

論文 超高強度ひずみ硬化型モルタル巻立てによる栈橋鋼管杭の曲げ耐力向上効果に関する基礎的研究

網野 貴彦^{*1}・国枝 稔^{*2}・岩波 光保^{*3}・田中 亮一^{*4}

要旨：本稿では、繊維混入率、巻立て厚、定着鉄筋の有無、杭頭構造の違いをパラメータとした超高強度ひずみ硬化型モルタル巻立てによる栈橋鋼管杭の曲げ耐力の向上効果を実験的に検討した。その結果、巻立て断面内の鋼管が降伏に達した後も巻き立てたモルタルは破壊することなく曲げ耐力向上に寄与すること、繊維混入率の増加による曲げ耐力向上の程度は巻立て厚により異なる可能性があることがわかった。また、栈橋鋼管杭の杭頭部補強においては、モルタル巻立て部を上部工と一体化する、もしくは上部工内にまでモルタル巻立て部を連続させる構造とすることで、曲げ耐力を大幅に向上できることを確認した。

キーワード：超高強度ひずみ硬化型モルタル、栈橋鋼管杭、巻立て補強、曲げ耐力、杭頭構造

1. はじめに

港湾施設は、海上一陸上輸送の結節点として、我が国の国際競争力や地域ごとの経済活動を支える重要な役割を担っている。しかし、近年になって、高潮、大規模地震、津波等による被災が様々な地域で発生し、港湾施設に大規模な損壊が生じたときの社会的損失に対する危機感が高まっている。それに加え、現存する港湾施設の大半は高度経済成長期に建設された高齢化施設であり、大量のストックに対する維持管理費の増加も懸念されている。財源縮小が予想される今後は、既存ストックを最大限に活用する長寿命化技術、災害に強い施設への改良技術、低コストな施工技術の開発が必須と考えられる。

一方、港湾構造物のひとつに栈橋があるが、栈橋は海水作用による材料劣化や突発的な外力作用（流木等の漂流物による衝突など）による損傷を受けやすい。そのため、栈橋の鋼管杭に対しては、腐食を防止する目的で、干満帯から飛沫帯にかけて被覆防食材がライニングされる（海中部は電気防食を適用）。しかし、従来の被覆防食材は材料劣化や突発的な外力作用により、当初想定よりも短期間で防食性能を失うケースが見られた。また、杭と上部工の接合部である杭頭部は地震力等の外力の影響が集中する部位であるため、災害に強い栈橋への改良においては杭頭部付近の補強が重要と考えられる。

そこで本研究では、材料劣化が著しく、荷重負担の大きい干満帯から飛沫帯にかけての栈橋鋼管杭の杭頭部付近の補強工法の構築を目的とした。本実験では、杭変形に対するライニング材の追従性の向上、耐衝撃性の向上、有害因子（塩化物イオンなど）の浸入抑制を期待して、高靱性かつ高強度の性質を併せ持つ超高強度ひずみ硬化

型モルタル¹⁾（以下、UHP-SHCCと称する）により巻立てた栈橋鋼管杭の曲げ耐力の向上効果について検討した。

なお、ひずみ硬化型モルタルによる巻立て鋼管の力学挙動を検討したものに文献 2), 3) がある。これらはひずみ硬化性モルタルにより鋼管を巻き立てた点で本研究と同じであるが、超高強度の特性を有しない材料である点、ひび割れ分散性の向上方法として鋼管表面にスパイラル状および部材軸方向の鉄筋を配置させた点で本研究と異なる。本研究では実施工への適用を重視し、現地での設置が比較的容易と考えられる部材軸方向鉄筋のみの配置を検討した。

2. 実験概要

2.1 検討シリーズおよび試験体概要

本実験では次に示す 2 シリーズの載荷実験を行った。

(1) シリーズ 1

シリーズ 1 では、UHP-SHCC 巻立てによる栈橋鋼管杭の補強設計に向けた基礎情報の収集を目的として、実際の栈橋構造に存在する上部コンクリートと鋼管杭の接合部における断面急変の影響のない条件を想定した。試験体は、図-1、表-1 に示すように、UHP-SHCC の繊維混入率、巻立て厚、定着鉄筋の有無をパラメータとしたものとし、図-2 に示す載荷系による曲げ載荷試験を行った。計測項目は、荷重値、スパン中央の変位、純曲げ区間の鋼管および UHP-SHCC 表面のひずみである。なお、試験体の製作は、実際の栈橋鋼管杭への適用を想定し、鋼管を立てた状態にして UHP-SHCC を下方から上方に打ち上げた。また、支承部コンクリートは UHP-SHCC が硬化した後に鋼管を横に倒した状態にして打ち込んだ。

