

超音波による UHPFRC のひび割れ深さ測定に関する基礎的実験

鹿島建設(株) 正会員 ○渡邊有寿 高木智子 荒川 遥 柳井修司 一宮利通

1. はじめに

近年、超高性能繊維補強セメント系複合材料（以下、UHPFRC）に関する研究開発が進んでいる¹⁾。UHPFRC は、水結合材比が 15%程度とマトリクスが緻密で、一般的な繊維補強コンクリートよりも繊維を多量に混入している。そのため、引張強度を構造設計に考慮でき、さらに、ひび割れの分散および深さの低減が期待されている。ここで、UHPFRC に生じたひび割れを非破壊で調査する場合、繊維がその検知可否に影響する可能性がある。本研究では、鋼繊維を混入した UHPFRC を対象に、超音波法を用いたひび割れ深さ測定に関する基礎的実験を行った。

2. 実験概要

(1) 調査手法

弾性波を利用したコンクリートの非破壊試験には、超音波法、衝撃弾性波法、打音法および AE 法の 4 つがある²⁾。本研究では、このうち、ひび割れ深さの推定方法として最も一般的な超音波法を選定した。実験に用いた超音波試験機は A、B の 2 機種であり、表-1 にその諸元を示す。機種 A の直角回折法は、コンクリートのポアソン効果により、超音波の進行方向に対して直角方向に進む直角回折波を測定するものである。機種 B の修正 BS 法は、端子の設置位置を 2 段階とし、それぞれの伝搬速度からひび割れ深さを検出するものである。

(2) ひび割れ供試体の作製

調査対象の UHPFRC の配合を表-2 に示す。水結合材比が 15.2%のモルタルマトリクスに、鋼繊維を 3.0vol.%混入しており¹⁾、圧縮強度 150N/mm²、曲げ強度 40N/mm²、静弾性係数 45kN/mm²となっている。ひび割れ深さを測定する供試体には、100×100×400mm の角柱供試体を用いた。

実験ケースを表-3 に示す。対象とするひび割れ幅は、① 0.1mm 未満、②0.1 以上 0.2mm 未満、③0.2 以上 0.3mm 未満および④0.3mm 以上の 4 水準とした。ひび割れの導入は、3 等分点曲げ載荷とし、除荷後に所定のひび割れ幅が残留するように、クラックスケールにてひび割れ幅を測定しつつ載荷した。

(3) ひび割れ調査・検証手順

ひび割れ調査および検証手順を図-1 に示す。超音波法による測定後（機種による推定値）、ひび割れ深さを実測するため、浸透性に優れるエポキシ樹脂³⁾に蛍光塗料を混ぜたものをひび割れに塗布した。ひび割れをエポキシ樹脂で充填させた供試体に対しても超音波法で測定をしたが、ケー

表-1 超音波試験機の諸元

	機種 A	機種 B
測定状況		
推定方法	直角回折波法 $d = a$	修正 BS 法 $d = a \sqrt{\frac{2^2 \times t_1^2 - t_2^2}{t_1^2 - t_2^2}}$
仕様	周波数：28kHz 測定範囲：60mm 以下	周波数帯：20～500kHz 受信ゲイン：1×～10,000× センサ：54kHz 用

表-2 UHPFRC の配合

W/B (%)	モルタルフロー (mm)	単位量 (kg/m ³)				鋼繊維 ^{*3} (kg/m ³)
		水 ^{*1} W	結合材 ^{*2} B	細骨材 S	高性能減水剤	
15.2	230±20	195	1287	905	28.4	235.5 3.0vol.%

*1：高性能減水剤中の水分を含む
*2：エトリンサイト生成系プレミックス結合材
*3：繊維長 15mm、径 0.2mm、引張強度 2,000N/mm² 以上

表-3 実験ケース

ひび割れ幅	① 0.1mm 未満	② 0.1mm 以上 0.2mm 未満	③ 0.2mm 以上 0.3mm 未満	④ 0.3mm 以上
機種 A	○	—	—	○
機種 B	○ ●	○ ●	○ ●	○ ●

