

論文 超高強度ひずみ硬化型セメント系材料に埋設された頭付きアンカーボルトの引抜き耐力とその算定手法に関する検討

田中 亮一*1・國枝 稔*2・網野 貴彦*3・忽那 惇*4

要旨：超高強度ひずみ硬化型セメント系材料に埋設された頭付きアンカーボルトの引き抜き耐力算定式の構築を目的として引抜き試験を実施した。その結果、引抜き耐力は建築学会式によって算定される値に比べて2.74倍大きくなり、コーン状破壊面の角度は45度より浅く、破壊する領域は建築学会式の有効水平投影面積より大きくなることわかった。また、仮定したコーン状破壊面から引抜き耐力を推定する手法を提案した。

キーワード：UHP-SHCC、頭付きアンカーボルト、コーン状破壊、引抜き耐力

1. はじめに

複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料¹⁾は、一軸引張応力下でひずみ硬化特性を発現し、生じるひび割れ幅は0.2mm以下で、かつひび割れ分散性を有することから、構造物の耐久性向上への寄与や高靱性な性質を活かした構造物利用が期待されている材料である。これまでの適用事例としては、プレキャスト部材²⁾や床板連結構造³⁾などがあり、少しずつではあるが構造物利用が進んできている。

新しい利用検討の一例として、既往の研究^{4),5)}では高靱性セメント系複合材料に埋設された頭付きアンカーボルトの引抜き試験を実施しており、高い靱性能によって引抜き耐力が向上することを明らかにしている。しかし、これらで検討されている圧縮強度レベルは40N/mm²以下であり、高強度領域での知見は現状ほとんどない。

そこで本研究では、圧縮強度が100N/mm²程度と高強度な超高強度ひずみ硬化型セメント系材料（以下、UHP-SHCC：Ultra High Performance-Strain Hardening Cementitious Composite）⁶⁾を用いて、UHP-SHCCに埋設された頭付きアンカーボルトの引抜き試験を実施し、引抜き耐力および破壊形状を確認した。加えて、得られた実験結果と日本建築学会「各種合成構造設計指針・同解説（2010）」にある頭付きアンカーボルトの許容引張り算定式（以下、建築学会式）⁷⁾を比較し、許容引抜き耐力の算定手法について検討した。

なお、本研究成果の適用先として、筆者らが開発したUHP-SHCCを用いた栈橋鋼管杭の巻立て補強工法⁸⁾におけるUHP-SHCC巻立て部と上部工の定着構造を考えている。

2. 実験概要

本研究では、3つのシリーズに分けて実験を行った。シリーズ1では、埋込み長の小さい範囲（10～30mm）で50t型万能試験機を用いて埋設アンカーの引抜き試験を行った。シリーズ2では、埋込み長30～50mmの範囲でセンターホールジャッキを用いて引抜き試験を行った。シリーズ3の実験概要はシリーズ2と同様であるが、へりあきの影響について確認した。以下では3つのシリーズの詳細な実験概要を示す。

2.1 UHP-SHCCの配合条件

UHP-SHCCの構成材料は、低熱ポルトランドセメント（密度3.24g/cm³）、シリカフューム（密度2.20g/cm³、比表面積200,000cm²/g）、エトリンガイト・石灰複合系膨張材（密度3.10g/cm³）、石灰石微粉末（密度2.70g/cm³）、7号珪砂（密度2.68g/cm³）、高強度ポリエチレン短繊維（直径0.012mm、長さ6mm、弾性係数88GPa、引張破断強度2,700MPa）、ポリカルボン酸系高性能減水剤およびポリエーテル系消泡剤である。なお、シリーズ2および3では石灰石微粉末を用いていない。UHP-SHCCの配合条件を表-1に示すが、テストピースによる標準水中養生（20℃水中、材齢28日）後の圧縮強度は、シリーズ1が94.9N/mm²、シリーズ2および3が106N/mm²であった。

2.2 試験体

(1) シリーズ1

シリーズ1の試験体概要を図-1に示す。試験体の母材（UHP-SHCC）寸法は200×200×100mmで、試験体中央部に頭付きアンカーボルトが埋め込まれた構造とした。アンカーは図-1に示すとおり、M22ボルトに直径38mmの定着板（厚み9mm）を固定したものとし、埋込み長（UHP-SHCC表面から定着板までの距離）を10、20、30mmとして試験ケースとした。なお、試験体は各ケー

