

論文 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

山下 賢司^{*1}, 国枝 稔^{*2}, 稲熊 唯史^{*3}, 六郷 恵哲^{*4}

要旨：高靱性セメント複合材料に埋め込んだアンカーボルトを2次元にモデル化して引抜き実験を実施し、その破壊挙動について考察を行った。その結果、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が明らかとなった。また、引抜き靱性値は曲げ試験での曲げ靱性値と相関が高いこと、埋込み深さが大きいほど、微細ひび割れの分散領域が大きくなり、引抜き靱性値が大きくなることが明らかとなった。

キーワード：高靱性セメント複合材料，アンカーボルト，引抜き挙動，靱性

1. はじめに

高靱性セメント複合材料は近年様々な分野での利用が期待されている¹⁾。稲熊ら²⁾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。しかしながら、高靱性セメント複合材料を用いたアンカーボルトの引抜き挙動について明らかになっていない点も多く、特に曲げ試験から得られる曲げ靱性とアンカー引抜き挙動およびひび割れ性状との関係については検討されていない。ひび割れ分散性の観点から引抜き時の靱性について検討しておく必要があるが、3次元での実験では、載荷途中のひび割れ性状(ひび割れ幅やひび割れの分布など)を確認することは難しいと考えられる。

そこで本研究では、Engineered Cementitious Composites : ECC³⁾ならびに鋼繊維補強モルタルを対象として、ひび割れを目視にて観察し易い2次元にモデル化したアンカーボルトの埋込み供試体を作製し、アンカーボルトの引抜き挙動について実験的に検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

本実験で使用した材料の配合を表-1に示す。ECC および鋼繊維補強モルタル(以下、SFRMとする)ともに水セメントは30%とし、早強ポルトランドセメント(密度:3.12g/cm³)と高性能AE減水剤(ポリカルボン酸系)を使用した。

ECCにおいて、細骨材に7号珪砂(密度:2.6g/cm³)を、繊維には、繊維長12mm、繊維径12 μ m、のポリエチレン(PE)繊維(断面形状:円形、密度:0.95g/cm³、引張強度:2.6GPa、引張弾性係数73GPa)を使用した。PE繊維の繊維混入率は体積比で1.5%とした。また、繊維の分散を促すため増粘剤(セルロース系)を使用した。

SFRMにおいて、細骨材には揖斐川産川砂(密度:2.59g/cm³)を使用し、繊維長30mm、換算直径 ϕ 0.6mmのインデント付きストレート型の鋼繊維(密度:7.85g/cm³)を体積比で2%混入した。

ECCの練り混ぜにはホバート型ミキサ(容量:10リットル)を用いた。ECC練混ぜ時の

*1 岐阜大学 工学部社会基盤工学科 (正会員)

*2 岐阜大学 工学部社会基盤工学科助手 工博 (正会員)

*3 東海コンクリート工業(株) 技術部 技術グループ (正会員)

*4 岐阜大学 工学部社会基盤工学科教授 工博 (正会員)

表－1 配合

種類	セメント*1	水	細骨材*2	混和剤 1*3	混和剤 2*4	繊維の体積混入率*5
ECC	1	0.3	0.31	0.03	0.00071	1.5%
SFRM	1	0.3	2	0.04	-	2.0%

*1: 早強ポルトランドセメント

*2: 7号珪砂 (ECC), 揖斐川産川砂 (SFRM)

*3: 高性能 AE 減水剤 (ポリカルボン酸系)

*4: セルロース系増粘剤

*5: ポリエチレン (PE) 繊維 (ECC), インデント付ストレート鋼繊維 (SFRM)

表－2 作製供試体の種類

供試体名	材料	埋込み深さ le (mm)	支点間長 L (mm)	供試体数	引抜き最大荷重 P _u (kN)	引抜き靱性値 T _a (kN・mm)
ECC25	ECC	25	200	2	15.91	9.75
ECC50	ECC	50	200	2	29.12	29.32
ECC75	ECC	75	200	2	36.44	46.14
SFRM25	SFRM	25	200	2	25.43	18.61
SFRM50	SFRM	50	200	2	38.84	35.92
SFRM75	SFRM	75	200	2	44.56	42.42

