

論文 高靱性セメント系複合材料に埋設されたアンカーボルトの引抜き性状に関する研究

菊田 貴恒^{*1}・三橋 博三^{*2}・Choi Donguk^{*3}・石川 直哉^{*4}

要旨: ポリエチレン繊維とスチールコードによるハイブリット型高靱性セメント系複合材料に埋設されたアンカーボルトの引抜き実験を実施し、その破壊挙動および引抜き靱性能について考察を行った。その結果、高靱性セメント系複合材料に埋設されたアンカーボルトの引抜き最大荷重は埋め込み深さに比例し、学会式などによる推定値より大きくなることが明らかになった。また、埋め込み深さが深いほどコーン状のひび割れ領域が広がり、引抜き靱性能が大きくなることが明らかになった。

キーワード: 高靱性セメント系複合材料, アンカーボルト, 引抜き性状, スチールコード

1. はじめに

高靱性セメント系複合材料は優れた引張靱性特性を有することから、この特性を有効活用する利用方法についての研究が近年盛んに行われている。この高靱性セメント系複合材料は、引張応力および曲げ応力下において、疑似ひずみ硬化とマルチプルクラックを示し、数パーセントに及ぶ引張ひずみを有することからさまざまなコンクリート分野で効果的な利用が期待されている。山下¹⁾らは、高靱性セメント複合材料に埋め込まれたアンカーボルトの引抜き実験を実施し、アンカーボルトの引抜き最大荷重は使用した材料の曲げ強度に依存していることを明らかにした。また、稲熊²⁾らは高靱性セメント複合材料に埋設されたアンカーボルトの引抜き性状において、高いエネルギー吸収性能を示すことを明らかにしている。

コンクリート内部に埋設されたアンカーボルトは、アンカー端部よりコーン破壊面に生じるコンクリートの引張応力で抵抗する機構であることから、アンカーボルトの引張挙動はコンクリートの引張材料特性に依存することとなり、一般的なコンクリートでは脆性的な引張破壊挙動を示す。

そこで本研究では、アンカーボルトの埋設部に高靱性セメント系複合材料を用いることが、高靱性セメント系複合材料の合理的な利用方法の一つであると考え、ハイブリット型繊維補強セメント系複合材料にアンカーボルトを埋設した供試体を作製し、アンカーボルトの引抜き挙動およびひび割れ分散について実験的に検討した。

2. 実験概要

実験は、ポリエチレン繊維とスチールコードによるハ

イブリット型高靱性セメント系複合材料を用い、材料評価実験とアンカーボルト引抜き実験を行った。材料特性としては、圧縮強度特性、及び引張応力-ひずみ特性を評価した。

また、高靱性セメント系複合材料に埋設されたアンカーボルトの引抜き実験では、アンカーの埋込み深さを4段階に変化させ、変位制御による油圧ジャッキで鉛直方向に引抜き、荷重とアンカーボルト端部の変位を測定した。

2. 1 使用材料及び調合

本実験で使用した調合を表—1に示す。水セメント比は45%とし、早強ポルトランドセメント（密度：3.14 g/cm³）とシリカフェューム（密度：2.20 g/cm³）、高性能AE減水剤（ポリカルボン酸系）を、細骨材に5号珪砂（密度：2.61 g/cm³）を使用した。

繊維には、繊維径12μm、繊維長6mmのポリエチレン（PE）繊維（密度0.97 g/cm³、引張強度2580MPa、引張弾性係数73GPa）と繊維径400μm、繊維長32mmのスチールコード（SC）（密度7.84 g/cm³、引張強度2850MPa、）を使用した。このスチールコードは直径0.15mmの鋼繊維を5本集束して、ピッチ4.6mmで撚られて製造されているものである。繊維の混入率は、それぞれ体積比で0.75%とした。

材料評価実験およびアンカーボルト引抜き実験の供試体の練り混ぜには、容量50リットルの強制一軸型ミキサーを用い、粉体及び細骨材を空練り後、水を投入して3分混練、ポリエチレン繊維を投入して5分混練、最後にスチールコードを投入して5分混練した。テーブルフロー値は、概ね170mm~180mmの間であった。