○：測定，●：エポキシ樹脂塗布後に測定，—：測定なし

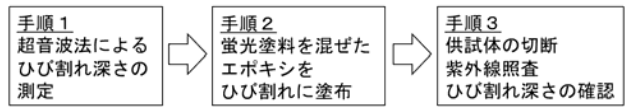


図-1 ひび割れ調査・検証手順

キーワード 超高性能繊維補強セメント系複合材料，UHPFRC，ひび割れ，非破壊検査，超音波法

連絡先 〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1 鹿島建設(株)技術研究所 TEL 042-485-1111

表-4 超音波法によるひび割れ深さの調査結果（推定および実測値） [鋼繊維：3.5vol.%]

(ケース) ひび割れ幅		① 0.1mm 未満	② 0.1 以上 0.2mm 未満	③ 0.2 以上 0.3mm 未満	④ 0.3mm 以上
検査位置 および ひび割れ幅 (引張縁)					
推定 深さ	機種 A	×検出できず	－測定せず	－測定せず	×検出できず
	機種 B	○34mm	○75mm	○55mm	○40mm
切断面 および 実測深さ (蛍光塗料に ブラックライト を照射)					
		17mm	67mm	42mm	25mm
機種 B との差異 (実測－推定)		-17mm	-8mm	-13mm	-15mm

ス③には端子間にひび割れが 2 本あったため、調査対象の 1 本だけにエポキシ樹脂を塗布した。ひび割れ深さは、切断後の角柱供試体の断面にブラックライトを照射して実測した。

3. 実験結果

(1) ひび割れ深さの検知可否

超音波法による測定結果（推定値）と、エポキシ塗布後の切断面における実測結果を表-4 に示す。まず、機種 A はひび割れ幅の大小によらず深さを検出することができなかった。繊維種類の影響を検証するために、非鉄繊維（ポリプロピレン）を 2.5vol.%混入した UHPFRC においても測定してみたが、同様に検出できなかった。直接回折法による機種 A では、超音波の伝搬経路にマトリクス中の繊維が影響を及ぼしたと推察される。

一方、修正 BS 法による機種 B では、鋼繊維を混入した UHPFRC において全てのケースでひび割れを検出・測定が可能であった。ひび割れ深さの実測値に対する誤差は 8～17mm 程度であり、いずれも推定値の方が実測値よりも大きい値となった。ひび割れ幅と深さの大小に比例関係が見られなかった点については、UHPFRC に混入されている繊維のひび割れ架橋効果および分散のばらつきが影響したと考えられた。

(2) エポキシの影響

機種 B を用いて、エポキシ樹脂でひび割れを充填させた前後で測定しても値に変化が見られなかった。また、端子間にひび割れが 2 本あったケース③では、ひび割れが充填された深さの大きい方を検知していた。つまり、UHPFRC に生じたひび割れをエポキシ樹脂で充填しても、機種 B はその部位をひび割れと認識していることが分かった。これは、エポキシ樹脂の弾性係数が UHPFRC よりも 1 オーダー以上小さく、超音波の回折経路が変わらなかったことによるものと推察された。

4. まとめ

繊維が多量に混入された UHPFRC を対象に、超音波法にてひび割れ深さを測定した結果、「直角回折波法」を採用している機種では繊維の種類によらずひび割れ深さを検出できなかったが、「修正 BS 法」を採用している機種では 15mm 程度の誤差はあるものの、深さを検知できることが確認された。一方、樹脂系の補修材の充填確認としての使用や、端子間に複数のひび割れがある場合の測定には課題があることが明らかとなった。

参考文献

1) 渡邊有寿ら：UHPFRC による道路床版打替え・補強工法に向けた実大施工実験，プレストレストコンクリート工学会 第 28 回シンポジウム論文集，pp.619-622，2019

2) 土木学会：弾性波法によるコンクリートの非破壊検査に関する委員会報告書およびシンポジウム論文集，コンクリート技術シリーズ 61，2004

3) 齋藤佑太ら：UFC 床版における補修材料の有効性に関する検討，令和 3 年度土木学会 第 76 回年次学術講演会，VI-221，2021