表－3 材料評価試験の結果

材料	圧縮強度 f _c (MPa)	弾性係数 E (MPa)	曲げ強度 f _b (MPa)		曲げ靱性値 T _b (kN・mm)	
			d=40mm	d=100mm	d=40mm	d=100mm
ECC	60.9	22.1	10.5	11.4	0.95	49.7
SFRM	93.9	35.7	13.9	12.0	0.83	9.40

フロー値は 158mm であり, みかけの空気量は, 11.1% であった。SFRM の練混ぜには強制練パン型ミキサ (容量: 100 リットル) を用いた。SFRM のスランプフローは 48.5cm で, 空気量は 13.2% であった。

養生方法は養生室 (温度: 20℃) にて湿布養生とし, 試験時の材齢は 28 日とした。

2.2 供試体の概要

供試体の概要を図－1 に示す。供試体の寸法は 600×600×50mm とした。図－1 に示すように, プレートを φ13 の PC 鋼棒で引き抜く方法を採用した。アンカーボルトのヘッド部は中央に φ15mm の穴を設けたプレート (寸法: 50×45×13mm) とし, あらかじめ PC 鋼棒 (φ13mm) 用のナットを瞬間接着剤にて固定し作製した。打設時には各辺の型枠内中央部にプレート (ナット付き) を配置し, さらにシャフト部には木片 (埋込み深さ 25mm の場合, 縦 25mm×横 50mm×厚さ 15mm) を埋

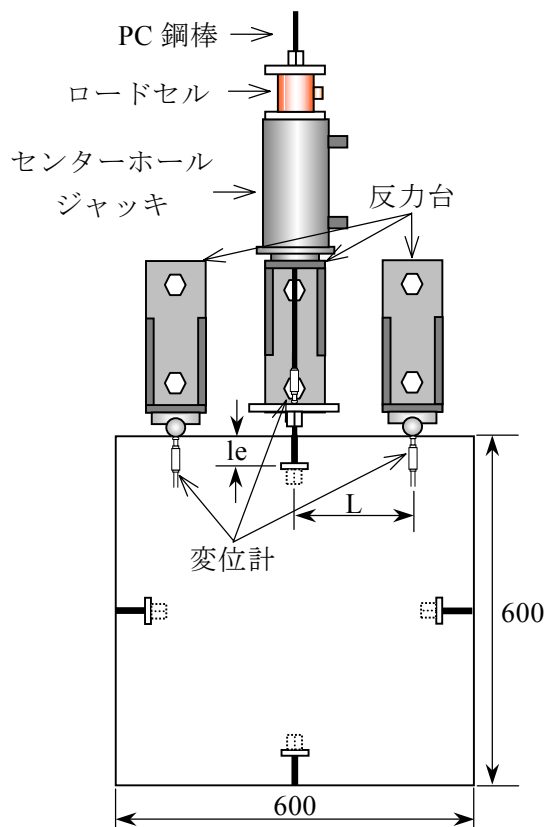
設した。この木片は材料の硬化後に取り除いた。なお, ナット周辺部ならびにプレート底面にはガムテープを貼り付け, さらに剥離剤を塗布し, 周囲との付着を切った。

作製した供試体の種類を表－2 に示す。各材料とも埋込み深さ le が 25mm, 50mm および 75mm の 3 種類の供試体を作製した。

これらの供試体とは別に, 圧縮試験および曲げ試験用の供試体も作製した。曲げ試験には, 40×40×160mm (以下, d=40mm とする) および 100×100×400mm (以下, d=100mm とする) の供試体を用いた。

2.3 曲げ試験方法

荷重方法は, はり高さ d をモーメントスパン長とする 3 等分点曲げ荷重とした。一般にセメント系繊維補強材料のエネルギー吸収量 (靱性) を評価する際, 曲げタフネス⁴⁾ が使用される。そこで, 本実験ではモーメントスパン内に発生したひび割れを考慮した評価手



