

「ユニバーサルクリート®」の橋梁への適用性評価

平田 隆祥 石関 嘉一
竹田 宣典

Evaluation of the Applicability of the Universal-Crete Method to Bridges

Takayoshi Hirata Kazuyoshi Ishizeki
Nobufumi Takeda

Abstract

This paper discusses a high performance fiber reinforced cement composite (HPFRCC) obtained using polypropylene short fibers. Polypropylene short fibers are used as a concrete admixture to improve performance in different contexts. For instance, this fiber is used to improve fire resistance, delamination resistance, and bending strength. The purpose of this study was to determine the applicability of the HPFRCC obtained using polypropylene short fibers to bridge constructions. We demonstrated that the use of HPFRCC could help reduce the destructive effects of massive earthquakes.

概要

ポリプロピレン製短繊維は、耐火・耐爆裂性能や耐はく離・耐はく落性能、曲げじん性向上などを目的としてセメント・コンクリート用混和材料として適用されている。一般に、この繊維は、セメントマトリクス中の化学安定性や変形性、分散性に優れるとともに、ポリプロピレン樹脂自体に極性が無く、セメントと化学的に反応しない特徴を有する。そこで、セメントマトリクス中での一体性や、付着性を改良した連糸形状のポリプロピレン製短繊維を、高じん性モルタルに適用した「ユニバーサルクリート」を開発した。本報告では、この「ユニバーサルクリート」が実規模橋梁耐震実験に採用され、橋脚基部に使用した場合の効果が評価された結果について報告する。その結果、橋脚基部に「ユニバーサルクリート」を用いることで、巨大地震を想定した震動に対してもはく離やはく落が発生せず、橋脚基部の破壊形態の改善が出来た実験結果を紹介する。

1. はじめに

引張力を分担し、ひび割れ幅を微細に抑え、大きな引張変形とじん性を有するセメント系材料として「複数微細ひび割れ型繊維補強セメント系材料(High Performance Fiber Reinforced Cement Composite :以下HPFRCCと表記)」があり、2007年3月に(社)土木学会からその設計・施工指針(案)¹⁾が発刊された。このHPFRCCは、セメント系材料と補強用の短繊維を用いた複合材料で、一軸引張応力下において擬似ひずみ硬化特性を示し、微細で高密度の複数ひび割れを形成する高じん性材料である。

従来、このHPFRCCの補強用短繊維として、有機系短繊維であるポリビニルアルコール製短繊維^{1) 2)}や高張力ポリエチレン製短繊維が用いられている。

一方、現在、セメント・コンクリート分野で使用実績が多い有機系短繊維として、ポリプロピレン製短繊維(以下PP短繊維と表記)がある。このPP短繊維は、セメントマトリクス中での化学的安定性や変形性、分散性に優れるとともに、ポリプロピレン樹脂自体に極性が無く、セメントと化学的に結合しないため、長期材齢にわたり伸び能力が変化しない特徴³⁾を有する。そこで、セメントマトリクス中での一体性や接着性をさらに改良した連糸形状のPP短繊維を、HPFRCCに適用したユニバーサ



Photo 1 実規模橋梁耐震実験の状況(E-Defense)
Set-up using E-Defense shake table(E-Defense)

ルクリートを開発⁴⁾した。

このユニバーサルクリートは、高いじん性を有しており、これまでに梁試験体による静的な構造性能の確認実験を行っている。その結果、曲げ降伏荷重は一般のRC部材に比較しておよそ2割増加すること、せん断耐力は一般のRC部材に比較して2倍以上向上すること、また、その破壊形態は一般のRC部材に比較し、ひび割れが分散してじん性が増加することなどを明らかにした⁴⁾。

本報告は、Photo 1に示す兵庫県南部地震を模擬した実

規模橋梁耐震実験に、このユニバーサルクリートが採用され、橋脚基部に適用した場合の効果が評価され、震動破壊形態が改善された実験結果を紹介する。

2. 耐震性向上を図る次世代型橋梁耐震技術開発の取組み

(独)防災科学技術研究所・兵庫耐震工学研究センターにおける橋梁耐震実験研究は、2005年度から開始され、「兵庫県南部地震で被災した橋梁の破壊メカニズムの解明」、「現在実施されている耐震補強技術や耐震設計法の有効性の実証」、「耐震性向上を図るための次世代型耐震技術の開発」を目標⁵⁾として進められている。