養生方法は、木製型枠を断熱材で覆い、気中養生とし

*1 東北大学大学院 工学研究科都市・建築学専攻 博士課程後期 修士（工学）（正会員）

*2 東北大学大学院 工学研究科都市・建築学専攻 教授 工博（正会員）

*3 韓京大学 工学部 建築学科 教授 Ph.D（非会員）

*4 東北大学 工学部建築社会環境工学科（非会員）

た。また、実験時の材齢は、7日とした。

2.2 材料評価実験

材料特性の評価実験は、50φ円柱供試体による圧縮試験に加え、100×100×400mmの供試体を用いた曲げ試験、及び厚さ13mmのダンベル型供試体による一軸引張試験を行い、引張性能を評価した。図-1に曲げ載荷試験の図を、図-2にダンベル型供試体の試験状況を示す。

2.3 アンカーボルト引き抜き実験

アンカーボルト引き抜き実験に用いた供試体の概要を図-3に示す。供試体の寸法は、300×500×300mmとした。アンカーボルト（JIS G 3108、降伏点418MPa、引張強さ545MPa）は丸鋼で直径をφ16mmとし、埋設部のアンカーヘッドは直径30mmとした。埋込み深さ（本論

文では h_{ef} と示す）は、 $h_{ef}=48, 64, 80, 112\text{mm}$ （即ち、ボルト径 d に対して $3d, 4d, 5d, 7d$ ）の4水準とし、各3体の供試体でアンカーの引抜き実験を実施した。

アンカーボルトの引抜き荷重は、φ16mmのアンカーボルトに挿し込み式に鋼棒を接続し、200kNセンターホール型油圧ジャッキで変位制御により載荷した。

アンカーボルトの変位計測は、図-3に示すように、供試体底部に取り付けられた溝型鋼に鋼棒を設置し、アンカーボルト頂部の引抜き変位をLVDTにより計測した。また、アンカーボルト頂部の引抜き変位には荷重によるアンカーボルトの弾性的な伸びが含まれるため、正確なアンカーヘッドの変位を計測する目的で、供試体底部に設けた孔より直接LVDTでヘッドの変位を計測した。

表-1 調合

	W/B (wt.%)	SF/C (wt.%)	S/B (wt.%)	SP/B (wt.%)	SC (vol.%)	PE (vol.%)
高靱性セメント系 複合材料	45	15	45	0.9	0.75	0.75

W=水、 C=セメント、 B=セメント+シリカフェウム、 SF=シリカフェウム、
S=珪砂、 SP=高性能減水剤、 SC=スチールコード、 PE=ポリエチレン繊維、