単位：mm
 (a) 平面図
 (b) 側面図
 図-1 引抜き試験概要

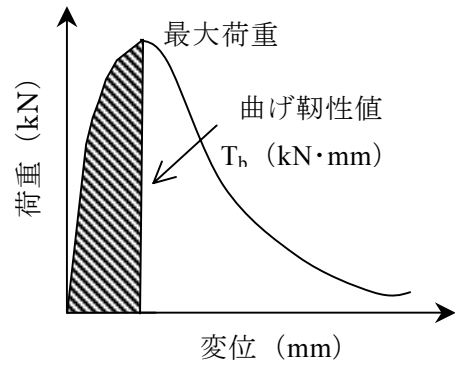
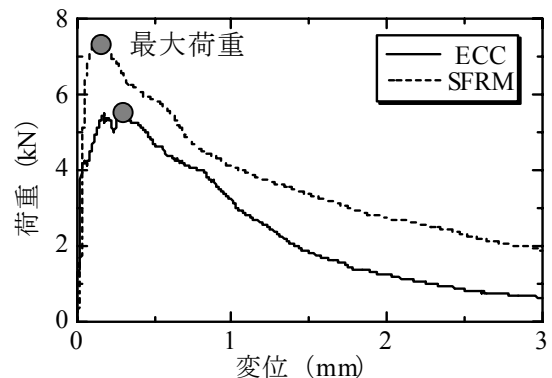
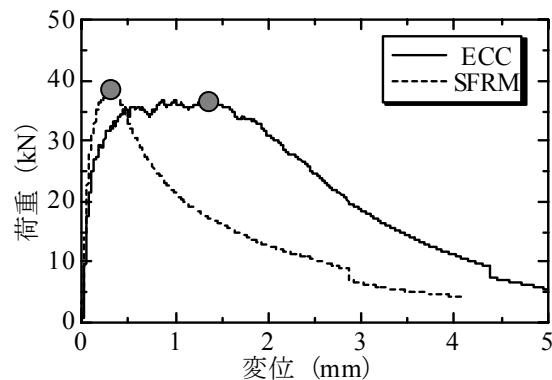


図-2 曲げ靱性値 T_b



(a) $d=40\text{mm}$



(b) $d=100\text{mm}$

図-3 荷重-変位関係 (曲げ試験)

法である曲げ靱性値 T_b を算出した。曲げ靱性値 T_b は図-2 に示すように曲げ試験より得られた荷重-変位曲線下の最大荷重時までの面積 ($\text{kN}\cdot\text{mm}$) とした。

2.4 アンカーボルト引抜き試験方法

アンカーボルトの引抜き荷重試験の様子を図-1 に示す。PC 鋼棒をヘッド部と接合し、剛な床に固定した 3 つの鋼製反力台と 200kN センターホール型油圧ジャッキを用い供試体に引張荷重を加えた。なお、供試体と反力台

との間には、拘束低減用のローラーを挟んだ。

アンカーボルトの引抜き量は、PC 鋼棒にナットにて固定したプレートの変位量と両支点の変位量とを差し引いて算出した。

3. 実験結果

3.1 材料評価試験 (曲げ荷重試験) の結果

曲げ試験 (3 等分点曲げ荷重) により得られた結果を表-3 ならびに図-3 に示す。ECC および SFRM ともに 3 体ずつ実施しており、

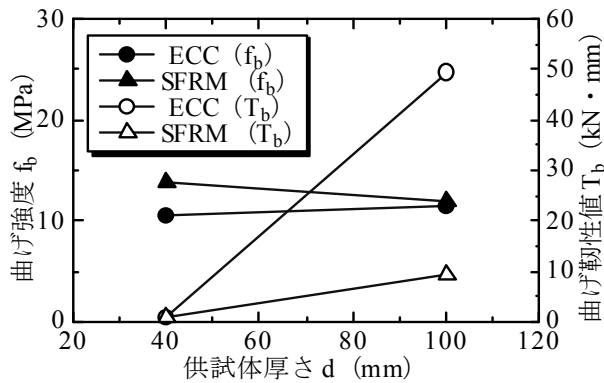


図-4 曲げ強度と曲げ靱性値

図-3には3体の平均曲線を示した。d=40mm シリーズでは ECC と SFRM の最大荷重時の変位はほぼ同じ値を示したが、d=100mm シリーズにおいて、ECC の最大荷重時の変位は SFRM の4倍程度の値となった。

