

論文 ねじ式拡張型あと施工アンカーの力学特性に関する基本的研究

小柴 夕季^{*1}・今本 啓一^{*2}・清原 千鶴^{*3}

要旨: 本研究は、新たに開発されたねじ式拡張アンカーの基本性能を調査したものである。アンカーの種類と埋め込み深さを実験要因として、コンクリートに施工したアンカーに対して引張試験を行うことで、引抜き性状への影響を確認した。また、有限要素解析を行うことで応力状態を把握した。本実験の結果として、ねじ式拡張アンカーは従来アンカーよりもコンクリートとの固定度が高く、耐力も向上することを確認した。これらより、ねじ式拡張アンカーの耐力推定式の提案を行った。

キーワード: あと施工アンカー, 引張試験, 有限要素解析, アンカー耐力推定式

1. はじめに

現在、金属系拡張アンカーは、抵抗機構として先端部を拡張することによるくさび効果が主なものとなっている。従来の金属系拡張アンカーは打込み式と締付け式が主な拡張方法であったが、今回、新たに拡張方法をねじ式とした拡張アンカー(以下、新型アンカー)を開発した。このアンカーは拡張部の形状や施工方法が従来の拡張アンカーとは異なったものとなっており、従来の耐力推定式との適応性や、母材コンクリートへの応力伝達性状などが不明である。

本研究では、新型アンカーと従来の打込み式の拡張アンカーの比較試験を行うことで、埋め込み深さが引抜き性状へ及ぼす影響を確認し、有限要素解析を用いて応力状態を把握した後に、耐力推定式の提案を行うことを目的としている。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

表-1 に試験体アンカーの実験要因一覧、図-1 にアンカー形状と拡張方式を示す。新型アンカーは、アンカー本体のねじ部に内蔵した部品を締め込むことでアンカー先端部を押し出し、コンクリートに定着させた。

実験要因は、アンカーの種類と埋め込み深さ(l)とした。アンカーのねじ部サイズは M10、種類は新型アンカー(D)と従来の本体打込み式アンカー(以下、従来アンカー(C))の2種類、埋め込み深さを $3da$, $4da$ (Dのみ), $5da$, $6da$ (da : アンカー外径)と変動させた。1水準につき、試験体は2体とした。

母材コンクリートの品質を表-2 に示す。母材コンクリートは $400 \times 500 \times 200\text{mm}$ の2体とした。アンカー施工はコンクリート打設面と底面に行い、各要因を打設面と底面に1体ずつ施工した。なお、本実験ではコンクリート打設

表-1 試験体アンカー実験要因および実験結果一覧

試験体名	アンカー種類	埋め込み深さ l (mm)	全長 (mm)	アンカー外径 da (mm)	ねじの呼び	穿孔径 (mm)	穿孔 拡張径 (mm)	母材コンクリートのアンカー 施行面	実際の埋め込み深さ l (mm)	最大引張荷重 (kN)	破壊形態							
D-3da D-4da D-5da D-6da	新型アンカー	3da(42.0)	50.0	14.0	M10	14.5	16.5	表	42.3	11.12	コーン状破壊							
		裏						40.2	13.02	コーン状破壊								
		表						55.4	22.06	コーン状破壊+割裂破壊								
		裏						54.0	23.68	コーン状破壊+割裂破壊								
		表						71.1	33.24	鋼材破断								
		裏						69.3	31.37	コーン状破壊+アンカー破壊								
		表						81.2	33.55	鋼材破断								
		裏						82.7	40.05	コーン状破壊+割裂破壊								
C-3da C-5da C-6da	従来アンカー (本体打込み式)	3da(42.0)	40.0	14.0	M10	14.5	16.5	表	42.5	13.16	コーン状破壊							
		裏						41.9	8.80	コーン状破壊+割裂破壊								
		表						67.8	24.78	コーン状破壊+割裂破壊								
		裏						68.7	18.60	コーン状破壊+割裂破壊								
		表						82.9	31.21	コーン状破壊								
		裏						79.0	25.05	コーン状破壊+割裂破壊								
		規格番号						名称										
		アンカー材料規格						JIS G3459/G4305			配管用ステンレス鋼管 又は 冷間圧延ステンレス鋼板及び鋼帯			記号				
									SUS304TP材									