これまでの研究では、1970年代に建設された橋脚を対象に、JR鷹取駅で記録された観測波を震動台に作用させた結果、震動に伴う部材の変形により、橋脚の最下部でかぶりコンクリートがはく落するとともに、コアコンクリートがこぶし大のコンクリート塊に破碎されて鉄筋かごの内部から飛び出し、大きな破壊へと進展することが確認されている。

次に、現行の基準で設計された橋脚を同じ様に揺らした結果、兵庫県南部地震と同程度の地震に対しては、ひび割れが発生する程度の損傷で済むことが確認された。さらに、耐震性に対する余裕度を検証するため、兵庫県南部地震の1.25倍の地震動を作用させると、曲げ耐力の減少までには至らないが、コアコンクリートが圧壊し、コンクリート塊が鉄筋かごから飛び出すことが確認されている^{5) 6)}。

そこで、橋梁耐震実験研究では、現行の設計基準によるRC橋脚の耐震性を更に上廻る次世代の高耐震RC橋脚を開発するため、巨大地震が発生した場合に、被害が想定される橋脚基部のコンクリートの破壊形態を改善することを目指している。即ち、被害が集中する橋脚基部の粘りを増すため、この部位にHPFRCCの適用が検討された。このHPFRCCは、引張り鉄筋の断面積を増加させるのと同じ効果が得られることが報告¹⁾されている。

3. ユニバーサルクリートの概要

ユニバーサルクリートは、セメント系材料と補強用の有機系短繊維を用いた複合材料で、一軸引張応力下において、Fig. 1に示すような擬似ひずみ硬化特性を示すとともに、微細で高密度の複数ひび割れを形成するHPFRCCである。

本実験では、セメントマトリックス中での分散性や一体性を改良した、Photo 2に示す連糸形状のPP短繊維を用いた。このPP短繊維は、繊維表面に微細な凹凸を有している。これまでの実験で、このPP短繊維を用いたユニバーサルクリートは、良好なフレッシュ性状や、繊維の分散性が得られることを確認³⁾している。

ユニバーサルクリートは、引張応力下で降伏点を有す

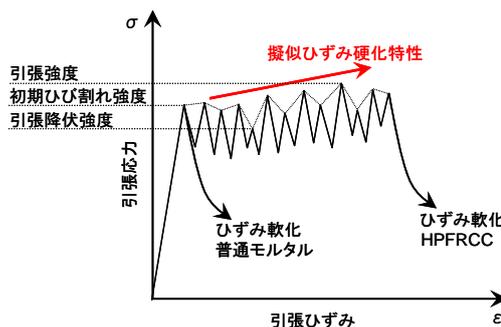


Fig. 1 引張応力下におけるひずみ硬化およびひずみ軟化特性の概念²⁾

Tensile-strain Diagram of HPFRCC

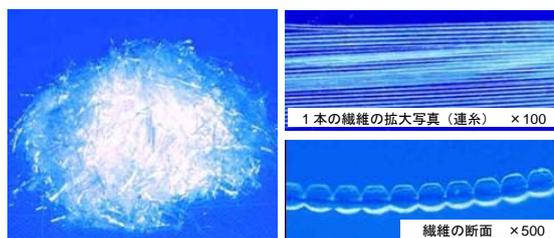


Photo 2 使用したPP短繊維
Polypropylene Short Fibers



Photo 3 HPFRCCボードの曲げ载荷状況
Bending Test of HPFRCC Board

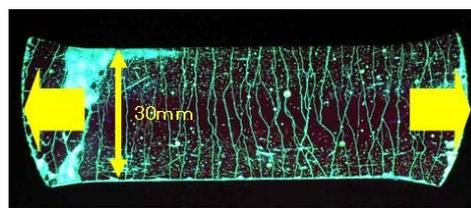


Photo 4 複数微細ひび割れ発生状況
Appearance of Multiple Crack

るセメント複合材料で、Photo 3に示すように、高い変形性能を有する材料である。繊維の種類や長さ、添加量、セメントや粉体の種類を厳選し、練混ぜ水と混合することで、ひび割れが発生する際に生じる引張力よりも、発生したひび割れを架橋する繊維の引張力を大きくすることが可能となる。