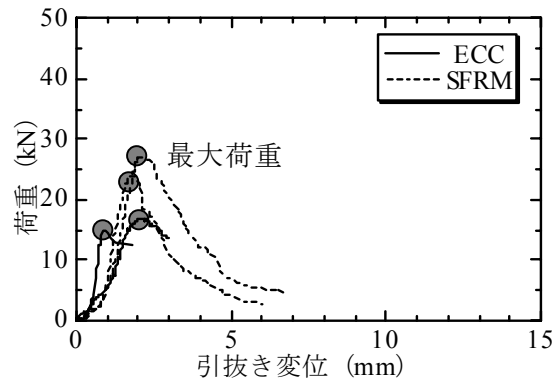
図-4に曲げ強度-供試体厚さ関係および曲げ靱性値-供試体厚さ関係を示す。供試体厚さの増加による曲げ強度の変化は ECC、SFRM とともに確認できなかった。一方、曲げ靱性値では、最大荷重時の変位が両者では異なり、特に ECC において供試体厚さの増加に伴う曲げ靱性値の増分は大きく、SFRM の5倍程度となった。

d=40mm シリーズの曲げ試験では、SFRM および ECC とともに、1本または2本程度のひび割れが発生した。d=100mm シリーズの曲げ試験においては、SFRM で d=40mm と同様1本または2本程度のひび割れ発生であったのに対し、ECC では、微細ひび割れが複数本発生するマルチプルクラックが観察できた。

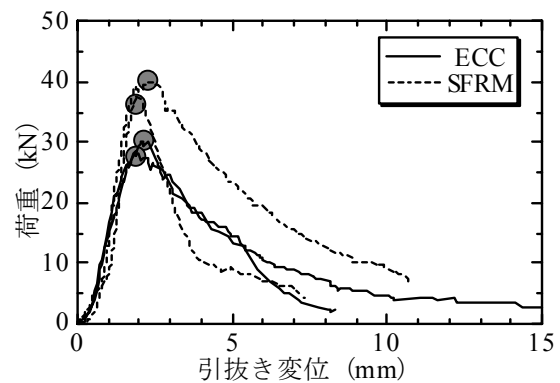
3.2 アンカー引抜き試験の結果

(1) 引抜き最大荷重

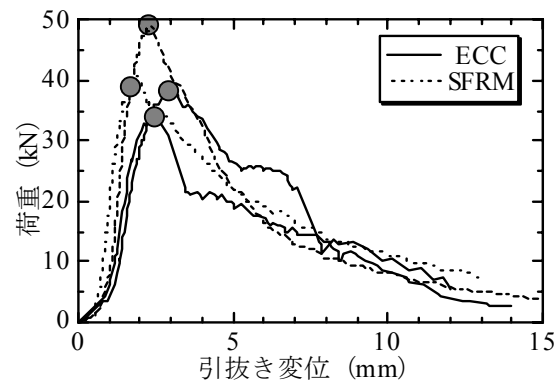
図-5に引抜き試験より得られた荷重-引抜き変位関係を、また図-6に引抜き最大荷重-アンカー埋込み深さ関係を示す。いずれの埋込み深さにおいても SFRM の方が ECC の最大引抜き耐力よりも大きくなっていることが確認できる。稲熊らの研究²⁾によると、高靱性セメント複合材料における引抜き最大荷重は、曲げ強度と比較的相関が高いとしてい



(a) $l_e=25\text{mm}$



(b) $l_e=50\text{mm}$



(c) $l_e=75\text{mm}$

図-5 荷重-引抜き変位関係 (引抜き試験)

る。これは、コーン破壊面において、曲げ試験における断面の応力分布と類似した状態にあるためと考えられている。本試験においても、d=40mm および d=100mm の曲げ載荷試験ともに SFRM の方が ECC よりも曲げ強度が上回っており、引抜き最大荷重においてもその影響が現れたと考えられる。

(2) 引抜き靱性値

アンカーの引抜き試験より得られる荷重-引抜き変位関係において最大荷重までの面積を引抜き靱性値 T_a (kN·mm) として算出した

(図-7参照)。

表-3に算出した引抜き靱性値を、図-8に引抜き靱性値-埋込み深さ関係を示す。
 $l_e=25\text{mm}$ および 50mm の場合では、引抜き最大荷重と同様に引抜き靱性値においても SFRM の方が ECC と比べ大きくなった。しかしながら、 $l_e=75\text{mm}$ では、引抜き靱性値が逆転し、ECC の方が大きくなった。このことは、
 (a)埋込み深さ l_e が小さい場合 ($l_e=25\text{mm}$ もしくは 50mm) には、SFRM に用いた長さ 30mm の鋼繊維が、せき板効果により型枠面に沿って配向し、同時にひび割れ面に対してより垂直に配置される傾向にあると推察されること、
 (b)曲げ試験において、 $d=40\text{mm}$ の場合、ECC と SFRM の曲げ靱性は同程度であるが、 $d=100\text{mm}$ の場合、SFRM よりも ECC の方が大きくなっていることなどに対応しているものと予想される。