*1 東京理科大学大学院 工学研究科 建築学専攻 (学生会員)

*2 東京理科大学 工学部 建築学科 教授 博士(工学) (正会員)

*3 東京理科大学 工学部 建築学科 補手 博士(工学) (正会員)

面を表面、底面を裏面と定義する。

2.2 アンカーの施工方法

図-2 に従来の打ち込み式アンカー用の打ち込み器の模式図を示す。従来アンカーは穿孔用振動ドリルで直径 14.5mm の孔を穿ち、孔に打ち込み棒をセットしたアンカーを挿入した後に、打ち込み強度を一定にするため、打ち込み器に設定した約 5kg の錘を落下させることにより、アンカーを施工した。

新型アンカーは従来アンカーと同様に穿孔した後に、湿式ドリルにより孔の先端部を拡張した。18V 以上の電動ドライバを 10 秒間使用し、アンカー本体のねじ部に内蔵した部品を締め込むことでコンクリートにアンカーを固定させた。なお、アンカー施工は引張試験の前日に行い、アンカーの施工ピッチは 7.5da 以上とした。

2.3 荷重方法・測定項目

図-3 に試験機の模式図を示す。試験は引抜き試験機を使用し、油圧ジャッキで荷重した。油圧ジャッキに圧力計を接続することで試験体に作用した圧力を測定した。試験機のセンターシャフト上部に圧板を添え付け、さらに、変位計を設置し、アンカーの引抜き変位を測定した。反力台

脚部にそれぞれひずみゲージを 2 箇所設置し、荷重時に反力台脚部が生ずるひずみも測定し、圧力計との比較を行った。なお、アンカーとセンターシャフトの接続には材質が SUS304 の寸切りボルトを使用した。

また、母材コンクリートに対してはアンカー施工前にトレント法による表層透気試験を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 透気係数の影響

図-4 に透気係数と荷重の関係を示す。裏面の透気係数が表面よりも 2~7 倍高い値となった。図-5 に従来アンカー(C)、図-6 に新型アンカー(D)の荷重初期段階における荷重と変位の関係を示す。従来アンカーでは、変位が 5mm 程度のときに C-3da(表)の荷重が 10kN 程度であったのに対し、C-3da(裏)の荷重は 5kN 程度であった。また、新型アンカーの埋め込み深さが 3da, 5da, 6da の結果では、同一荷重時の変位は、裏面よりも表面の方が小さい値を示している。これらのことから、コンクリートの透気性が新型アンカーの引抜き性状に対しても、影響を与えていると考える。既存構造物では表層品質に大きな差異のあることが一般

表-2 母材コンクリートの品質

W/C(%)	単位量(kg/m ³)						材齢28日強度(N/mm ²)		試験当日強度(N/mm ²)	
	水	セメント	細骨材	粗骨材	AE減水剤	空気量調整剤	圧縮	引張	圧縮	引張
57.4	176	306	765	1029	3.06	0.018	36.6	3.42	38.5	3.53