*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 博（工）（正会員）

*2 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 准教授 博（工）（正会員）

*3 （独）港湾空港技術研究所 構造研究チーム チームリーダー 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 修（工）（正会員）

表-1 検討ケース (シリーズ 1)

試験体 No.	UHP-SHCC		定着鉄筋の有無
	繊維混入率	巻立て厚	
1	—	—	なし
2	—		あり
3	1.5%	21mm	なし
4	2.0%		あり
5	1.5%		
6	2.0%		
7	1.5%	45mm	あり
8	2.0%		

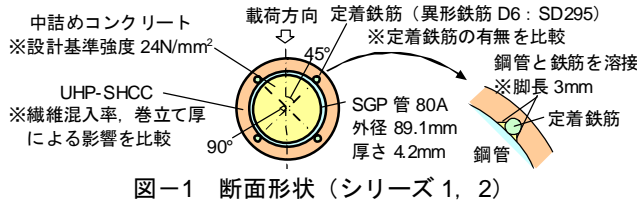


図-1 断面形状 (シリーズ 1, 2)

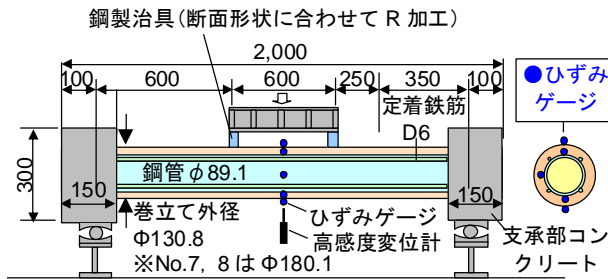


図-2 試験状況図 (シリーズ 1) 単位: mm

(2) シリーズ 2

シリーズ 2 では、栈橋構造において外力の影響が集中する上部コンクリートと鋼管杭の接合部における断面急変の影響を考慮した試験体を使用した。検討ケースを表-2 に示すが、UHP-SHCC の巻立て厚は 21mm に固定し、繊維混入率、模擬上部コンクリートと鋼管の接合部の杭頭構造をパラメータとした。杭頭構造は、図-3 に示すように、模擬上部コンクリートと巻立て部を UHP-SHCC にて一体化させた TypeA 構造、上部コンクリート内に巻立て部を連続させた TypeB 構造、従来の栈橋鋼管杭の被覆防食ライニングと同様に断面急変部と巻立て部の打継目が一致する TypeC 構造を検討した。また、TypeA および B 構造では断面急変部を貫通する定着鉄筋の有無についても検討した。試験体の荷重方法は図-4 に示すとおりであり、計測項目は、荷重値、荷重点の変位、断面急変部における巻立て側寄りの鋼管、UHP-SHCC 表面のひずみとした。UHP-SHCC の打込みは、シリーズ 1 と同様に、鋼管を立てた状態で下方から上方に向けて行った。

なお、TypeA および B 構造の実際の施工は、既設栈橋の場合は杭頭部付近の上部コンクリートの一部をはつりとして、新設栈橋の場合は巻立て部と上部コンクリートまでの型枠を構築して、巻立て部と上部工までを UHP-SHCC にて連続的に打ち込むことを想定したもの

表-2 検討ケース (シリーズ 2)

試験体 No.	繊維混入率	杭頭部構造	備考
9	1.5%	TypeA-1	模擬上部工と巻立て部を UHP-SHCC にて一体化施工する
10	2.0%		
11	1.5%		
12	2.0%	TypeA-2	巻立て部を模擬上部工内に連続させる
13	1.5%		
14	2.0%	TypeB-1	断面急変部に巻立て部の打継ぎを設ける
15	1.5%		
16	1.5%	TypeC	