*1 東亜建設工業（株） 技術研究開発センター 新材料・リニューアル技術グループ 主任研究員（正会員）

*2 岐阜大学 社会基盤工学科教授 博(工)（正会員）

*3 東亜建設工業（株） 技術研究開発センター 新材料・リニューアル技術グループリーダー 博(工)（正会員）

*4 東亜建設工業（株） 技術研究開発センター 新材料・リニューアル技術グループ 研究員（正会員）

ス 3 体とし、アンカーを底型枠に取り付けた状態で UHP-SHCC を打ち込んで製作した。

(2) シリーズ 2 および 3

シリーズ 2 および 3 の試験体概要を図-2 に、シリーズ 1 も含めた実験ケース(頭付きアンカーボルトの仕様)を表-2 に示す。シリーズ 2 および 3 で用いたアンカーは、シリーズ 1 と同構造の M22 ボルトに定着板(直径 44mm, 厚み 12mm)を固定したものとφ22mm スタッドボルト(頭部径 35mm, 頭部厚 10mm)の 2 種類とし、埋込み長を変えて実験ケースとした。なお、2 種類のアンカーで頭部径を変えることで、その違いが及ぼす影響も確認した。試験体の母材寸法はアンカーの埋込み長に応じて大きさを換え、シリーズ 2 のアンカーは試験体中央部に、シリーズ 3 のアンカーは母材端部近くに埋設した。ここで、高靱性なセメント系複合材料に埋設されたアンカーは、埋込み長が小さいほどコーン状破壊面が 45 度(建築学会式におけるコーン状破壊面)より緩い角度で破壊するという知見⁵⁾がある。そこで、シリーズ 3 は 45 度のコーン状破壊面を仮定して母材寸法を設定し、これによるへりあきの影響について確認するシリーズとした。試験体は各ケース 1 体とし、アンカーを側面の型枠に取り付けた状態で UHP-SHCC を打ち込んで製作した。なお、各シリーズで打込み方向は異なるが、UHP-SHCC はブリーディングが発生しないため、打込み方向が実験結果に及ぼす影響はないと考えられる。

2.3 引抜き試験

(1) シリーズ 1

シリーズ 1 のアンカー引抜き試験は、50t 型万能試験機を用いて、図-3 に示すようにアンカーにカブラを介して PC 鋼棒を接続し、PC 鋼棒を下向きに引っ張ることで行った。反力台には、アンカー引抜きによるコーン状破壊面に影響を及ぼさないように、直径 200mm の円状で切り抜いた鋼板を用いた。なお、試験中の計測項目は引張荷重のみとした。

(2) シリーズ 2 および 3

シリーズ 2 および 3 の引抜き試験は、図-4 に示すとおりセンターホールジャッキを用いて行った。なお、試験中の計測項目は、引張荷重とアンカーの鉛直変位(2 箇所)とし、鉛直変位は図-4 に示す位置でアンカーの鉛直変位を計測した。

3. 実験結果

3.1 母材(UHP-SHCC)の力学的性質

引抜き試験体と同条件で製作・養生した UHP-SHCC のテストピースを用いて、引抜き試験と同時に各種力学的試験を行った結果を表-3 に示す。なお、シリーズ 1 の引抜き試験は材齢 49 日、シリーズ 2 は材齢 32 日、シリ

表-1 UHP-SHCC の配合条件

水結合材比	シリカフェーム 結合材比	砂結合材比	繊維 混入率
0.22	0.15	0.10	1.5vol%

※シリーズ 1 の石灰石微粉末の粉体に対する置換率は 17%

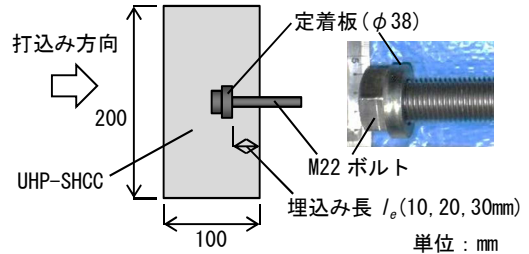
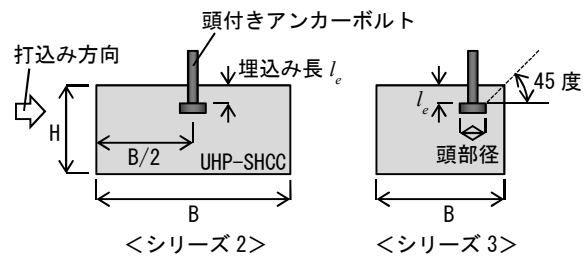