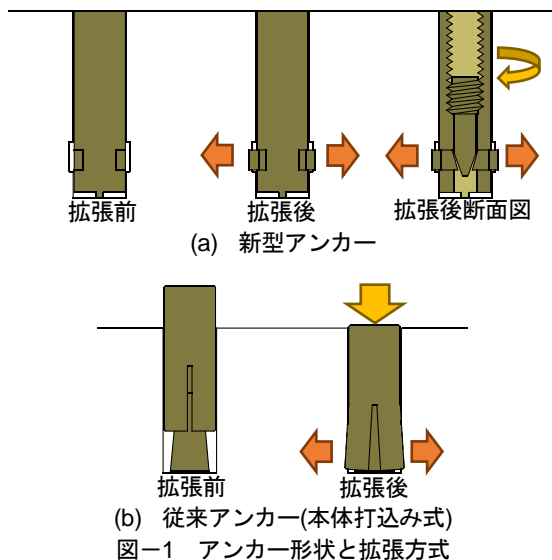


図-1 アンカー形状と拡張方式

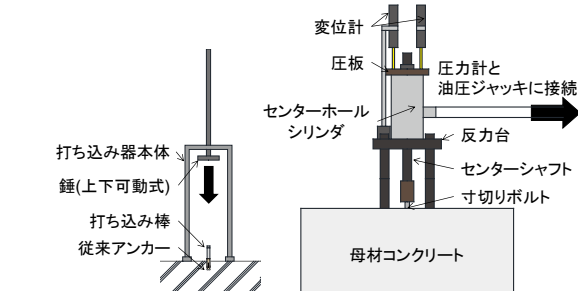


図-2 打ち込み器模式図

図-3 試験機模式図

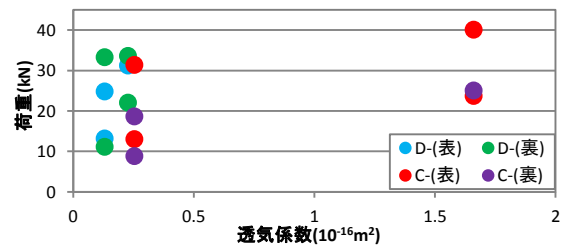


図-4 透気係数と荷重の関係

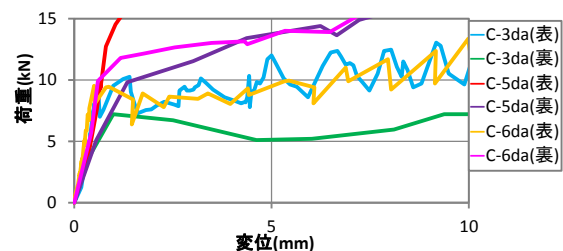


図-5 従来アンカーの荷重-変位曲線(荷重初期)

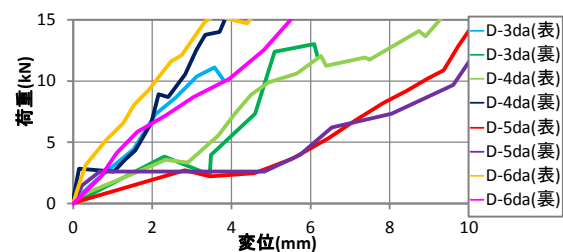


図-6 新型アンカーの荷重-変位曲線(荷重初期初期)

に知られており、このような透気係数とアンカー引抜き耐力との関連を今後蓄積することが重要と考える。

3.2 反力台脚部のひずみと荷重の関係

図-7 に D-4da(表)における反力台脚部のひずみと荷重の関係を示す。鋼材のヤング係数を一定と仮定すると、応力とひずみは比例的に増加するため、載荷時の反力台脚部のひずみと荷重も同様に比例関係にあると考えることができる。D-4da(表)において、ひずみと荷重はほぼ比例的な直線で表されているが、荷重が 11kN 付近ではばらつきが生じている。これは、載荷の際、母材コンクリート表面に発生した割裂の影響で、十分な反力が得られなかったと考える。なお、従来アンカーでも同様の傾向が確認できた。このことから、載荷時の荷重の変化は反力台脚部のひずみより確認できると考える。

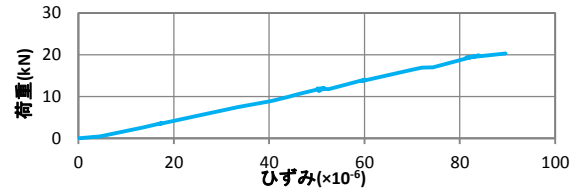
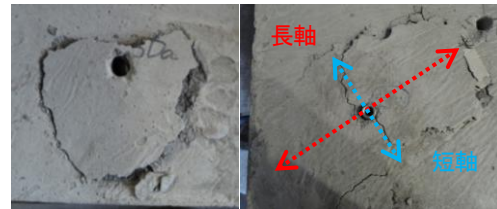


図-7 反力台脚部のひずみと荷重の関係(D-4da(表))



(a) コーン状破壊 (C-3da(表)) (b) コーン状破壊+割裂破壊(D-4da(表))

