fc	試驗休悉号	荷重	変位	形式
10	14 40八件 田 75	[kN]	[mm]	70-1
18	M10-01	12.9	5.18	C
	M10-02	14.4	8.98	C
	M10-03	12.6	7.42	C
	M10-04	14.4	6.29	C
	M10-05	13.2	7.47	С
	M12-01	21.8	11.3	С
	M12-02	23.5	10.5	$C \rightarrow N$
	M12-03	23.4	8.93	$C \rightarrow N$
	M12-04	24.4	8.65	$C \ \rightarrow \ N$
	M12-05	22.8	7.24	С
	M10-01	18.2	8.27	С
	M10-02	18.1	9.47	С
	M10-03	16.1	6.61	С
	M10-04	17.6	6.26	С
	M10-05	19.7	9.49	С
27	M12-01	29.0	10.5	$C \rightarrow N$
	M12-02	29.1	8.96	$C \rightarrow N$
	M12-03	28.5	11.1	$C \rightarrow N$
	M12-04	30.4	10.4	$C \rightarrow N$
	M12-05	28.8	8.62	С
	M10-01	17.5	9.64	С
36	M10-02	16.9	8.26	С
	M10-03	16.5	8.49	С
	M10-04	16.1	9.99	С
	M10-05	15.3	10.5	С
	M12-01	28.8	12.0	С
	M12-02	27.4	12.1	С
	M12-03	27.9	11.5	С
	M12-04	27.3	11.4	С
	M12-05	26.6	10.7	С

表-3 試験結果一覧

※C:コーン破壊 N:アンカー本体の抜け出し



写真-3 抜け出したアンカーの様子

アンカーの最終破壊形態は試験体ごとに異なり,本試 験でパラメータとしたコンクリートの圧縮強度やアン カー筋径との間には明確な相関関係は確認できなかっ た。これらについては,試験方法や施工精度などにも大 きく影響するものと思われ,詳細な検証については今後 の課題としたい。

3. FEM 解析

3.1 解析モデルの概要

本アンカーの拡底形状が力学的挙動および応力度分 布に与える影響を確認するため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 FINAL⁵⁾ を用いた。解析モデル概要を図-6に示す。本論では M12のアンカーを対象とし、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。前 述のとおり、アンカーは本体先端に設けた開口部からコ ーンにより爪が押し出されコンクリート母材に固着す るものであるが、本体と爪は固定されていない。解析モ デルでは本体と爪部分を一体型としてアンカーをモデ ル化した。コンクリートは、500mm×250mm×400mm 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 5~10mm、それより 深い部分については 10~20mm 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。

アンカー本体とコンクリートとの間に隙間を設け,拡 張させたアンカー爪部分の外周部分の節点のみをコン クリートと共通の節点とした。境界面の拘束条件につい



(a) 要素分割(単位:mm)









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。

アンカーの材料構成則を図-7に示す。アンカーの材 料特性として, 圧縮側, 引張側ともに Bi-linear モデルと し, 降伏後の剛性は初期剛性の 1/1000 倍とした。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。アンカーの材質は SUS304 であることか らヤング係数を 1.93×10⁵N/mm² とした。また, ポアソン 比は 0.3 とした。

コンクリートの材料構成則を図-8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^のを用い, 圧縮軟化域の特性は破壊エネルギーに基づ く中村-桧貝モデル⁷を用いた。また, 三軸応力下の破壊 条件は Ottosen の4パラメータモデル⁹を用いた。一方,

15

__解析結果

-実験結果

5

δ [mm]

(a) Fc18-M12

30

₩ 20

10

0

表-4 試験体パラメータ(コンクリート)

	圧縮強度 [N/mm ²]	引張強度 [N/mm ²]	ヤング係数 [N/mm ²]	ポアソン比
Fc18	22.0	2.2	2.1×10^{4}	0.2
Fc27	26.4	2.64	2.3×10^{4}	0.2
Fc36	35.5	3.55	2.7×10^{4}	0.2

引張側は引張強度までは線形と仮定した。また、出雲モ デル⁸⁾を用いて引張剛性を考慮した。解析に用いたコン クリートのパラメータを**表-4**に示す。

載荷は、アンカー頂部の節点に 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 解析を行った。引張力は Z 方向の支点反力の総和を 2 倍 して求めた。

3.2 解析結果

解析により得られた荷重 - 変位曲線を,試験結果と比較したものを図-9および図-10に示す。これらの結果,最大荷重については解析結果と試験結果が概ね対応しているものの,Fc27においてはその結果に差が生じた。 解析結果では,コンクリート強度が大きいほど最大荷重が大きくなる傾向を示すことから,前述のように試験結果についてより詳細に検討する必要があると考える。剛性については,試験結果に比べ大きな剛性を示す結果となった。この原因として,実際のアンカーは本体と爪が固定されていないのに対し,解析は本体と爪を一体型としてモデル化したことや,試験における変位がアンカー本体だけでなく,アンカー筋の弾性変形を含めて計測し



(c) Fc36-M12

(b) Fc27-M12 図-9 解析結果と試験結果の比較

5

実験結果

30

Z 20

10

0

20



ていることが考えられる。

次に、コンクリート強度別の最小主応力度分布の様子 を図-11に示す。このとき、変位は拡底形状が応力分 布に与える影響を確認することを目的としたことから、 コンクリートの損傷が最も少ないδ=0.02mmとした。図 に示すように、すべてのケースにおいてアンカーの爪が 接している部分に応力が集中していることが確認でき る。また、応力の広がり方はコーン状であり、爪の底面 部分から45°の角度で広がることを確認した。

4. 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, 3 次元有限要素解析を行い,得られた結果に基づき,解 析モデルおよび解析手法の妥当性について検証した。ま た,拡底式アンカーの引張載荷時におけるコンクリート 母材の応力分布の状態について確認し,以下に示す知見 を得た。

- 1. 本報で示した解析モデルによる最大荷重の結果は, 実験で得られた結果と概ね対応した。
- 副性については、解析値が高くなる傾向を示し、本 アンカーの実態に即したモデルの構築が必要である ことがわかった。
- 本アンカーの場合、コンクリート母材の応力分布は アンカーの爪が接している拡底された部分に応力が 集中し、そこから放射状に応力が分布することがわか った。

謝辞

本研究の解析モデル構築にあたり,東京工業大学環 境・社会理工学院建築学系の石田雄太郎氏に貴重なご助 言をいただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

 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) 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
- 3) 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
- 4) 阿部伸, 澁谷陽, 船木尚己, 古嵜滋, 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) 伊藤忠テクノソリューションズ(株): FINAL HELP
- 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
- 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
- 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
- 9) 長沼一洋:非線形ポアソン効果を考慮した三軸応力下のコンクリートの直交異方向構成モデル,日本建築学会構造系論文集,No.485, pp.109-116, 1996.7
- (社)日本あと施工アンカー協会: JCAA「あと施 エアンカー設計指針(案)・同解説」,2005
- 11) 石田雄太郎,坂田弘安,高瀬裕也,毎田悠承,佐藤 匠: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