これにより、Photo 4に示すように発生するひび割れ幅を微細に制御することができる。この材料は、ひび割れが発生した後も応力を負担でき、従来のモルタル・コン

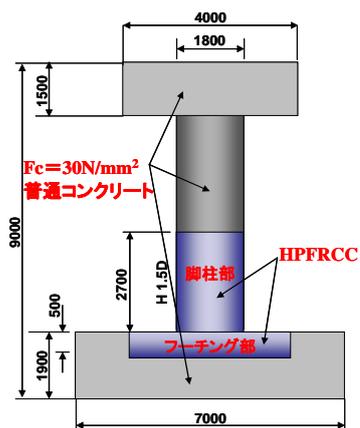


Fig. 2 実大橋脚試験体C1-6の形状
C1-6 Column Location

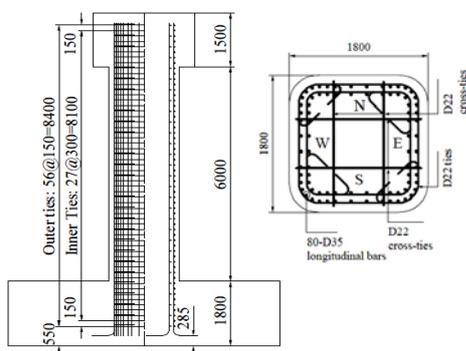


Fig. 3 実大橋脚試験体の配筋⁷⁾
C1-6 Column Reinforcement



Photo 5 実大橋脚試験体完成
C1-6 Column

クリートの100倍以上の伸び能力と変形性能,そして耐久性が得られ,新材料としての設計が可能となる。

このようにユニバーサルクリートは,静的な一軸直接引張試験条件下では,微細で高密度の複数ひび割れを形成することが分かっている。しかし,この材料で作製した実規模の構造部材が,動的な曲げやせん断力で破壊する形態は明確になっていない。特に,橋脚躯体基部にHPFRCCを適用した場合,巨大地震で生じる破壊エネルギーにより,ひび割れが生じた後にコアコンクリートをどのように破壊するかを想定することは難しいため,1/4 模型を対象とした載荷実験⁷⁾を通して,その性能が

Table 1 ユニバーサルクリートの配合

Mixed Proportion of Universal-Crete				
W/P (%)	W (kg/m ³)	P (kg/m ³)	PP短繊維 (kg/m ³)	流動助剤 (kg/m ³)
27.0	371	1,400	27.0	7.0

P; 粉体密度2.87g/cm³, PP短繊維; 繊維密度 0.91 g/cm³, 3vol.%

Table 2 PP短繊維の物性
Property of Polypropylene Fiber

使用繊維	繊維度 (dtex)	長さ (mm)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)
ポリプロピレン短繊維 (PP繊維)	13	12	482	5000

Table 3 試験項目および試験方法

Test Items and Method	
試験項目	試験方法
スランブフロー	JIS A 1150 に準ずる
空気量	JIS A 1128 に準ずる (モルタルエアメータ使用)
繊維混入率	繊維洗い試験
圧縮強度	JIS A 1108 に準ずる($\sigma_{28, 91}$ 日)
一軸直接引張強度	HPFRCC 指針に準ずる(σ_{28} 日)

把握された。その結果, 実規模橋梁耐震実験に採用された。

4. 実験概要

4.1 試験体の形状

実規模橋梁耐震実験で用いた実大橋脚試験体C1-6の形状をFig. 2に, 配筋図をFig. 3に, 実大橋脚試験体の完成状況をPhoto 5に示す。

ユニバーサルクリートは, Fig. 2に示すように, フーチングの一部と柱脚の高さ2700mm(柱径の1.5倍)の部分に適用された。その他の部材は, 設計基準強度30N/mm²の普通コンクリートが用いられた。