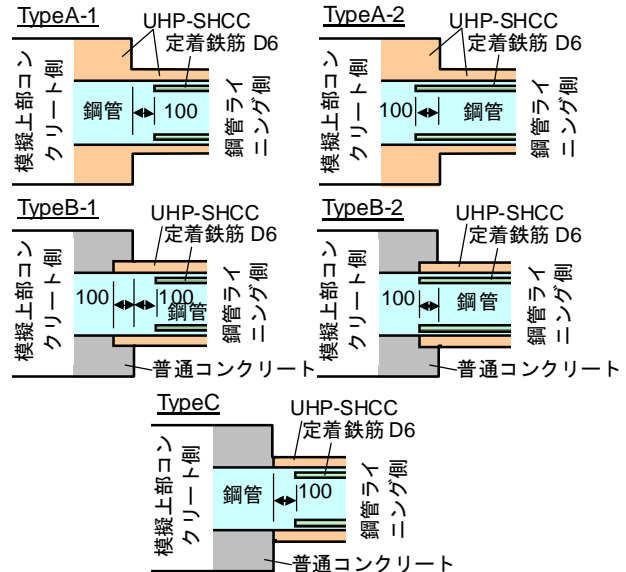


図-3 杭頭構造 (シリーズ 2) 単位: mm

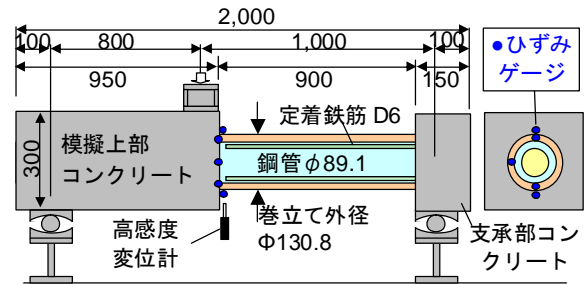


図-4 試験状況図 (シリーズ 2) 単位: mm

表-4 UHP-SHCC の構成材料

種類	物性等
普通ポルトランドセメント	密度: 3.16g/cm ³
珪砂 6号	密度: 2.68g/cm ³
シリカフューム	密度: 2.20g/cm ³ 比表面積: 200,000cm ² /g
膨張材	密度: 3.10g/cm ³ エトリンガイト・石灰複合系
高性能 AE 減水剤	密度: 1.10g/cm ³ ポリカルボン酸系
消泡剤	密度: 1.00g/cm ³ , ポリエーテル系
高強度ポリエチレン繊維	密度: 0.97g/cm ³ , 直径: 0.012mm 長さ: 6mm, 弾性係数: 88GPa 引張破断強度: 2700MPa

表-5 UHP-SHCC の配合

水結合 材比 W/B	砂結合 材比 S/B	繊維 混入率 (%)	単位量(kg/m ³)							
			水	セメント	シリカフ ューム	膨張材	珪砂	繊維	高性能 AE減水剤	消泡剤
0.22	0.10	1.5	347	1301	236	40	158	14.5	31.5	6.9
0.22	0.10	2.0	345	1294	235	40	157	19.3	31.4	6.9

表-6 実験に使用した各材料の仕様

材料	仕様
鋼管	SGP管 80A JIS G 3452
定着鉄筋	鉄筋コンクリート用異形棒鋼 D6 (SD295A) JIS G 3112
ライニング材	UHP-SHCC (表-5 参照)
中詰めコンクリート	レディーミクストコンクリート 普通 24-18-20-N
模擬上部工および 支承部コンクリート	レディーミクストコンクリート 高強度 60-60-20-N

表-7 各材料の力学的性質

材料		力学的性質		
鋼管	試験 成績 表	引張強さ	451N/mm ²	
		破断伸び	36%	
定着鉄筋	試験 成績 表	降伏点	336N/mm ²	
		引張強さ	517N/mm ²	
UHP-SHCC	繊維 混入率 1.5%	載荷 試験 時 にお ける 試験 結果	圧縮強度	121.4N/mm ²
			静弾性係数	27.5kN/mm ²
UHP-SHCC	繊維 混入率 2.0%	載荷 試験 時 にお ける 試験 結果	引張強度	6.5N/mm ²
			引張強度時ひずみ	0.26%
中詰めコンクリート	試験 結果	試験 結果	圧縮強度	119.8N/mm ²
			静弾性係数	27.6kN/mm ²
模擬上部工および 支承部コンクリート	試験 結果	試験 結果	引張強度	8.1N/mm ²
			引張強度時ひずみ	0.11%
中詰めコンクリート	試験 結果	試験 結果	圧縮強度	38.6N/mm ²
			静弾性係数	34.2kN/mm ²
模擬上部工および 支承部コンクリート	試験 結果	試験 結果	圧縮強度	67.2N/mm ²
			静弾性係数	40.3kN/mm ²