3.3 破壊性状

図-8 に特徴的な破壊形態、表-3 に破壊サイズ一覧を示す。表-3 における長軸と短軸の測定位置はアンカー拡張部位置とは関係なく、実際の破壊の長軸と短軸を測定した。新型アンカーの破壊性状は、埋め込み深さが 3da はコーン状破壊、4da 以上はコーン状破壊と割裂破壊の組み合わせ破壊であったが、D-5da(表)と D-6da(表)は寸切りボルトが破断するものであり、D-5da(裏)に至っては微小なコーン状破壊とアンカー破壊が確認できた。また、新型アンカーのコーン状破壊は楕円状の形態であり、コーン状破壊面積は埋め込み深さが深くなるにつれて破壊面積が大きくなる傾向が確認できた。なお、コーン状破壊は埋め込み深さ位置からの 45° の破壊ではなく、コーン状破壊深さは破壊面積に比例して増加している傾向が確認できた。これは拡張部においてすべりが生じていることが考える。図-9 に裏面に施工した新型アンカーの試験後の様子を示す。埋め込み深さが深くなるにつれてアンカー自体に変形が生じている。一方、従来アンカーの破壊性状は 3da がコーン状破壊、5da 以上はコーン状と割裂破壊の組み合わせ破壊であった。なお、通常、埋め込み深さが長くなると破壊面積は増大するが、従来アンカーにはその傾向が見られなかった。これは、試験体数が少ないことと、穿った孔が施工面に対して垂直でなかったため、載荷時に応力がコンクリートに伝達しなかったことが原因と考える。



(c) 鋼材破断(D-6da(表))

図-8 特徴的な破壊形態

表-3 破壊サイズ一覧

試験体名	破壊形態	実験で得た破壊の値			
		長軸 (mm)	短軸 (mm)	深さ (mm)	面積 (mm ²)
D-3da	表	115	114	39	10097
	裏	140	95	20	10292
D-4da	表	190	130	35.5	19245
	裏	207	140	35	22607
D-5da	表				
	裏	35	20	5	396
D-6da	表				
	裏	300	205	75	48148
C-3da	表	111	101	17.2	8784
	裏	120	65	10	6126
C-5da	表	175	145	30	19929
	裏	65	40	7	2042
C-6da	表	43	33	9	1114
	裏	112	90	20	7917



図-9 裏面に施工した新型アンカーの試験後の様子 (3da 4da 5da 6da)

3.4 埋め込み深さと最大引張荷重の関係

図-10 に実験要因ごとの最大引張荷重を示す。新型アンカーと既存アンカーの埋め込み深さが同じ場合、新型アンカーの最大引張荷重の平均値は従来アンカーよりも高い値であることが確認できた。従来アンカーの最大引張荷重は同じ要因の試験体同士でも表面が裏面よりも 1.2~1.5 倍程度大きく、値に差が生じたが、新型アンカーの埋め込み深さが 5da 以下の試験体では、表面と裏面の結果でほぼ同

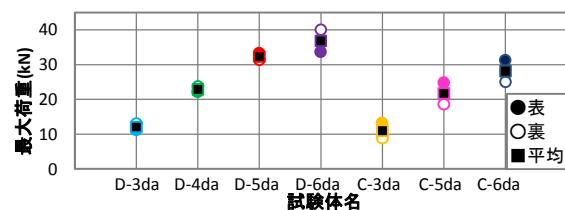


図-10 実験要因ごとの最大引張荷重

等の値が確認できた。これは特にアンカーの形状ではなくコンクリートの表層強度に依存するものと考えられるが、**図-4**に示すように、今後はこのような差異を生じる表層強度を透気係数の観点から評価できることが望ましいと考える。

図-11に新型アンカーの埋め込み深さと最大引張荷重変化率の関係を示す。最大引張荷重変化率は、埋め込み深さ Xda 試験体と $(X-1)da$ 試験体の最大引張荷重の差を $(X-1)da$ 試験体の最大引張荷重値で除して算出した。埋め込み深さが増加するにつれて、最大引張荷重変化率が低下しており、最大引張荷重変化率が0%に近づくことで、アンカーのコーン状破壊耐力の限界値となり鋼材破断に至ると考えられる。