4.2 配合および試験方法

実験に使用したユニバーサルクリートの配合をTable 1に, PP短繊維の物性をTable 2に示す。また, Table 3に試験項目および試験方法を示す。

ユニバーサルクリートの構成材料は, 水, 高じん性ブレミックス粉体, PP短繊維および流動助剤である。

品質試験項目は, スランブフロー, 空気量, 繊維混入率, 圧縮強度および一軸直接引張強度とした。一軸直接引張強度供試体はHPFRCC指針¹⁾に規定されているFig. 4に示す厚さ13mmのダンベル型とした。また, 一軸直接引張強度試験は, Photo 6に示す試験機を用いた。

4.3 練混ぜ, 圧送および打込み

ユニバーサルクリートの練混ぜ, およびポンプ圧送に使用した機材一覧をTable 4に示す。ミキサは3台使用し,

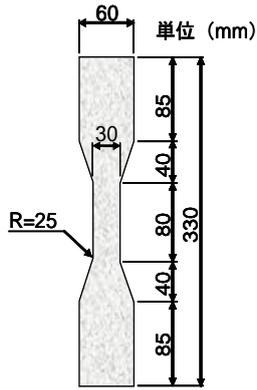


Fig. 4 試験体の形状 Photo 6 一軸直接引張試験
Tensile Strength Test Piece Uni-axial Tensile Strength Test

Table 4 使用機材一覧 (E-Defense)
Mixing and Pumping System

機材名称	規格	数量
グラウトミキサ	練り容量150ℓ	3台
スクイズ式ポンプ	3.5m ³ /h (イバ [®] -ター付)	1台
モルタルホッパー	容量100ℓ	1台
圧送ホース	内径φ2インチ	30m

1台のモルタルホッパーに集約した後、スクイズ式ポンプを用いて圧送した。圧送距離は水平15m、垂直15mの全長30mである。ポンプ圧送は閉塞および脈動が無く、2.5m³/hで安定して打設できた。また、打込みは、密な配筋においても、細部まで充填できることを確認した。

打込み手順は実施工を考慮し、フーチング部に約9m³打ち込んだ後に一旦打ち止め、打継ぎ処理剤を散布した。フーチング部が硬化した後に、脚柱部に約9m³の打設を行った。試験の頻度は打設開始前、打設終了後および打設開始から1時間毎(約3m³毎)とした。なお、硬化後はPhoto 7に示すように、マスブロック形状の打込みとなったが、温度応力ひび割れや、表面の色むら、気泡などの変状は発生しなかった。

4.4 橋梁耐震実験による破壊形態の比較

橋梁耐震実験で作製した実大橋脚試験体C1-6は、(独)防災科学技術研究所・兵庫耐震工学研究センターのE-ディフェンス施設の震動台に設置された。JR鷹取駅で記録された観測波を震動台に作用させ、実大橋脚試験体C1-6を3回加振した後、耐震性に対する余裕度を検証するため、地震動強度を1.25倍に増加させて、さらに3回加振された。普通コンクリートを使用した場合と、ユニバーサルクリートを使用した場合とで、橋脚基部の震動後の破壊形態が比較された。