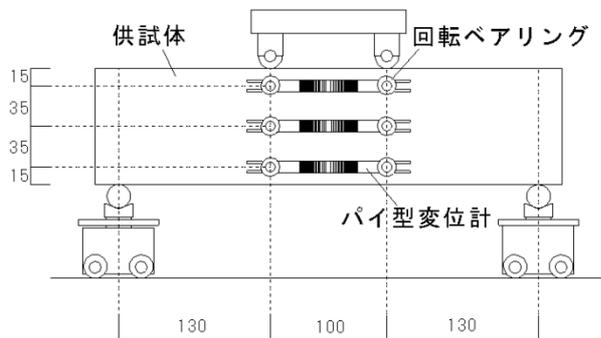


図-1 曲げ載荷試験



図-2 ダンベル型供試体試験状況

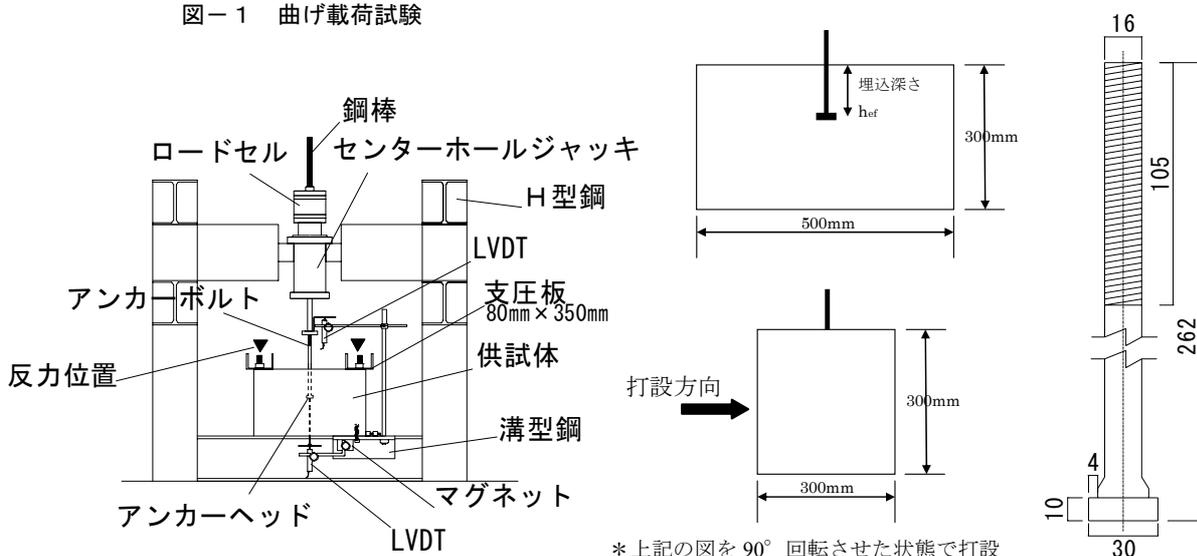


図-3 アンカーボルト引抜き実験供試体概要とアンカーボルト詳細

3. 実験結果

3.1 材料評価実験結果

図-4に、曲げ載荷試験における曲げモーメントー曲率関係を示す。本実験の調合による高靱性セメント系複合材料は、3供試体すべてにおいて、高靱性コンクリートの特徴である、微細ひび割れが多数発生するマルチブルックが確認できた。

図-5に三橋³⁾らの計算方法を参考に、曲げ載荷試験により求められたモーメントー曲率関係から材料の引張応力ーひずみ関係を計算した結果を示す。図-5より、本実験の調合による高靱性セメント系複合材料の換算

引張強度の平均値が 2.76MPa、換算終局ひずみの平均値が 1.35%程度となった。

図-6にダンベル型供試体による一軸引張試験の結果を示す。3本の供試体の平均値は、ピークの引張応力が約 3.5MPa、そのピーク時の引張ひずみが約 0.7%付近であり、モーメントー曲率関係から求められた換算引張応力ー換算ひずみ関係と一軸引張試験結果の引張応力ーひずみ関係には、若干の違いが認められる。その原因としては、供試体形状の違いによる繊維分散や繊維配勾の影響、及び引張試験時の荷重の偏心や断面内の不均一性によって、もっとも弱い部分から局所的に軟化するこ