図-1 シリーズ 1 の試験体概要



シリーズ	試験体 No.	試験体母材寸法(mm)		
		L	B	H
2	1	610	410	175
	2	660	460	210
3	3	610	262	175
	4	660	297	210

図-2 シリーズ 2 および 3 の試験体概要

表-2 実験ケース(頭付きアンカーボルトの仕様)

ケース	頭付きアンカーボルト仕様			試験体 No.
	種類	埋込み長	頭部径	
1-1	M22 ボルト +定着板	10mm	38mm	—
1-2		20mm		—
1-3		30mm		—
2-1	M22 ボルト +定着板	30mm	44mm	1
2-2		50mm		2
2-3	φ22mm スタ ッドボルト	40mm	35mm	1
2-4		50mm		2
3-1	φ22mm スタ ッドボルト	40mm	35mm	3
3-2		50mm		4

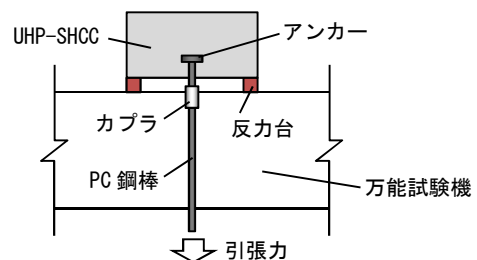


図-3 シリーズ 1 の引抜き試験概要

ーズ3は材齢123日で行っている。シリーズ1とシリーズ2および3で石灰石微粉末の混和の有無による配合の違いはあるが、強度への影響はほとんどなかった。

3.2 最大引張荷重

引抜き試験によって得られた最大引張荷重を図-5に示す。なお、すべての試験ケースにおいてコーン状破壊により母材破壊したのを確認している。この試験結果より、すべてのシリーズにおいてアンカーの埋込み長が深いほど最大引張荷重は大きくなるのがわかる。また、シリーズ2の結果を比較すると、スタッドに比べてボルトのケースのほうが最大荷重は大きい傾向を示した。これは、頭部径の大きさがコーン状破壊面の大きさに影響を及ぼし、結果的に引張荷重が大きくなったためと考えられる。一方、シリーズ3の結果は、同アンカー仕様のシリーズ2（スタッド仕様ケース）の結果に比べて小さかった。これは、アンカーから母材端部までの距離（へりあき）が一部で短かったことにより、コーン状破壊面の大きさに影響を及ぼし、引張荷重が小さくなったためと考えられる。

シリーズ2および3における引張荷重とアンカーの鉛直変位の関係を図-6に示す。なお、試験ケース2-2および2-4のアンカーは、引張荷重115kN程度で降伏点を超えたが、アンカーが破断する前にコーン状破壊したのを確認している。この試験結果より、初期は荷重の増加が大きく、その後荷重の増加が小さくても変位は大幅に増加していることがわかる。既往の文献⁵⁾では、ひび割れ発生後も荷重および変位が増加することが確認されており、本研究においてもUHP-SHCCの有する高い靱性能により同様の挙動を示したものと考えられる。

3.3 コーン状破壊形状

図-7にシリーズ2および3のコーン状破壊によって引き抜けた母材表面を示す。なお、図中には実験による破壊ラインと建築学会式による有効水平投影破壊ラインを合わせて示す。この結果によれば、破壊ラインは建築学会式による有効水平投影破壊ラインに比べて大きく、シリーズ2においては2.7~4.4倍であった。ひび割れの発生状況は、アンカーを中心に放射状および円周方向に生じているひび割れが多数確認された。アンカー引抜きによる最終的な破壊は、破壊面全体が引き抜けるとともに、放射状もしくは円周方向のひび割れが局所的な拡大を伴いながら荷重が低下して生じた。