注) UHP-SHCC の引張強度および引張強度時ひずみは、「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)」⁴⁾におけるダンベル試験体により測定

である。これは、UHP-SHCC 巻立て部が断面急変部において一体化または連続されることで、UHP-SHCC のひずみ硬化性の発揮とひび割れ分散性の向上を期待してのことである。なお、TypeA, B 構造は、栈橋上部工に対する UHP-SHCC の置換え断面の大小による曲げ耐力の向上程度の違いを把握するために設定している。

2.2 使用材料および力学的性質

本実験で使用した UHP-SHCC の構成材料、配合を表-4、表-5 に、実験に使用した各材料の仕様および力学的性質を表-6、表-7 に示す。

UHP-SHCC は、引張応力作用下において繊維の架橋効果により幅 20μm 程度以下の微細なひび割れを生じ、繊維を 1.5vol.% 混入させた場合で圧縮強度 120N/mm² 以上、引張強度 8~10N/mm² 以上、引張強度時ひずみで 2%程度

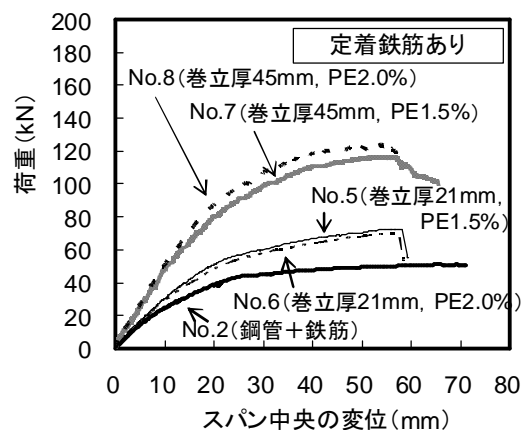
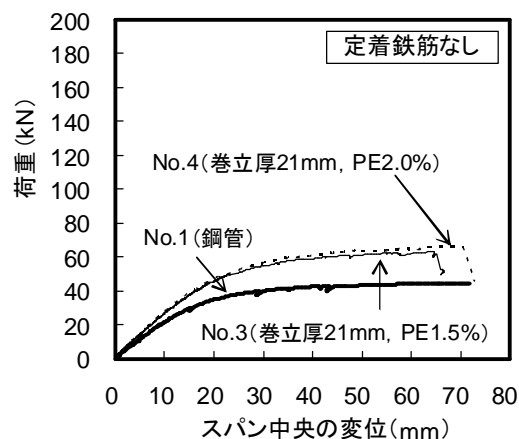


図-5 荷重と変位の関係 (シリーズ 1)

以上を発揮する材料である¹⁾。しかし、表-7 中に示したダンベル試験体による引張試験の結果では、引張強度、引張強度時ひずみとも小さかった。引張試験終了後に破断面を観察したところ、断面内に比較的大きな気泡が確認されたことから、引張試験体製作時の締固めや仕上げが不十分であった可能性が考えられた。

3. 実験結果 (シリーズ 1)

本章では、UHP-SHCC の繊維混入率 (図-5, 6 中では PE と表記)、巻立て厚、定着鉄筋の有無に着目し、純曲げ区間における巻立て鋼管断面の曲げ耐力の向上効果について考察した。

3.1 荷重-変位曲線

図-5 に荷重とスパン中央の変位の関係を示す。これによると、UHP-SHCC 巻立てにより曲げ耐力が向上していることがわかる。なお、巻き立てた試験体すべての終局は、UHP-SHCC 上縁部の圧壊によるものである。