3.5 荷重と変位の関係

図-12に従来アンカー(C)、**図-13**に新型アンカー(D)の荷重-変位曲線を示す。より、全ての結果において、アンカーの抜け出しが生じた後に最大引張荷重に至った。最大引張荷重時において、新型アンカーは従来アンカーよりも変位が抑えられているとともに、コンクリート-アンカーが弾性体としての挙動を示す傾向が確認できた。すなわち、新型アンカーの荷重と変位の関係は、従来アンカーのような初期段階での荷重の急激な増加や、アンカー抜け出し後の荷重の上下変動は確認できず、最大引張荷重に至るまで荷重は変位と共に継続的に増加した。なお、**図-6**より、載荷初期段階において大半の試験体に変位のスリップが確認できた。これらは新型アンカーが従来アンカーと異なり、施工の際に穿った孔をアンカーの引き出し部位に合わせて拡張していたことにより、アンカーと拡張孔の固着の程度が低下したためと考える。後述するように FEM 解析では新型アンカーの固定度が高く示されているのは、このアンカー引き出し部位と拡張孔の差による「ガタツキ」がない状態のものであり、これを実物において再現することが解析と実際の整合を図る上で重要と考える。また、鋼材破断が生じた表面の D-5da と D-6da の結果より、最大引張荷重が同程度の値であるのに対し、D-5da(表)の変位は D-6da(表)よりも1.7倍程度であった。これより、埋め込み深さが長いほど変位を抑えられていることが確認できた。

埋め込み深さが4da以下の試験体は、最大引張荷重到達時にコンクリートの破壊が生じ、荷重が急激に減少したが、5da以上の試験体では最大引張荷重到達後に変位が大きくなるのに対し荷重は下降する降伏状態が確認できた。この為、**図-9**の試験後のアンカー変形の様子より、埋め込み深さが深くなるにつれてアンカーの変形が生じたことから、荷重と変位の関係において降伏の状態に至ったものとする。