図-8にシリーズ2の破壊断面を示す。なお、破壊断面は1ケースあたり4側線で実測したものである。この結果より、実測した破壊断面は建築学会式で定義されている45度のコーン状破壊面に比べて角度が浅く、特にアンカー頭部に近いところでは45度に近い角度で破壊面が形成され、表面に近づくほど角度が浅くなっている状

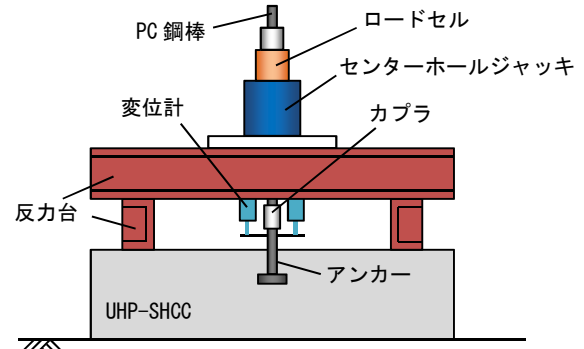


図-4 シリーズ2および3の引抜き試験概要

表-3 母材の力学的性質

項目	シリーズ		
	1	2	3
圧縮強度(N/mm ²)	107	115	143
静弾性係数(kN/mm ²)	24.7	29.6	26.8
引張強度(N/mm ²)*	6.40	6.14	—

*ダンベル供試体を用いた一軸直接引張試験による¹⁾

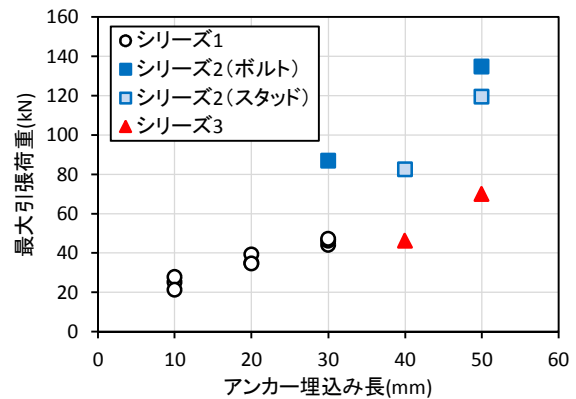


図-5 最大引張荷重とアンカー埋込み長の関係

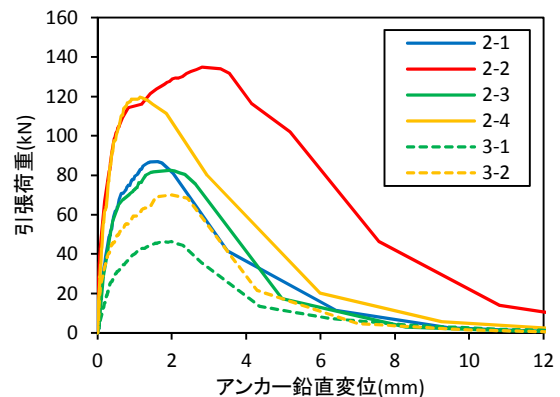


図-6 引張荷重とアンカー鉛直変位の関係

況が確認された。母材が普通コンクリートで検討されている既往の文献⁹⁾においても、破壊角度が45度より浅くなっている傾向は示されているが、本検討における破壊面は初めアンカー頭部付近から生じ、引張荷重の増加とともに拡大していくものの、UHP-SHCCに混入した繊維