また、巻立てを行った厚さ 21mm のケースについて見

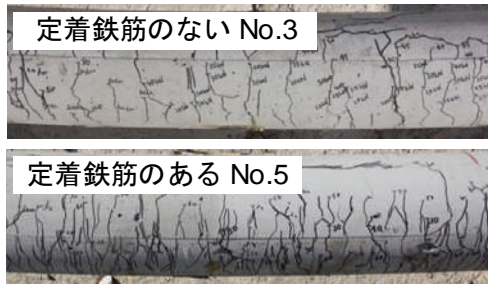


写真-1 試験後のモーメント一定区間に生じたひび割れ状況

ると、定着鉄筋のないケース (No.3, 4 試験体) の終局時荷重はそれぞれ 62, 66kN, 終局時変位は 60, 70mm であり、とくに繊維混入率の違いにより終局時変位が異なった。一方、定着鉄筋を配置したケース (No.5, 6 試験体) の終局時荷重はそれぞれ 72, 70kN, 終局時変位は 58, 57mm となり、繊維混入率の違いによる終局時荷重、変位の違いは見られなかった。また、繊維混入率 2.0% のケース (No.4, 6 試験体) で比較すると、定着鉄筋を配置した場合の終局時変位は配しなかった場合に比べて 10mm 程度小さくなった。定着鉄筋は鋼管と UHP-SHCC 間の付着強化とひび割れ分散性の向上を期待して配置したものである。写真-1 に定着鉄筋のない No.3 試験体、定着鉄筋のある No.5 試験体のモーメント一定区間に生じたひび割れ発生状況を示すが、定着鉄筋を配置した試験体のほうがひび割れ分散性は向上していた。定着鉄筋のない試験体の終局時変位が大きくなった理由として、鋼管と UHP-SHCC 間に付着がないため部材の曲げに対して滑りが生じ、UHP-SHCC の圧壊ひずみに達するまでに大きな変形が必要となったことが考えられる。実際の栈橋鋼管杭への適用においては、ひび割れ分散性を向上させて塩化物イオン等の有害物質の浸透を抑制することが重要となるため、定着鉄筋の配置は必要と考えられる。

次に、巻立て厚 45mm のケース (No.7, 8 試験体) と 21mm のケース (No.5, 6 試験体) を比較すると、巻立て厚が大きいほど終局時荷重は増加した。また、No.7, 8 試験体の終局時荷重は各々 117, 123kN となり、若干ではあるが繊維混入率の増加による曲げ耐力の向上が見られた。巻立て厚 21mm では繊維混入率の増加による曲げ耐力の向上がなかったのに対し、45mm では見られたことから、曲げ耐力向上に寄与する繊維混入率の増加の効果は巻立て厚により異なる可能性が考えられた。なお、No.7, 8 試験体の終局時変位は 56, 57mm とほぼ同じであり、巻立て厚 21mm のケースと同様、定着鉄筋の影響が見られた。

3.2 曲げモーメントと鋼管の曲率の関係

図-6 に、スパン中央断面における曲げモーメントと鋼管の曲率の関係を示す。なお、鋼管の曲率は鋼管の上縁、下縁におけるひずみの差を鋼管の外径 (89.1mm) で除して算出した。ただし、No.8 試験体は終局に達する前

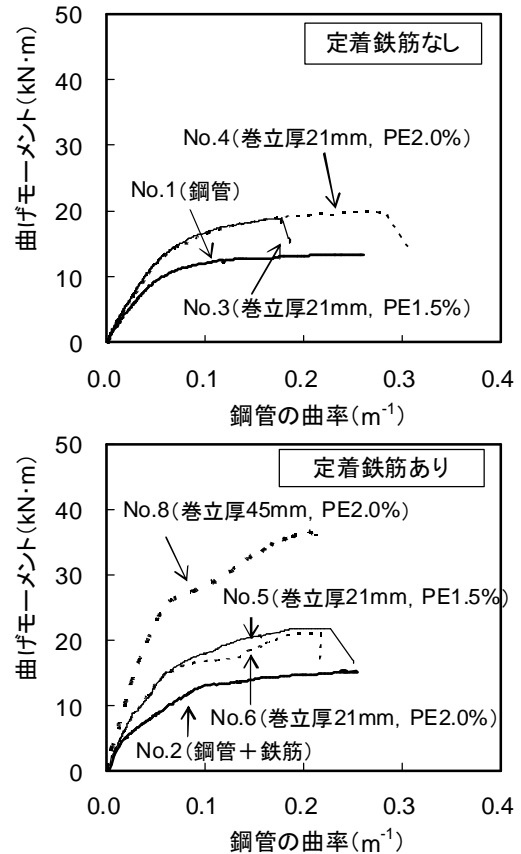


図-6 スパン中央断面における曲げモーメントと鋼管の曲率の関係 (シリーズ 1)