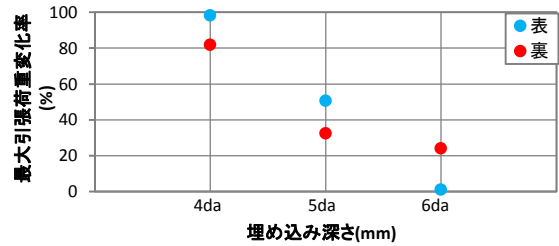


図-11 新型アンカーの埋め込み深さに対する最大引張荷重増加率

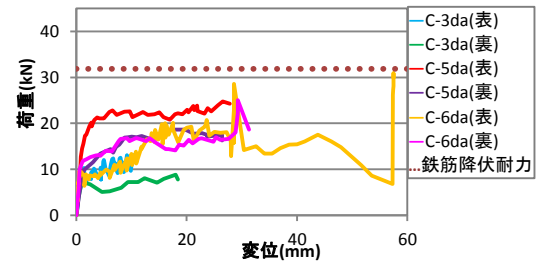


図-12 従来アンカーの荷重-変位曲線

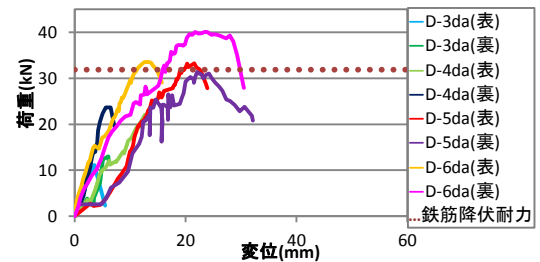


図-13 新型アンカーの荷重-変位曲線

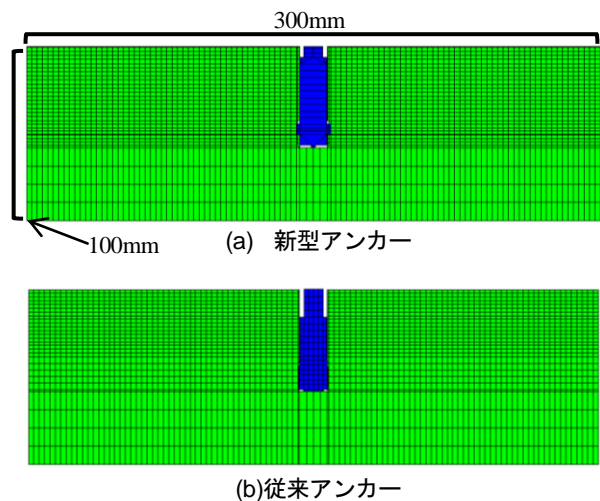


図-14 二次元解析モデルの要素分割図

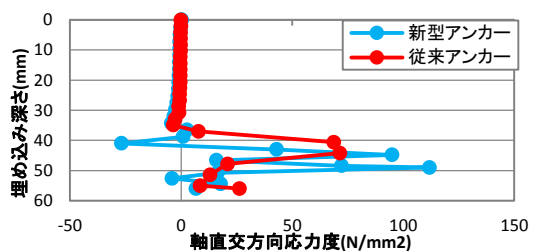


図-15 コンクリート要素の軸直交方向の応力度の分布

4. 有限要素法解析

4.1 解析対象の基本モデル

図-14 に二次元解析モデルの要素分割図を示す。解析は新型アンカーと従来アンカーの形状に合わせて2パターンを実施した。要素はアンカー(鉄筋)要素とコンクリート要素の2種類とした。解析モデルは引張試験の4daの試験体を模擬しており、コンクリート部分 300×100mmとした。メッシュ割り要素の最大長さはアンカーで14mm、コンクリートで40mmとした。アンカーの埋込み深さは4da=56mmとしている。2パターンのモデルとも、およそ節点数3500、要素数3200(アンカー100、コンクリート3100)である。

引張力はアンカーに接続した鉄筋上部の節点に、油圧ジャッキの最大出力の合計80kNの荷重を分布して設定した。境界条件としてコンクリート底面と側面を固定とした。

各要素の機械的性質は以下のように設定した。

- (1) アンカー・鉄筋
ヤング係数 205kN/mm²、ポアソン比 0.3
- (2) コンクリート
ヤング係数 30kN/mm²、ポアソン比 0.2

4.2 解析結果

図-15 にアンカーに隣接するコンクリート要素の軸直交方向の応力度の分布を示す。グラフの埋め込み深さはコンクリートのアンカー施工面を基準としている。解析結果は、コンクリートと固着するために拡張されたアンカー先端部付近の応力度が最も高い値となっており、新型アンカーが従来アンカーより1.5倍程度の値であることが確認できた。これより、新型アンカーは従来アンカーよりコンクリートとの固定度に優れていると考えるが、いずれにしろ従来アンカーとは異なる応力状態を実現していることが示されている。

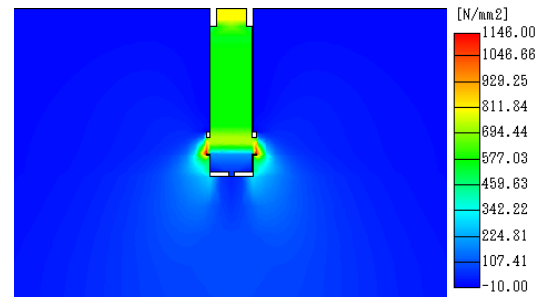
図-16 にアンカー周辺の最大応力度の分布図を示す。主にアンカーの拡張部からコンクリートへの応力伝達が行われており、新型アンカーは従来アンカーよりも軸直交方向と上部方向への応力が高い分布であることが確認できた。このことから、新型アンカーの破壊面積が従来アンカーよりも応力の伝達の合理性とともに大きい値となったと考える。

5. 新型アンカーにおける推定式の提案

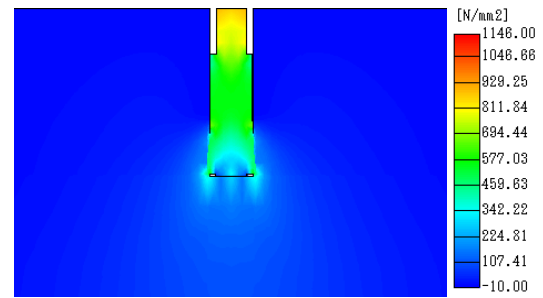
国土交通省監修の耐震改修設計指針¹⁾には、有効水平投影面積に関しては式(1)、引張耐力や鋼材耐力、コーン状破壊耐力に関しては式(2)(3)(4)として推定式が示されている。これらの式を基に新型アンカーにおける推定式の提案を行う。