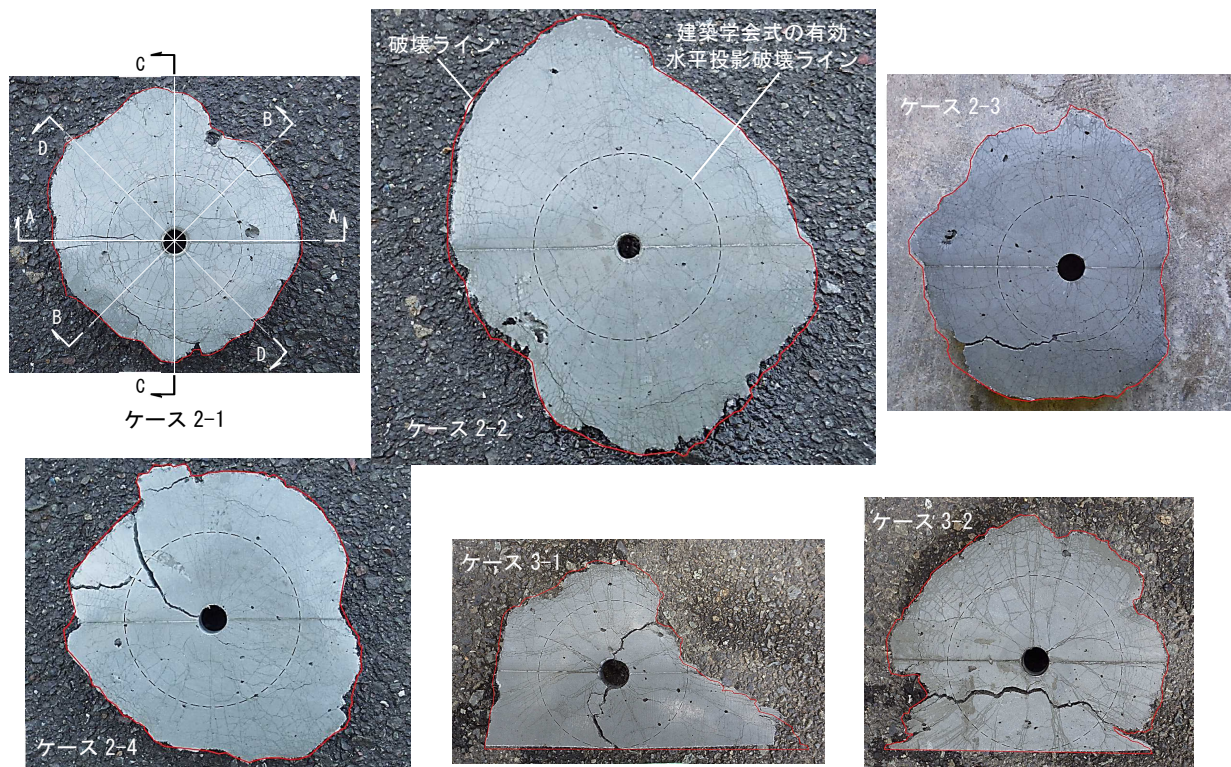


図-7 コーン状破壊面

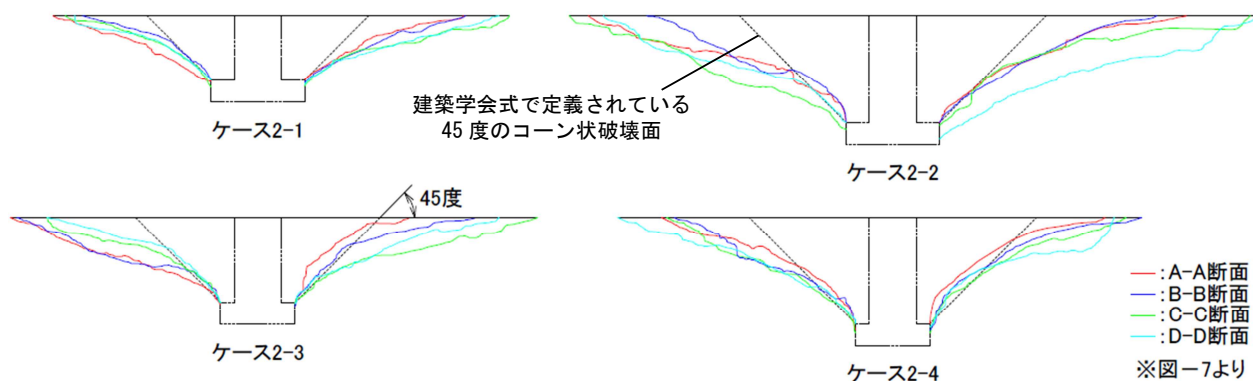


図-8 コーン状破壊断面

が破壊の進行に抵抗することで、アンカーより遠い領域ほど（母材表面に近づくほど）破壊面の角度が浅くなったものと推察される。また、埋込み長が同じケース 2-2 と 2-4 を比べると、ケース 2-2 のほうが破壊面の角度が浅くなっているように見える。これは、頭部径の寸法の違いが影響を及ぼしているものと考えられ、頭部径が小さいほうがアンカーに引張力が作用した際の軸方向力の影響が大きくなり、アンカー頭部に近い位置では破壊面の角度が若干大きくなったものと推察される。