5. 実験結果および考察

5.1 ユニバーサルクリートのフレッシュ性状

(1) スランプフロー品質管理試験結果 スランプ



Photo 7 脚柱部の状況 (E-Defense)
Column Mass Section

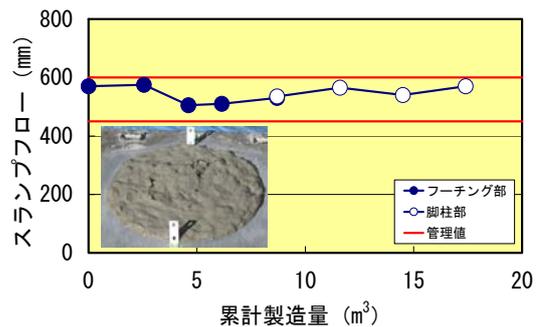


Fig. 5 スランプフロー試験結果
Measurement of Slump Flow

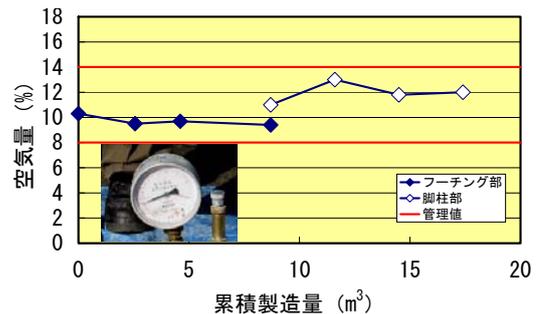


Fig. 6 空気量試験結果
Measurement of Air Content

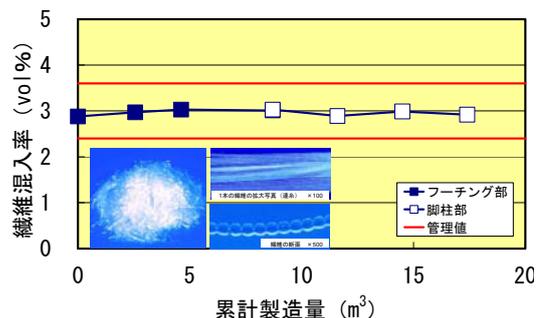


Fig. 7 繊維混入率試験結果
Measurement of Fiber Content

フローの試験結果をFig. 5に示す。管理値は450mmから600mmの範囲であり、すべての試験において、管理値を満足する結果となり、変動係数も4.9%と安定した流動性を確保した。また、フーチング部と脚柱部の打設日の違いによる変動もほとんど見られなかった。

(2) 空気量品質管理試験結果 空気量の測定結果

Table 5 ユニバーサルクリートの硬化物性試験結果の一覧
Stiffening Characteristic of Universal-Crete

部位	材齢 (日)	圧縮 強度 (N/mm ²)	圧縮じん 性係数 (N/mm ²)	静弾性 係数 (kN/mm ²)	割裂引張 強度 (N/mm ²)	一軸 引張降伏 強度 (N/mm ²)	一軸 引張 強度 (N/mm ²)	一軸 引張終局 ひずみ (%)
①フーチング部	28	38.4	22.2	15.5	5.64	2.00	4.02	2.52
	91	49.2	---	17.8	---	---	---	---
②脚柱部	28	36.1	21.6	14.9	5.24	1.99	3.68	3.54
	91	45.9	---	16.6	---	---	---	---

圧縮強度試験(JIS A 1108), 圧縮じん性試験(JSCE-G551), 静弾性係数試験(JIS A 1149),
割裂引張試験(JIS A 1113), 一軸引張試験(JSCE-HPFRCC指針), 各試験結果は3本の平均値

をFig. 6に示す。すべての試験結果は管理値8%から14%の範囲にあり、満足する結果であった。しかし、変動係数が12%と若干大きい結果となった。変動の原因として、練り上がり温度が挙げられる。フーチング部と脚柱部の空気量の平均値は、9.8%および12.0%であり、その時の練り上がり温度の平均値が24.5℃および20.8℃であった。この練り上がり温度差3.7℃が、空気量に影響した一因と考える。

(3) 繊維混入率品質管理試験結果 繊維混入率試験結果をFig. 7に示す。すべての試験で、管理値2.4%から3.6%の範囲にあり、満足する結果であった。混入率の平均値は3.0%で、設計値通りに混入されており、変動係数も2.1%であった。これらの結果より、モルタル中のPP短繊維は十分に均一分散していることが確認できた。