にひずみゲージが破損したため、図中では測定できた範囲までの曲率を示している。また、試験体 No.7 は、試験直後から測定値に異常が認められたことから除外した。

巻立て厚 21mm のケースで定着鉄筋のない No.3, 4 試験体の結果を比較すると、No.3 試験体の終局曲げモーメント、終局時曲率は 19kN・m, 0.18m⁻¹, No.4 試験体は 20kN・m, 0.28m⁻¹ であった。一方、定着鉄筋を配置した No.5, 6 試験体のそれらは 22kN・m, 0.22m⁻¹, 21kN・m, 0.22m⁻¹ とほぼ同じ値であった。このことから、定着鉄筋がない場合は UHP-SHCC の繊維混入率の増加による終局時曲率の増加を期待できるが、定着鉄筋がある場合はそれらが期待できないことがわかった。ただし、繊維混入率 1.5% で定着鉄筋を配置した No.5 試験体の終局曲げモーメント、終局時曲率は、定着鉄筋のない No.3 試験体のそれらよりも若干大きくなった。また、巻立て厚 45mm のケース (No.8 試験体) では、21mm のケース (No.6 試験体) よりも終局曲げモーメントが大きく向上した。

なお本実験では、鋼管の曲率が 0.1m⁻¹ に達した時点で鋼管縁部のひずみが 2,000μ 以上に達し降伏していた。それに対し、鋼管の曲率が 0.1m⁻¹ に達した後も UHP-SHCC は圧壊せずに、曲げモーメントの増加に寄与していた。このことは、鋼管の降伏後も、UHP-SHCC はひずみ硬化性を保持できていたことを示していると考えられる。

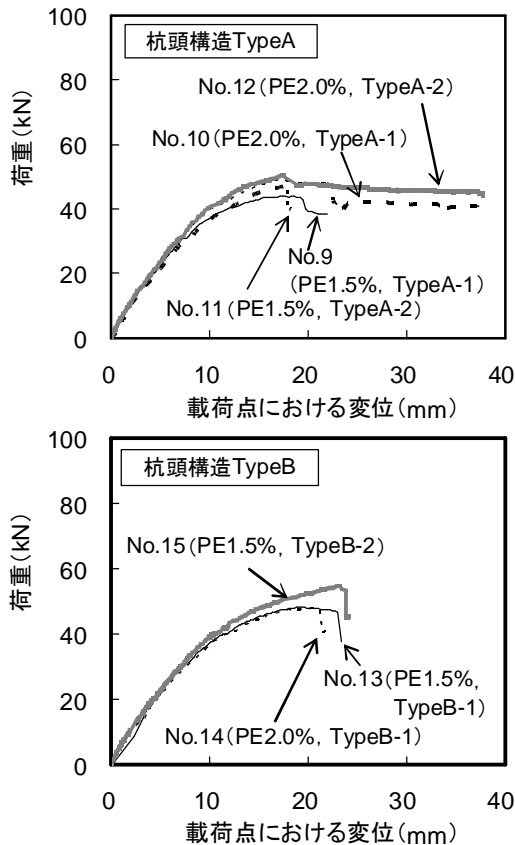


図-7 荷重と変位の関係 (シリーズ 2)
(杭頭構造ごとの繊維混入率に対する比較)

4. 実験結果 (シリーズ 2)

本章では、実際の栈橋構造を模擬した上部コンクリートと鋼管杭の断面急変部における曲げ耐力の向上効果について考察した。ここでは、UHP-SHCC の繊維混入率 (図-7~9 中では PE と表記)、断面急変部の杭頭構造をパラメータとした比較を行った。