3.4 引張荷重と実測水平投影面積の関係

引抜き試験によって得られた最大引張荷重とコーン状破壊した表面積からアンカーの支圧面積分を差し引いて算出した水平投影面積（以下、実測水平投影面積）の関係を図-9 に示す。この結果より、シリーズ 3 も含めて

おおよそ線形関係になっていることがわかる。このことは、へりあきの影響も含めて引抜き耐力と水平投影面積との間に線形関係が成立し、水平投影面積を算定できれば許容引抜き耐力を推定できる可能性があることを示唆しているものと考えられる。

3.5 建築学会式との比較

引抜き試験で得られた最大引張荷重と建築学会式によって算定される許容引張力（ここでは低減係数を 1 とした）との関係を図-10 に示す。ここで、建築学会式を以下に示す。なお、式中の母材設計基準強度には、表-3 に示すテストピースによる圧縮強度を用いた。

$$p_{a2} = \varphi_2 \cdot c\sigma_t \cdot A_c \quad (1)$$

ここに、 p_{a2} ：コーン状破壊により定まる許容引張力(N)

φ_2 ：低減係数（長期 1/3，短期 2/3）

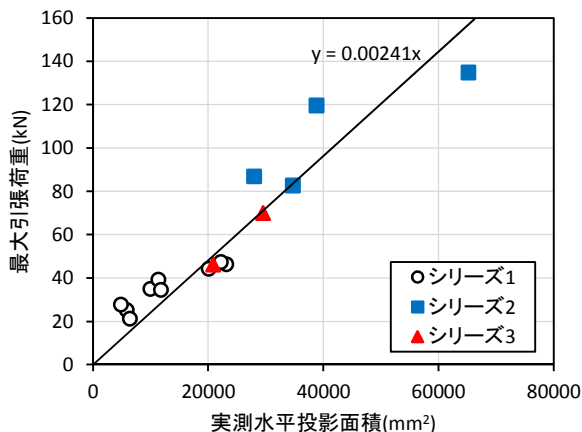


図-9 最大引張荷重と実測水平投影面積の関係

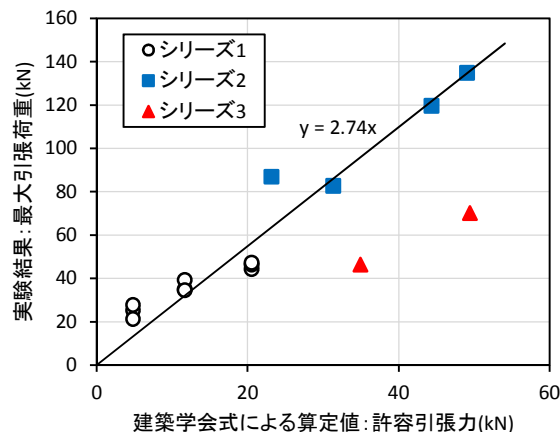


図-10 実験結果と建築学会式による算定値の比較

σ_t : コーン状破壊に対する母材の引張強度
 $(= 0.31 \cdot \sqrt{F_c})$ (N/mm²)
 F_c : 母材の設計基準強度(N/mm²)
 A_c : コーン状破壊面の有効水平投影面積
 $(= \pi \cdot l_{ce}(l_{ce} + D))$ (mm²)
 l_{ce} : 頭付きアンカーボルトの埋込み長(mm)
 D : 頭付きアンカーボルトの頭部径(mm)

図-10より、シリーズ1および2はおおよそ線形関係になっており、実験値は建築学会式による算定値の2.74倍であった。シリーズ3は前述のとおり、へりあきによる影響で引張荷重が小さくなったため、線形関係からは外れている。