5.2 ユニバーサルクリートの硬化物性

ユニバーサルクリートの硬化物性試験結果の一覧をTable 5に示す。

(1) 圧縮強度試験結果 材齢28日の圧縮強度試験結果をFig. 8に示す。すべての試験結果は管理値30N/mm²以上を満足した。しかし、フーチング部と脚柱部の圧縮強度の平均は、それぞれ、38.0N/mm²および32.6N/mm²と差異が生じた。原因として、5.1(2)で示したように、空気量の違いが影響していると考えられる。フーチング部と脚柱部の空気量は、それぞれ、9.8%および12.0%であり、2.2%の差が生じたため、圧縮強度に差異が生じる結果になったと思われる。

(2) 静弾性係数, 圧縮じん性試験結果 静弾性係数は普通コンクリートの1/2の15 kN/mm²程度であり、圧縮じん性は、Fig. 9に示すように、圧縮ひずみが1mmで0.5%(5,000 μ)程度となっても応力を担保しており、その後、緩やかに応力低下することが確認できた。

(3) 一軸直接引張試験結果 材齢28日における、一軸直接引張試験結果をFig. 10に示す。一軸引張強度は、脚柱部において3.7 N/mm²で、引張ひずみは2.5%(25,000 μ)程度変形しても引張応力を担保しており、高いじん性・変形性能が確認できた。

5.3 実大橋脚試験体の破壊形態の比較

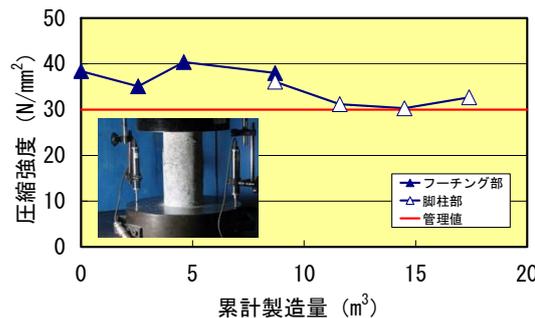


Fig. 8 圧縮強度試験結果(材齢28日)
Measurement of Compressive Strength

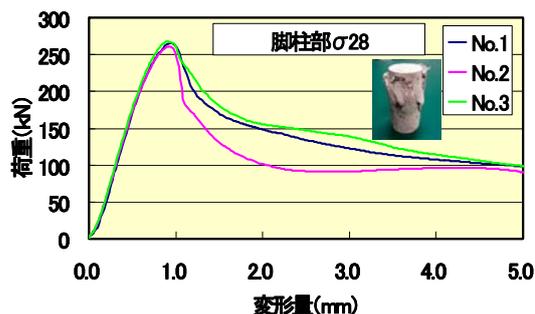


Fig. 9 圧縮じん性試験結果(φ100×200mm)
Measurement of Compressive Toughness

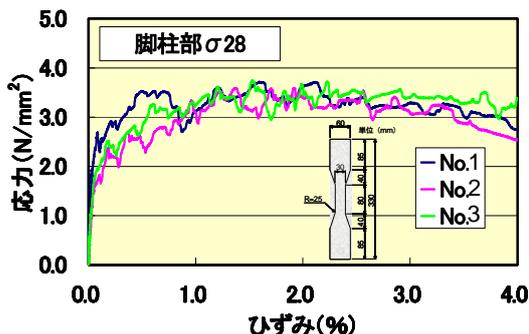


Fig. 10 一軸引張試験結果(JSCE-HPFRCC指針)
Measurement of Uni-axial Tensile Strength

脚柱部の耐震実験が行われた後の破壊形態をPhoto 8に示す。橋脚基部では、普通コンクリートに比べ、兵庫県南部地震の1.25倍の2回の揺れに対しても、ひび割れが生じるものの、躯体内部のモルタル塊の飛び出しや、かぶり部分のはく落がないことが確認された。また、ユニバーサルクリートを用いた実大橋脚試験体に兵庫県南部