(3) ひび割れ性状

図-9に最大荷重時におけるひび割れ状況(トレース)を示す。一般にコンクリートのアンカー引抜き試験を行った場合、ヘッド部の端部付近より主ひび割れが進展し、コーン破壊を生じる⁵⁾。ECC 供試体の場合には、ヘッド部の端部付近から初期ひび割れが発生した後、ヘッド周辺にひび割れが分散し、最終的にコーン破壊に至った。SFRM においても、ひび割れはヘッド部端部付近より発生し、最終的にはコーン破壊した。引抜かれたコーンの頂角(2つの破壊面で形成される角度)については、ECC の方が SFRM よりも角度が小さくなった。

また、図-9の拡大図に示すように、ECC 供試体ではコーン破壊した破壊面周辺ならびにヘッド部周辺にマルチプルクラック(複数微細ひび割れ)が確認でき、特に埋込み深さ l_e が大きくなるほどひび割れ発生領域が大きくなった。一般にひび割れ発生量が増えると靱性が大きくなることを勘案すると、埋込み深さ l_e が大きい方が、ひび割れの発生し得る

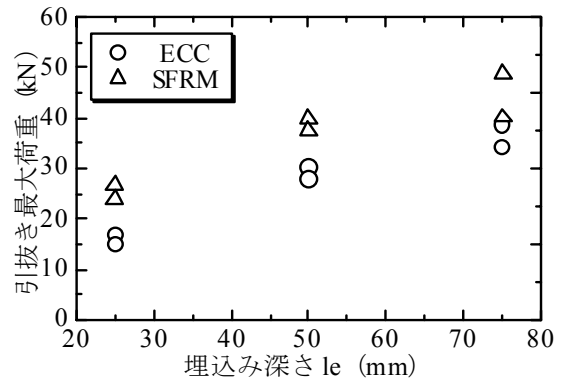


図-6 引抜き最大荷重-埋込み深さ関係

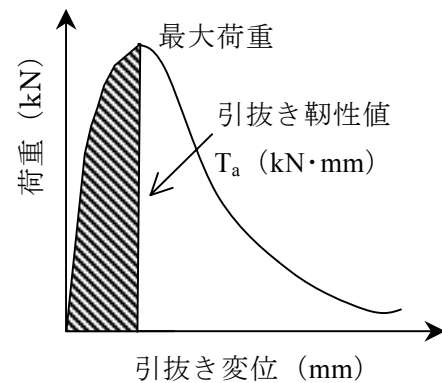


図-7 引抜き靱性値 T_a

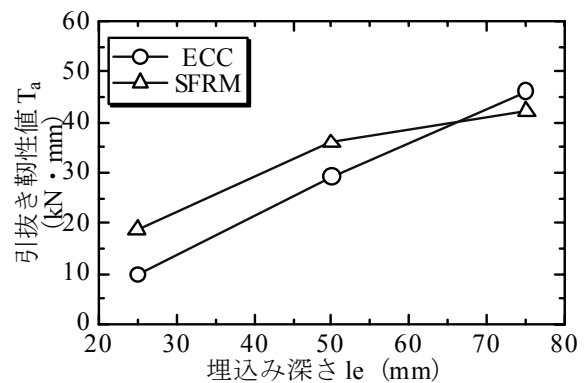


図-8 引抜き靱性値-埋込み深さ関係

領域が大きくなるために、ひび割れがより分散し、引抜き靱性値が大きくなったものと考えられる。したがって、アンカーボルトの性能評価手法のための標準試験方法を検討する場合には、複数ひび割れを発生させるための境界条件(埋込み深さ l_e や支点の位置など)などを明確にする必要があると考えられ、今後データの蓄積が必要である。