$$A_c = \pi \times l_c \times (l_c + da) \quad (\text{mm}^2) \quad (1)$$

$$T_a = \min[T_{a1}, T_{a2}] \quad (\text{N}) \quad (2)$$



(a) 新型アンカー



(b) 従来アンカー

図-16 アンカー周辺の最大応力度の分布図

$$T_{a1} = \min[m\sigma_y \times a_c, \sigma_y \times a_0] \quad (\text{N}) \quad (3)$$

$$T_{a2} = 0.23 \times A_c \times \sqrt{\sigma_B} \quad (\text{N}) \quad (4)$$

ここで、 l_c : 有効埋め込み深さ $l - da$ (mm)

da : アンカー外径(mm)

$m\sigma_y$: 金属系アンカー本体の降伏点強度(N/mm²)

a_c : 金属系アンカーの本体各部の最小断面積(mm²)

σ_y : 鉄筋の規格降伏点強度(N/mm²)

a_0 : 接合筋のねじ加工を考慮した有効断面積、またはアンカー筋の公称断面積(mm²)

σ_B : 既存部のコンクリートの圧縮強度(N/mm²)

5.1 破壊面積推定式の提案

表-4 に新型アンカーにおける実験で得た試験体破壊面積と推定式(1)から求めた有効水平投影面積の算出結果を示す。有効水平投影面積においては埋め込み深さ位置を基準として45°の投影面積を表す式(5)から求めた値も示す。なお、実験値の破壊面積は破壊形態を楕円と仮定して求めている。コーン状破壊が発生した試験体において、D-5da(裏)を除いて試験体破壊面積が計算値よりも大きい値となった。

$$A_c = \pi \times ((2 \times l + da) / 2)^2 - \pi \times (da / 2)^2 \quad (\text{mm}^2) \quad (5)$$

推定式の提案にあたり、破壊面積の影響因子に関して相関性の検討を行う。図-17 に式(5)における有効水平投影面積の直径と実際の破壊サイズの短軸の関係を示す。両者の関係には相関性が見られることや回帰式の傾きが1.11であることから短軸を式(5)に示す有効水平投影面積直径を用いて式(6)で表すこととした。図-18 に埋め込み深さと式(6)で算出される短軸長さを実験で得られた試験体破壊面積から逆算して求めた長軸の関係を示す。両者の関係

には相関性が見られることから、最も決定係数の高かった指数近似曲線を用いて、ここでは埋め込み深さを変数とした式(7)で長軸を表すこととした。なお、長軸の推定においてもアンカー外径の影響を受けることが考えられるが、この点については今後の課題としたい。

$$\text{短軸} : L_a = l + da = 2l + da \quad (\text{mm}) \quad (6)$$

$$\text{長軸} : L_b = 0.965 \times l^{1.337} \quad (\text{mm}) \quad (7)$$

これより、楕円面積の公式を基に以下のような破壊面積推定式 A を定める。

$$A = 0.99 \times \pi \times (L_a/2) \times (L_b/2) \quad (\text{mm}^2) \quad (8)$$

ここで、0.99 は本推定式による計算値と実験値の関係が原点を通る線形方程式になると仮定して定めた係数である。

5.2 引張耐力推定式の提案

コンクリートの破壊時における引張耐力の推定式の提案を行う。影響要因を母材コンクリート強度と式(8)とし、実験値から逆算することで以下のような推定式を提案する。

$$X = 0.13 \times A \times \sqrt{\sigma_B} \quad (\text{N}) \quad (9)$$

ここで、0.13 は本推定式による計算値が実験値よりも下回るように設定した値である。

図-19 に埋め込み深さと実際の最大引張荷重の関係を表す。コーン状破壊が生じた試験体が式(9)よりも高い値を示しただけでなく、鋼材破断が生じた実験値も式(3)より高い値を示していることから、提案した推定式が安全側の値を得られると言える。しかしながら、埋め込み深さ 6da の試験体に関して破壊形態にばらつきが生じたことや、推定式への影響因子には埋め込み深さ以外にコンクリート強度やアンカー外径などが考えられることから、引き続き実験データを収集し検討を行う予定である。