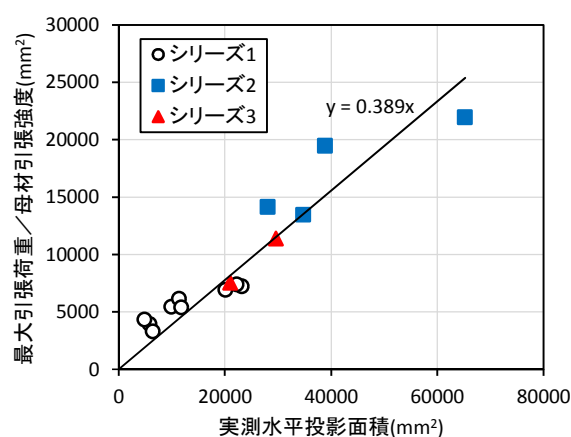


図-11 推定水平投影面積と実測水平投影面積の関係

4. 引抜き耐力算定手法の検討

式(1)のとおり、引抜き耐力は母材の引張強度と水平投影面積の積として算定される。図-9より、UHP-SHCCに埋設されたアンカーの引抜き耐力は水平投影面積と線形関係にあることから、式(1)の考え方が成立するものと考えられるが、母材の引張強度を表す近似直線の傾きは2.4N/mm²であるため、表-3のテストピースによる引張強度に比べて大きく下回る。このことは、コーン状破壊面全体で引抜き耐力に寄与しているわけではないということを示唆しているものと考えられる。

図-11に引抜き試験による最大引張荷重を表-3の引張強度で除して求めた値（以下、推定水平投影面積）と実測水平投影面積の関係を示す。なお、シリーズ3は引張試験を実施していないため、ここではシリーズ2の引張強度を用いた。図-11より、推定水平投影面積は実測水平投影面積の約0.39倍となり、その面積分しか引抜き耐力には寄与していないこととなる。

ここで、図-11の関係をを用いてコーン状破壊面を仮定したもの（仮定したコーン状破壊面）を図-12に、その仮定による許容引抜き耐力の推定式を以下に示す。

$$p_{a2'} = \varphi_2 \cdot \sigma_t \cdot A_c' \quad (2)$$

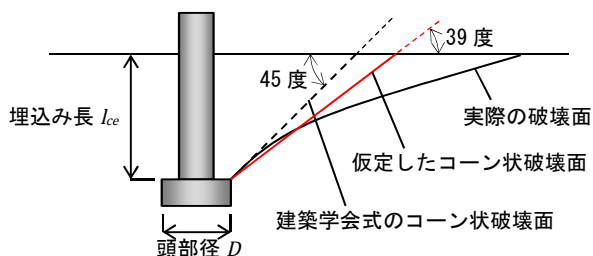


図-12 コーン状破壊面の仮定

ここに、 $p_{a2'}$: UHP-SHCCに埋設された頭付きアンカーボルトの許容引抜き耐力(N)

σ_t : UHP-SHCCの引張強度(N/mm²)

A_c' : 仮定による有効水平投影面積

$$(\pi \cdot (l_{ce}/\tan 39^\circ) \{ (l_{ce}/\tan 39^\circ) + D \}) \text{ (mm}^2\text{)}$$

図-13にケース2-1のコーン状破壊ライン（図-7参照）に仮定したコーン状破壊ラインを追記して示す。これによると、仮定したコーン状破壊ラインより外側に円周方向の微細ひび割れが多数発生していることがわかる。このひび割れは、アンカー引抜き時に曲げが作用し、表層剥離のような形となった際に生じるものと考えられるため、円周方向の微細ひび割れが多数発生している範囲

は引抜き耐力には寄与していないと推察される。実験において、最大引張荷重時に母材表面には大きなひび割れ等の変状は生じていないことから、水平投影面積全体と引抜き耐力が必ずしも対応しないことが推察される。詳細な要因を検討するためには、最大引張荷重時のコーン状破壊面におけるひび割れの進展状況などを確認する必要がある。

次に、式(2)を用いて計算される許容引抜き耐力と実験により得られた最大引張荷重の関係を図-14に示す。これによると、シリーズ1および2は実測値と推定値がおおよそ一致した。一方、シリーズ3は実験結果のほうが小さくなっている。へりあきを加味した推定手法を検討するためには、更なるデータの蓄積が必要であるが、本研究の範囲では低減係数を2/3として得られる推定値とおおよそ一致しており、へりあきの影響を低減係数で加味できる可能性があることが示唆された。