左:普通コンクリート 右:ユニバーサルクリート

Photo 8 実大橋脚試験体の破壊形態の比較⁵⁾

Comparison of Fracture Morphologies

地震の揺れを1回作用させたところ、幅0.05mm程度のひび割れに止まっていることが報告⁷⁾されている。

JR鷹取駅で記録された観測波を震動台に作用させ、実大橋脚試験体C1-6を3回加振した後、耐震性に対する余裕度を検証するため1.25倍のゆれの大きさとして、さらに3回加振した後の状況をPhoto 9に示す。加振中に、幅が20mm程度のひび割れがNE隅角に生じた。そこで、NE隅角部のコアコンクリートのひび割れの状況、および破壊状況を確認するため、コンクリートカッターを用いて鉄筋背面まで切り出したところ、Photo 10に示すように、ひび割れ深さはかぶり部分に留まっており、主筋内部にはひび割れが進展していないことが確認されている⁷⁾。また、ユニバーサルクリートは、密な配筋部分の周囲にもよく充填されていた。これは、PP短繊維が鉄筋にからむことで、曲げやせん断力の影響により表面部にはひび割れが生じても、主筋内部はしっかり拘束され、ひび割れが内部に進展しないことが実証され、評価された。

6. まとめ

JR鷹取駅で記録された地震動を作用させた実大橋脚試験体に、ユニバーサルクリートが採用された実験で得られた知見を示す。

- 1) ポンプ圧送は、水平距離15m、垂直距離15mを含む30mの圧送が可能であるとともに、密な配筋部への充填性も良好であることが確認できた。
- 2) スランプフローは管理目標を満足し、安定した流動性を確保したが、空気量は管理目標内にあるものの、打設日の違いにより変動が生じた。
- 3) 繊維混入率は設計値を確保し、モルタル中のPP短繊維の分散性や均一性は良好であることが確認できた。
- 4) 圧縮強度は規格値を満足する結果となったが、空気量の影響により、若干の変動が発生した。
- 5) ユニバーサルクリートを橋脚に用いることで、巨大地震を想定した震動に対してもはく離やはく落が発生せず、橋脚基部の破壊形態を改善できることが確認できた。



Photo 9 NE隅角部
Damage at the NE corner

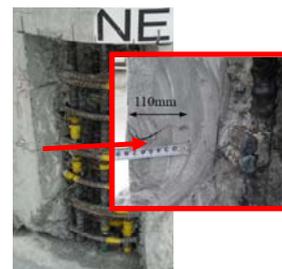


Photo 10 NE隅角部の内部状況⁷⁾
Inside at the NE corner

謝辞

本実験への参加に際してご指導いただきました東京工業大学大学院 川島一彦教授、(独)防災科学技術研究所 中山学主幹研究員に、また材料製造にご協力を頂きました太平洋マテリアル(株)、萩原工業(株)の各位に深く感謝いたします。

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、No.127、2007.3
- 2) Li,V.C. et al.: Micromechanics-based Durability Study of Polyvinyl Alcohol-Engineered Centitious Composite(PVA-ECC),ACI,Materials,J.,Vol.101, No.3,pp.242-248, 2004
- 3) 川西貴士、平田隆祥、大島章弘、森宗義和：ポリプロピレン短繊維を使用した高じん性セメント系複合材料の基本特性、土木学会第63回年次学術講演会、pp.685-686、2008.9
- 4) 平田隆祥、川西貴士、岡野素之、渡辺 哲：ポリプロピレン繊維を用いた高じん性セメント複合材料の基礎的検討、大林組技術研究所報、No.72(2008)
- 5) 中山学：橋梁耐震実験研究;特集 E-ディフェンスによる地震防災への挑戦、防災科研ニュース”冬”、No.170、2010
- 6) 川島 一彦、佐々木 智大、右近 大道、梶原 浩一、運上 茂樹、堺 淳一、幸左 賢二、高橋 良和、矢部 正明、松崎 裕：現在の技術基準で設計したRC橋脚の耐震性に関する実大震動台実験及びその解析、土木学会論文集A、(66)、[1]、324-343,2010
- 7) Kazuhiko Kawashima, Richelle Zafra, Tomohiro Sasaki, Hiroshi Matsuzaki, Koichi Kajiwara and Manabu Nakayama : Seismic Performance of Polypropylene Fiber Reinforced Cement Composite Bridge Column Based on E-Defense Shake Table Excitations, 第13回日本地震工学シンポジウム(2010)