6.まとめ

新型アンカーと従来アンカーの引張試験を行い、アンカー種類と埋め込み深さを実験要因とすることで引抜き性状の検討を行った。その結果、以下のことが得られた。

- (1) 新型アンカーの破壊形態は楕円形のコーン状破壊であった。
- (2) 新型アンカーは従来アンカーよりも高い強度が得られ、埋め込み深さが長くなることで強度の増大が確認できた。
- (3) 有限要素法解析から、新型アンカーが「ガタツキ」なく施工されている場合のコンクリートとの固着性は従来アンカーよりも高いと言える。
- (4) 推定式の提案は破壊面積を楕円形と見なすことより、高い相関係数を得られた。

なお、試験体数が少ないことや、コンクリート強度やアンカー外径など他にも強度へ影響を及ぼす要因考えられるため、引き続き検討を行う。

表-4 新型アンカーにおける有効水平投影面積

試験体名	埋め込み深さ (mm)	2l+da (mm)	有効水平投影面積(mm ²)				実験値/計算値			
			計算値			実験値	式(1)	式(5)	式(8)	
			式(1)	式(5)	式(8)					
D-3da	表	42.3	98.5	3752	7469	11032	10097	2.69	1.35	0.92
	裏	40.2	94.4	3309	6845	9887	10292	3.11	1.50	1.04
D-4da	表	55.4	124.7	7190	12059	20029	19245	2.68	1.60	0.96
	裏	54.0	122.0	6786	11536	18959	22607	3.33	1.96	1.19
D-5da	表	71.1	156.1	12734	18984	35010				
	裏	69.3	152.5	12020	18111	33049	396	0.03	0.02	0.01
D-6da	表	81.2	176.5	17154	24299	47329				
	裏	82.7	179.4	17849	25124	49292	48148	2.70	1.92	0.98

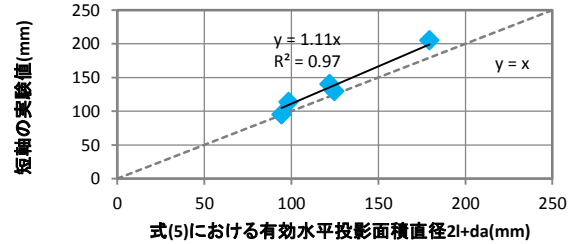


図-17 式(5)における計算値と短軸の実験値の関係

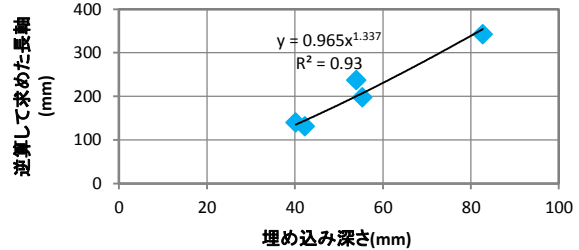


図-18 埋め込み深さと逆算して求めた長軸の関係

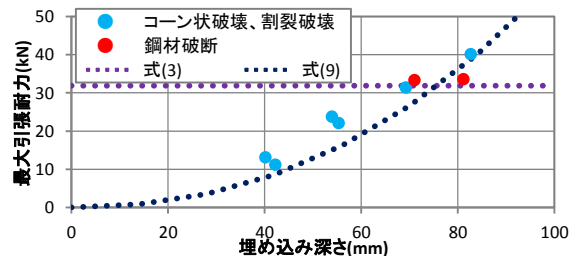


図-19 埋め込み深さと実際の最大引張荷重の関係

謝辞

本研究は FS テクニカル株式会社の皆様との共同研究であり、ご協力を頂いた関係各位に深く感謝いたします。

【参考文献】

- 1) 国土交通省住宅局建築指導課監修：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，一般財団法人日本建築防災協会/国土交通大臣指定耐震改修支援センター，pp.259-280，2001.10
- 2) 今井清史，細川洋治，須賀俊順，杉山智昭，半田清和，松崎育弘：埋め込み深さが金属系あと施工アンカーの引張特性へ及ぼす影響に関する実験的研究(その 1.実験概要及び実験結果)，日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)，pp.489-490，2006.9