5. まとめ

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) UHP-SHCC に埋設された頭付きアンカーボルトの引抜き耐力は、建築学会式によって算定される許容引張力に比べて、2.74倍大きくなることが確認された。
- (2) UHP-SHCC に埋設された頭付きアンカーボルトの引抜きによるコーン状破壊面の角度は、建築学会式で定義されている45度よりも浅く、破壊面積は大きくなることを確認された。
- (3) 頭付きアンカーボルトの頭部径が破壊面積の大きさに影響を及ぼしている可能性があることを示した。
- (4) へりあきの影響も含めて、コーン状破壊面の水平投影面積と引抜き耐力は線形関係を有していることが確認された。
- (5) 仮定したコーン状破壊面から引抜き耐力を推定する手法を提案した。

参考文献

- 1) 土木学会：複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料設計・施工指針(案)，コンクリートライブラリー127，2007
- 2) 丸田誠，関田徹志，永井覚，山本幸正：プレキャストECC連結梁を用いた高層RC新架構，コンクリート工学，Vol.43，No.11，pp.18-26，2005.11
- 3) 谷口秀明，平喜彦，室田敬，大城壮司：低弾性高じん性セメント系複合体を用いたPC桁床板連結工法，コンクリート工学，Vol.49，No.4，pp.22-29，2011.4
- 4) 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

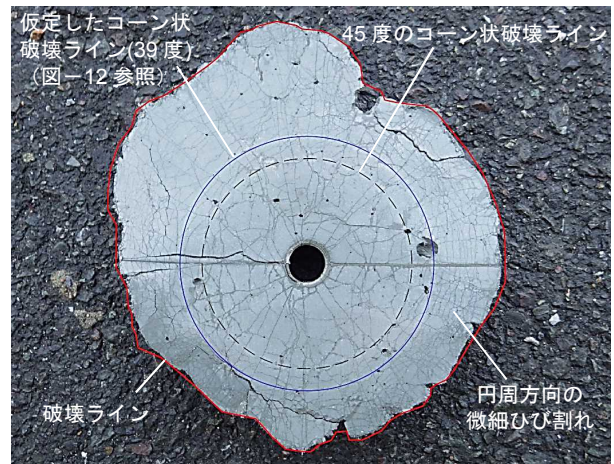


図-13 仮定したコーン状破壊ラインの一例
(ケース 2-1)

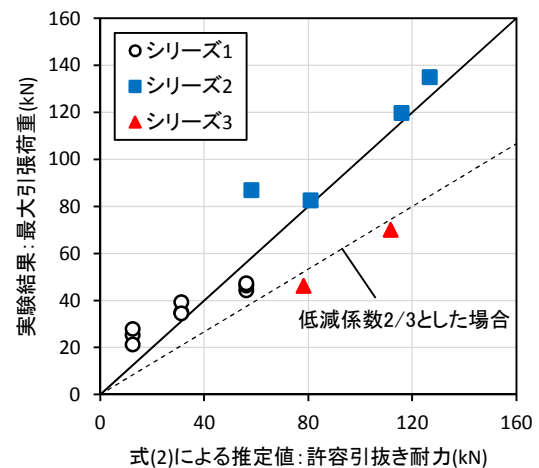


図-14 実験結果と式(2)による推定値の関係

ンポジウム論文集，pp.15-22，2003.12

- 5) 菊田貴恒，三橋博三，Choi Donguk，石川直哉：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.1，pp.327-332，2008
- 6) 国枝稔，Kamal,A.，中村光，Bruhwiler,E.：超高強度ひずみ硬化型セメント系材料の開発，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.1，pp.315-320，2007
- 7) 日本建築学会：各種合成構造設計指針・同解説 -2010改定-，pp.236-237，2010
- 8) 網野貴彦，国枝稔，岩波光保，加藤絵万，田中亮一：劣化損傷した既設栈橋の鋼管杭と上部工の接合部に対する新しい補強技術「タフリードPJ工法」の開発，セメント・コンクリート，No.826，pp.16-22，2015.1
- 9) 松崎育弘：コンクリート部材に定着したアンカーボルトの指示耐力，コンクリート工学，Vol.22，No.7，1984.7