4. 結論

本研究で得られた結果を以下にまとめる。

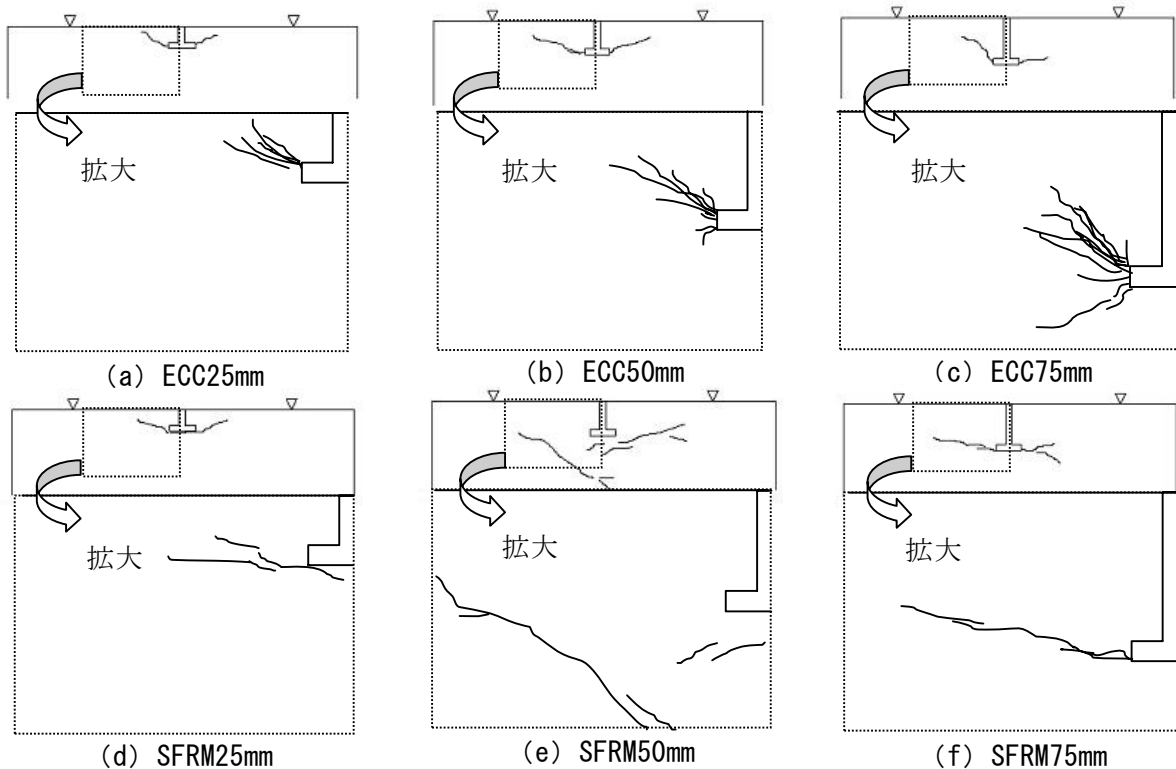


図-9 最大荷重時のひび割れ性状

- (1) 本研究の範囲においてアンカーボルトの引抜き最大荷重は、過去の結果と同様に曲げ載荷試験より得られる曲げ強度との相関が高いことが確認された。
- (2) ECC 供試体における引抜き靱性値は、埋込み深さ l_e が大きくなるほど大きくなる傾向にあった。
- (3) ECC 供試体の場合には、ヘッド部の端部付近から初期ひび割れが発生した後、ひび割れが分散し、最終的にコーン破壊に至った。特に埋込み深さ l_e が大きくなるほどひび割れ発生領域が大きくなった。埋込み深さ l_e が大きい方が、ひび割れの発生し得る領域が大きくなり、引抜き靱性値が大きくなったものと予想される。

今回の 2 次元モデルでの検討は、ひび割れ分散性などを考察するのに非常に有効であったが、ECC ならびに SFRM の引抜き挙動の関係が直接 3 次元モデルに発展できるとは考えにくく、今後は今回の結果の 3 次元への発展性について検証していく予定である。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：高靱性セメント複合材料の性能評価と構造利用研究委員会中間報告書，2002
- 2) 稲熊唯史，柳沢啓悟，国枝稔，六郷恵哲，村田茂：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論文集，pp.15-22，2003
- 3) Li, V. C. : From micromechanics to structural engineering - the design of cementitious composites for civil engineering applications, Journal of Structural Mechanics and Earthquake Engineering, JSCE, Vol. 10, No. 2, pp.37-48, 1993.
- 4) 日本コンクリート工学協会：コンクリートの破壊特性の試験方法に関する調査研究委員会報告書，pp.406-417，2001
- 5) 日本コンクリート工学協会：破壊力学の応用研究委員会報告書，pp.390-409，1993