4.1 繊維混入率が曲げ耐力の向上効果に与える影響

図-7 に、TypeA, B 構造における荷重と変位の関係を示す。TypeA-1 構造 (断面急変部に定着鉄筋を貫通させないケース) における No.9 試験体 (繊維混入率 1.5%), No.10 試験体 (繊維混入率 2.0%) の結果を比較すると、繊維混入率の大きい No.10 試験体のほうが終局時荷重および変位とも大きい。一方、TypeA-2 構造 (断面急変部を貫通する定着鉄筋を設けたケース) の No.11 試験体 (繊維混入率 1.5%) の終局時荷重および変位は 49kN, 17mm, No.12 試験体 (繊維混入率 2.0%) では 50kN, 18mm であり、ほぼ同じ値を示した。この傾向はシリーズ 1 と同様であり、UHP-SHCC の巻立て厚が小さく、最大曲げモーメントが作用する断面に定着鉄筋が配置される場合には、繊維混入率の増加による曲げ耐力の向上効果が得られない可能性があることを示している。

次に、TypeB-1 構造 (断面急変部に定着鉄筋を貫通させないケース) における No.13 (繊維混入率 1.5%) およ

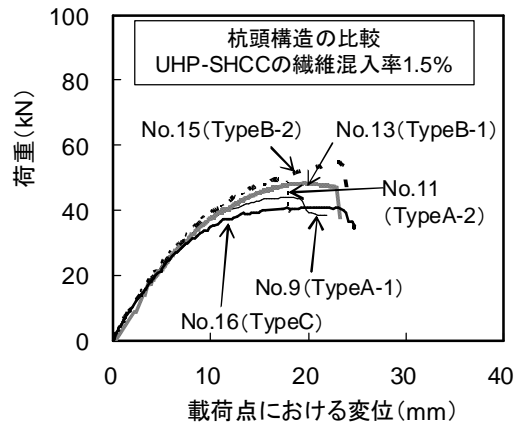


図-8 荷重と変位の関係 (シリーズ 2)
(杭頭構造の違いによる比較)

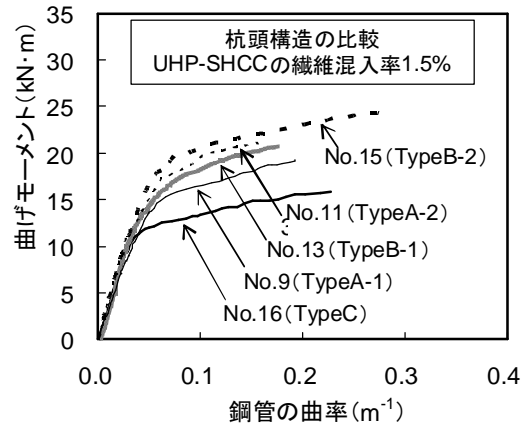


図-9 断面急変部における曲げモーメントと鋼管の曲率の関係 (シリーズ 2)
(杭頭構造の違いによる比較)

び No.14 試験体 (繊維混入率 2.0%) を比較すると、終局時荷重はほぼ同じであった。また、TypeB-2 構造の No.15 試験体 (断面急変部を貫通する定着鉄筋を設けたケース) の結果は、TypeB-1 構造の No.13 試験体よりも終局時荷重は大きくなったが、これは断面急変部を貫通させた定着鉄筋の配置による断面増加の影響と考えられる。

4.2 杭頭構造が曲げ耐力の向上効果に与える影響

図-8, 9 に、杭頭構造の違いに着目して (UHP-SHCC の繊維混入率 1.5%), 荷重と変位の関係、曲げモーメントと鋼管の曲率の関係を整理した結果を示す。これらによれば、UHP-SHCC 巻立て部を模擬上部工と一体化、もしくは上部工内まで連続させた TypeA, B 構造のほうが、断面急変部に打継ぎを設けた TypeC 構造よりも大幅に曲げ耐力が向上できていることがわかる。また本実験では、TypeB 構造のほうが TypeA 構造よりも若干曲げ耐力が大きめとなっているが、両者は同程度のものである。図-10 に No.16 試験体 (TypeC 構造) がほぼ終局状態に達した時点 (曲げモーメント 15kN·m 発生時) における断面急変部のひずみ分布を示すが、この結果からもわかるように、No.16 試験体 (TypeC 構造) では鋼管下縁のひ

ずみがすでに降伏しているが、その他の杭頭構造では UHP-SHCC 巻立て上縁部を含む鋼管内のひずみ分布は直線関係を保持しており(巻立て下縁部は UHP-SHCC にひび割れが発生しているため直線関係は保持されていない)、曲げに対する余力が残されている状況が伺える。