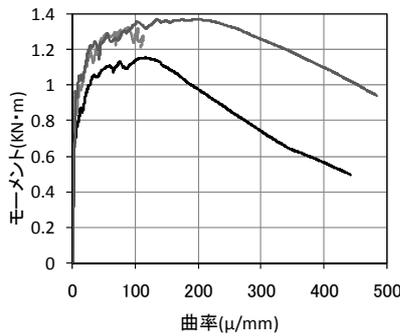


図-4 モーメントー曲率関係

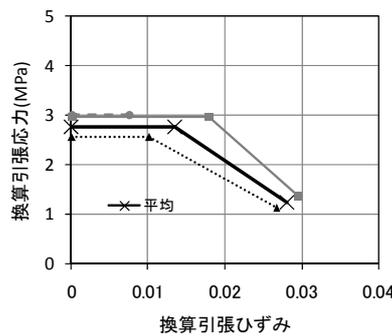


図-5 換算引張応力ーひずみ関係

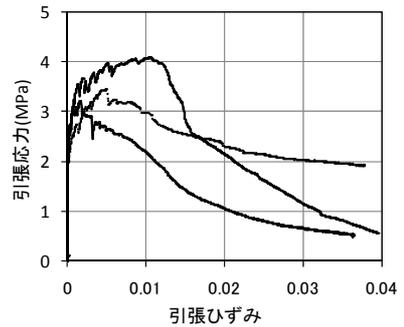


図-6 引張応力ーひずみ関係

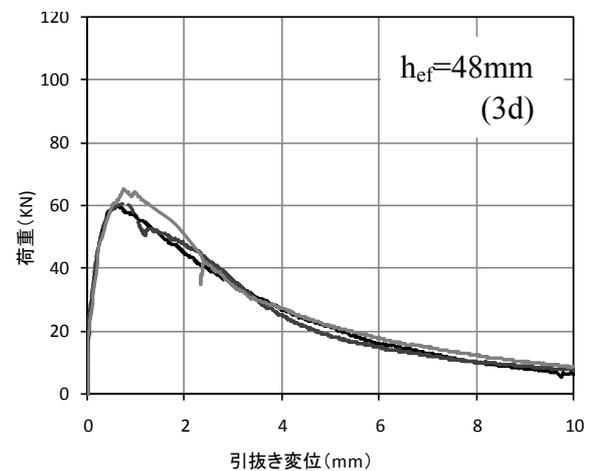
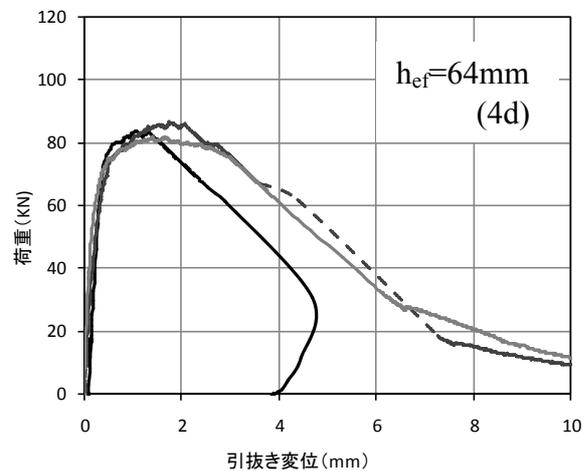
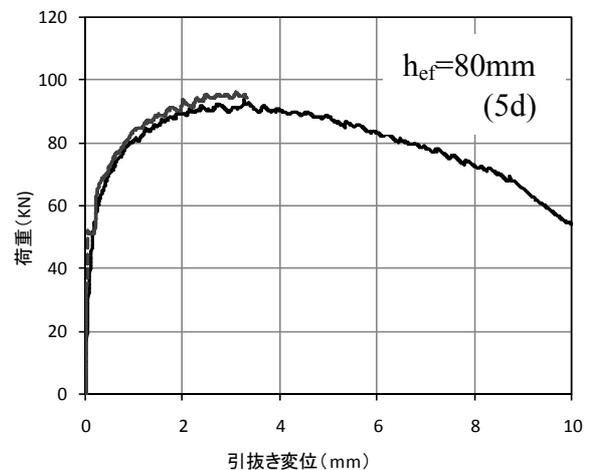
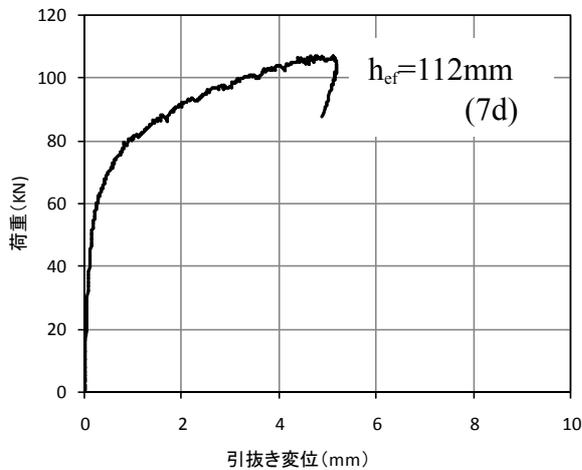


図-7 荷重ー引き抜き変位関係(アンカーヘッド部変位)

とにより生じる 2 次曲げの影響等が考えられる。

また、アンカーボルト引き抜き供試体を練混ぜたバッチごとに圧縮強度試験用の供試体を作り、材齢 7 日で実験を行ったところ、平均圧縮強度 36.8MPa、弾性係数 18.5GPa であった。

3.2 アンカーボルト引き抜き実験結果

(1) 引き抜き最大荷重－変位関係

それぞれの埋め込み深さにおける、アンカーボルト引き抜き実験の引き抜き荷重とアンカーヘッド部の引き抜き変位について、図-7 に示す。 $h_{ef}=112\text{mm}$ の供試体では、3 供試体共に先にアンカーボルトの破断に至り、終局状態までの引き抜き挙動を把握することはできなかった。しかし、アンカー破断までの挙動としては、アンカーヘッドの周辺に発生すると考えられる、初期のひび割れにより剛性が低下した後も荷重が増加し、約 5mm 程度までアンカーヘッドが変位した時に破断に至った。これらの引き抜き挙動から、 $h_{ef}=112\text{mm}$ の場合非常に高い引き抜き抵抗が生じると考えられる。

$h_{ef}=80\text{mm}$ の供試体では、 $h_{ef}=112\text{mm}$ の供試体と同様にひび割れ発生後も荷重が増加し、アンカーヘッドの変位が平均 3.5mm の時、最大引き抜き荷重に達した。また、ポストピークの挙動も、高い荷重レベルを保ちながら緩やかに荷重が低下しており、高い引き抜き抵抗を示している。

$h_{ef}=64\text{mm}$ の供試体では、初期ひび割れ後、アンカーヘッドの変位が平均 1.6mm 付近まで荷重が増加したが、

その後は大きく低下した。これは荷重低下が始まると同時にコーン状のひび割れ領域が広がり、急激に引張応力の低下が生じたものと考えられる。

$h_{ef}=48\text{mm}$ の供試体は、最大引き抜き荷重に達したと同時にアンカーヘッドの変位が 4mm 付近まで直線的に荷重が低下し、その後は緩やかにひび割れの増加と共に荷重が低下した。この埋め込み深さの供試体は他の供試体の荷重－変位関係と明らかに違い、引き抜き抵抗が非常に小さいことがわかる。

図-7 に示す各埋め込み深さにおける荷重－変位関係から、最大荷重とそれに達した時の変位による領域内の面積を求め、それを引き抜き靱性評価値と定義し、 $h_{ef}=80\text{mm}$ 供試体と $h_{ef}=64\text{mm}$ 、 $h_{ef}=48\text{mm}$ 供試体を比較した。結果として、 $h_{ef}=80\text{mm}$ 供試体の方がそれぞれに対し 3.7 倍、9.2 倍と大きい評価値となった。このことから、アンカーボルトの形状が同一でコーン状の破壊を示す場合、アンカーボルトの埋め込み深さを $h_{ef}=80\text{mm}$ 、即ちボルト径の 5 倍程度確保することにより、より高い引き抜き靱性を期待することが可能であると考えられる。

(2) ひび割れ性状

図-8 に供試体上面部に発生した、引き抜き実験終了後のひび割れ状況を示す。ここで言う実験終了とは、アンカーボルト周辺に生じるコーン状のひび割れによりアンカーが完全に抜けきった状態を指す。