写真-2 に、試験終了後の断面急変部付近のひび割れ発生状況を示すが、TypeA および B 構造では巻立て部の杭頭付近に複数の微細ひび割れが発生しているのに対し、TypeC 構造では打継目が大きく開いた状況が確認された。実際の栈橋への適用において地震力等による曲げが作用した場合、TypeC 構造のように打継目に開きが残留する構造は杭の腐食に対する耐久性の観点からも好ましくはない。従来の防食ライニングと同様、打継目にシーリングを施す必要があり、長寿命化および災害に強い栈橋への改良においては、TypeA または B のような杭頭構造とした UHP-SHCC 巻立てが有効と考えられる。ただし、今後も杭頭構造の詳細については検討が必要と考えている。

5. まとめ

本研究では、UHP-SHCC により巻立て補強した栈橋鋼管杭の曲げ耐力の向上効果を実験的に検討した。本研究により得られた知見を以下に示す。

- (1) UHP-SHCC により鋼管を巻き立てることで曲げ耐力は向上し、巻立て厚を大きくすることで曲げ耐力はさらに向上した。ただし、曲げ耐力の向上に寄与する UHP-SHCC の繊維混入率の増加による効果は巻立て厚ごとに異なる可能性があることも確認された。今後、巻立て厚ごとの繊維混入率の設定方法について検討が必要と考えられた。
- (2) 最大曲げモーメントが作用する断面に UHP-SHCC と鋼管の付着を強化する鉄筋を配置した場合、繊維混入率増加による曲げ耐力の向上効果はほとんど得られないことがわかった。しかし、定着鉄筋の配置は、UHP-SHCC のひび割れ分散性の向上に大きく貢献しており、栈橋鋼管杭の被覆防食材としての有害物質の浸透抑制において有効であることがわかった。
- (3) 鋼管に巻き立てた UHP-SHCC は、断面内の鋼管が降伏曲率に達した後も破壊することなく、曲げ耐力の向上に寄与することがわかった。
- (4) 栈橋鋼管杭の杭頭部補強においては、UHP-SHCC 巻立て部を上部コンクリートと一体化させた構造、もしくは上部工内まで巻立て部を連続させた構造とすることが有効であり、これにより曲げ耐力が大幅に向上されることを確認した。

今後は実物大規模の試験体による曲げ載荷試験を実施し、本研究の成果と合わせて、本工法の補強設計手法を確立していく所存である。

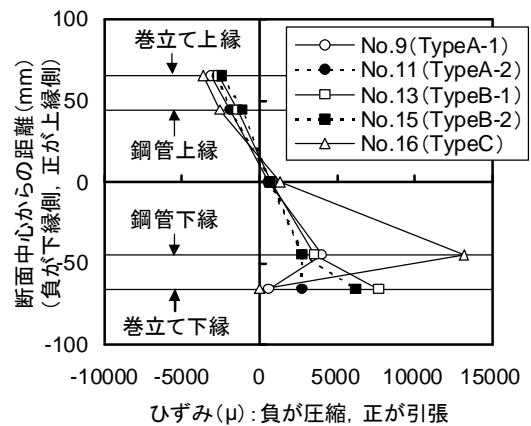


図-10 ひずみ分布 (シリーズ2)
(曲げモーメント 15kN·m 時点)



(a)No.9 試験体 (TypeA 構造) (b)No.13 試験体 (TypeB 構造)



(c) No.16 試験体 (TypeC 構造)

写真-2 試験終了後における断面急変部付近のひび割れ発生状況

謝辞

本研究の一部は、国土交通省「平成 23 年度建設技術研究開発助成」により実施したものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 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
- 2) 森川秀人, 国枝稔, 藤本安宏, 六郷恵哲: ひずみ硬化型高靱性セメント複合材料で鋼材を被覆した部材の力学挙動, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.263-268, 2003
- 3) 山下賢司, 藤本安宏, 林承燦, 六郷恵哲: 複数微細ひび割れ型コンクリートにより被覆した鋼管の曲げ破壊性状とひび割れ性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.301-306, 2005
- 4) 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, pp.試験-5-試験-8, 2007