$h_{ef}=112\text{mm}$ の供試体はアンカーボルトが破断し、ひび割れが生じなかったため、除外した。

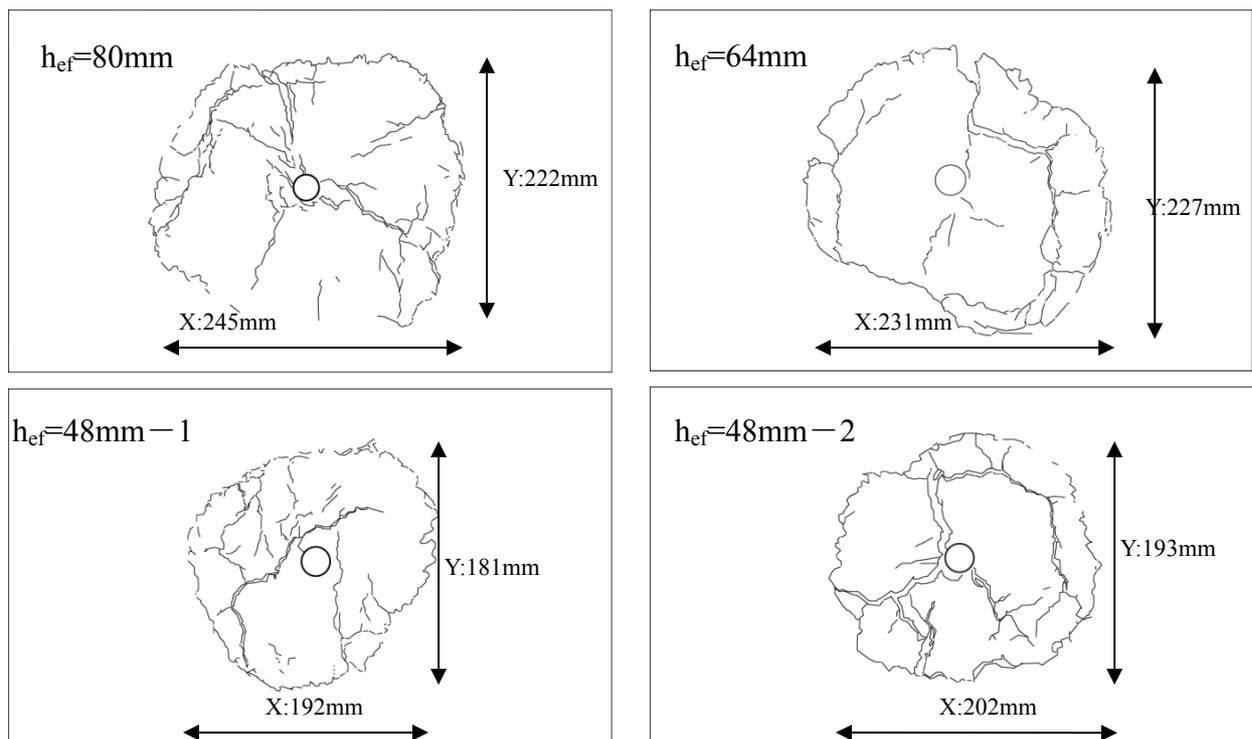


図-8 アンカー引き抜き実験終了後のひび割れ発生状況 (供試体上面部)

アンカーボルト引抜きによる供試体上面部に生じる円形状のひび割れは、アンカーボルトを中心に半径 $1.5h_{ef}$ の範囲に生じると文献⁴⁾では報告されている。図-8に示す、各供試体に生じた円形状のひび割れを X 方向 Y 方向それぞれの長さを平均化し、アンカーボルトを中心とした半径を求め埋め込み深さ h_{ef} との比率を算出すると、 $h_{ef}=80\text{mm}$ の 1.46、 $h_{ef}=64\text{mm}$ の 1.79、 $h_{ef}=48\text{mm}$ の 1.94、2.06 となり、埋め込み深さが浅い供試体の方が大きな値となった。

図-9に $h_{ef}=80\text{mm}$ と 48mm 供試体のコーン状ひび割れ破壊面を示す。図-9に示すように埋め込み深さが浅い供試体ほど、供試体上面に生じる円形状ひび割れの端部が、非常に薄い表層に広がっていることが確認できる。これは、長いスチールコードが型枠に沿うように並ぶことにより、コーン状のひび割れに対してその伝播を阻止する方向に配置されるため、供試体表層部が引張りに有利な状態となることが要因と考えられる。この影響が、埋め込み深さが浅い供試体の方で顕著に表れたものと考えられる。

アンカー引抜き供試体から剥離した、コーン状の部分を3次元的に観察すると、埋め込み深さに比例して剥離したコーン状の部分の表面積が大きくなることから、埋め込み深さが深いほどコーン状のひび割れ領域の表面積が大きくなり、引抜き靱性がより高くなったものと考えられる。

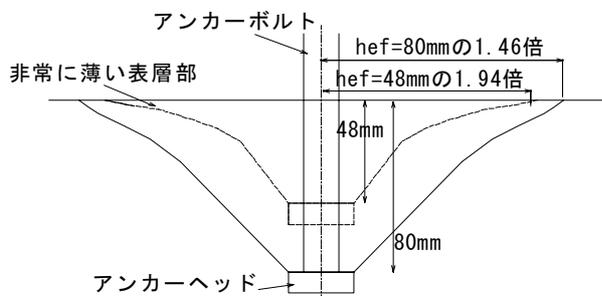


図-9 $h_{ef}=80\text{mm}$ と 48mm のコーン状破壊断面比較

(3) 引抜き耐力の推定値と実験値の比較

アンカーボルトの引抜き耐力を推定する式は、日本建築学会式⁵⁾や ACI 式⁴⁾、また、CEB⁶⁾には Eligehausen らの研究によるコンクリートの破壊エネルギー G_F を考慮した式などがある。以下に式を示す。

「建築学会式」

$$pa1 = \phi 1 \cdot \sqrt{F_c} \cdot A_c \quad (1)$$

pa1: コーン破壊による許容引抜き力 (Kg)

$\phi 1$: 低減係数

F_c : コンクリート設計基準強度 (Kg/cm²)

A_c : コーン破壊面水平投影面積 (cm²)

$$A_c = \pi \cdot le(le+D)$$

le: アンカー埋め込み長さ

D: アンカー直径

「ACI 式」

$$Nb = Kc\sqrt{F_c'} \cdot h_{ef}^{1.5} \quad (2)$$

Nb: 引抜き力 (N)

Kc: 係数

F_c' : コンクリート圧縮強度 (MPa)

h_{ef} : 埋め込み深さ (mm)

「CEB 式」

$$Nu = 2.1(E \cdot G_F)^{0.5} \cdot h_{ef}^{1.5} \quad (3)$$

E: コンクリート弾性係数 (MPa)

G_F : 破壊エネルギー (N/mm)

h_{ef} : 埋め込み深さ (mm)

これらの各推定式から求められる引抜き荷重と本研究の実験値がどのような関係にあるのかを算出し、それぞれの推定値と実験値の関係を図-10に示す。ただし、式(1)の pa1 は、コーン状破壊の終局引張耐力に安全率を考慮した許容引抜き力となっており低減係数が含まれ

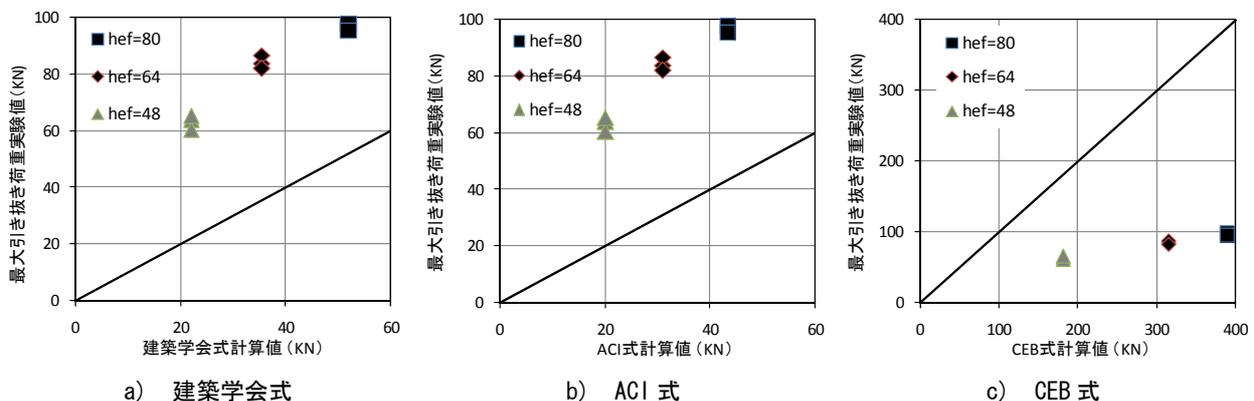


図-10 各引抜き荷重計算式と実験値との比較

ているが、ここでは低減係数を 1.0 とし計算を行った。

各計算に用いたコンクリートの弾性係数と圧縮強度は材料評価実験の値を用いた。式(3)の G_F については、**図-5**より引張応力が低下し始める時のひずみを測定基準長 100mm で変位に変換し、その時の応力と変位による領域内の面積を求め G_F とした。ここでは $G_F=3.64\text{N/mm}$ として計算を行った。

図-10より、実験値と建築学会式及び AIC 式による値を比較すると、実験値はそれぞれ、平均 2.36 倍、及び平均 2.69 倍程度と、推定値より大きな引抜き耐力となった。これは、式の基となった普通コンクリートの場合と比較して、高靱性セメント系複合材料の引張強度が高いことや引張ひずみ性能が高いこと、また、式が安全側になっていること等が要因と考えられる。

CEB 式による推定値は、実験値より平均 3.55 倍大きくなった。これは、式(3)が普通コンクリートを対象とした実験等から導き出された式のため、高靱性セメント系複合材料のように G_F が非常に大きくなるものでは、推定値と実験値に差が生じたものと考えられる。これらのことより、より適切な評価式の検討が今後の課題である。

4. 結論

本研究で得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 本研究で用いた調合及び繊維の組み合わせにおいて、アンカーボルトの形状が同一でコーン状の破壊を示す場合、 $h_{ef}=80\text{mm}$ 、即ちボルト径の 5 倍程度の埋め込み深さを確保することにより、高いアンカーボルトの引抜き靱性を期待することができる。
- (2) アンカーボルトの埋め込み深さが深いほど、コーン状のひび割れ領域の表面積が大きくなり、引抜き靱性がより高くなった。
- (3) アンカーの引抜きにより供試体上面に生じるアンカーを中心とした円形状のひび割れの半径と、 h_{ef} との比率は、埋め込み深さが浅いほど大きな値となった。これは、長いスチールコードが型枠に沿うように並ぶことにより、供試体表層部が引張りに有利な状態となることが要因と考えられ、この影響が埋

め込み深さがより浅い供試体の方で顕著に表れたためと考えられる。

- (4) 実験による引抜き耐力と建築学会式等の推定式から算出される引抜き耐力を比較すると、実験値は建築学会式及び AIC 式よりそれぞれ、平均 2.36 倍、平均 2.69 倍推定値より大きな引抜き荷重となり、CEB 式による推定値は実験値より平均 3.55 倍大きくなった。これは、高靱性セメント系複合材料の引張強度や引張ひずみ性能が、各式の基となった普通コンクリートよりも大きいことが要因と考えられる。

謝辞

本研究は科学研究費補助金（基盤研究（A）課題番号：18206058 研究代表者三橋博三）の交付を受け、その一部として行われたものであります。また、実験を遂行するにあたり、東北大学大学院工学研究科技術職員桐越一紀氏に協力していただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 山下賢司, 国枝稔, 稲熊唯史, 六郷恵哲: 高靱性セメント複合材料におけるアンカーボルトの引抜き挙動, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.297-302, 2004.6
- 2) 稲熊唯史ほか: 高靱性セメント複合材料におけるアンカーボルトの引抜き性状, 高靱性セメント複合材料に関するシンポジウム, pp.15-22, 2003.12
- 3) 三橋博三, 菊地俊文, 秋田宏, 山田人司: 高靱性セメント複合材料の簡易型引張性能評価に関する研究, セメント・コンクリート論文集, No.60, pp.483-490, 2006
- 4) ACI 318 Building Code and Commentary, 2003
- 5) 日本建築学会 各種合成構造設計指針同解説, 2004
- 6) CEB FASTENINGS TO REINFORCED CONCRETE AND MASONRY STRUCTURES State-of-art report Part II, Aug.1991