

論文 柱状サンプル採取法によるRC床版の内部診断における接着剤の効果

高野真希子*1・阿部 忠*2・大窪克己*3・木内彬喬*4

要旨：RC 床版の内部損傷診断法として柱状サンプル採取法を提案した。本研究では、柱状サンプル採取に要する時間の短縮および内部ひび割れに浸透させる接着剤の性能を評価した。接着剤の性能試験では硬化時間が早いのはアクリル系接着剤であり、それぞれ 30 分、90 分、エポキシ系接着剤は 210 分である。浸透状況においてはエポキシ系接着剤の浸透性が良好である結果となった。また、実橋 RC 床版の診断には 3 種類の接着剤を用いて床版下面から柱状サンプルを採取した。その結果、本手法による内部ひび割れ診断は、接着剤がひび割れに浸透し、床版内部の状況を保持した柱状サンプルが採取でき、これにより損傷状況の診断が可能となった。

キーワード：コンクリート部材, 柱状サンプル, 接着剤, 劣化診断

1. はじめに

道路橋 RC 床版は、車両の繰り返し走行により水平ひび割れの発生が顕在化している。また、劣化した RC 床版上面に SFRC 上面増厚補強した床版においては補強界面ではなく離などの補強後の再劣化による損傷が発生している。RC 床版も含めたコンクリート部材内部に発生したひび割れ等の診断においては、電磁波レーダーなどを用いた非破壊検査が行われている。電磁波レーダーは、RC 床版やコンクリート部材の比較的表面近傍の損傷状況の診断には適しているが、RC 床版内部のひび割れの検知は困難となっている。また、SFRC 上面増厚した RC 床版では増厚コンクリートに鋼繊維が配合されていることから適切な診断が出来ないのが現状である。一方、RC 床版下面からの診断には衝撃弾性波を用いた検査も行われているがコンクリート内部のひび割れ診断には精度が低い結果が得られている。このようなことから、筆者らは「コンクリート構造部材の柱状サンプル採取方法」¹⁾によるコンクリート内部の損傷状況の調査法および診断法を提案している。本手法は、先行して削孔した孔に接着剤を注入し、内部ひび割れに浸透させた接着剤が硬化した後、その外周をコア切削して柱状サンプルを採取する微破壊調査法である。本手法を用いて、SFRC 上面増厚した RC 床版供試体に発生した水平ひび割れを適切に診断できる結果を得ている²⁾。

そこで本研究では、コンクリート内部に発生したひび割れに浸透させる接着剤において、微細なひび割れへの浸透状況、硬化時間との関係を検証するために 4 タイプの接着剤を用いた性能試験を行った。性能試験では、RC 床版の上面からの浸透試験を実施し、接着剤の浸透

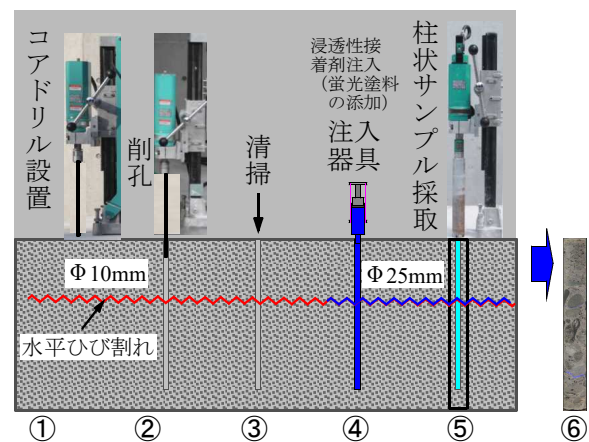


図-1 柱状サンプル採取法

状況を検証した。さらに、凍結防止剤散布による塩害を受けた実橋 RC 床版の下面から「柱状サンプル採取法」によるコア採取を行い、床版コンクリート内部損傷状況を診断した。

2. 柱状サンプルによる内部ひび割れ診断方法

劣化した RC 床版およびコンクリート部材から直接コアを採取すると、コアが分断され、コア採取時による分断か、水平ひび割れによる分断かが不明である。そこで、1 本化したコアが適切に採取され、水平ひび割れ等の内部診断を可能にした診断法が「柱状サンプル採取法」である。柱状サンプル採取法の手順は図-1に示すように RC 床版上面にコアドリル装置を設置し(図-1①)、φ 10mm 程度の接着剤注入用の孔を削孔する(図-1②)。通常のドリルを用いても可能である。削孔内部のコンクリートの粉体等を完全に除去し(図-1③)、

*1 中日本ハイウェイ・エンジニアリング東京(株) (正会員)
 *2 日本大学名誉教授 (正会員)
 *3 中日本ハイウェイ・エンジニアリング東京(株)
 *4 日本大学大学院生産工学研究科博士後期課程 (学生会員)

低粘度の接着剤に蛍光塗料を混入し、注入器具を用いて接着剤を圧入する（図-1④）。接着剤の強度が発現した後に同位置でφ 25mm のドリルビットを用いて柱状サンプルを採取する（図-1⑤）。柱状サンプルは、水平ひび割れ発生箇所へ接着剤が浸透し、一本化したコアの採取が可能となり、詳細診断が可能となる。（図-1⑥）。交通規制により上面からのコア採取が困難な場合は、床版下面からの診断も可能である。

3. 柱状サンプル採取法に用いる接着剤の選定

3.1 接着剤の選定

RC 床版の内部損傷診断法である柱状サンプル採取法は、φ 10mm 程度の孔に接着剤を注入し、短時間で硬化し、0.05mm 程度以上のひび割れに浸透する接着剤が要求されている。そこで、現在市販されているエポキシ系の夏および冬用の接着剤を用い、それぞれを接着剤 K-S、K-W とする。また、アクリル系の変性アクリル接着剤、メタクリル接着剤を用い、それぞれ接着剤 D、N とし、4 種類についての硬化時間および浸透性を検証する。なお、本実験では柱状サンプル採取に用いるために選定した接着剤である。補修用として用いた場合のエポキシ系の接着剤 K-S および K-W の硬化時間は表-1 に示すように、それぞれ 7 時間、4 時間であり、冬用の硬化時間が早い。また、粘度については接着剤 K-S および K-W は 150mPa・s である。次に、補修用として用いた場合の変性アクリル接着剤 D は、硬化時間が 40 分と最も早い。粘度は 300mPa・s 以下である。また、接着剤 N は 3 時間以内であり、粘度は 100mPa・s 以下である。いずれも、硬化時間および粘度ともに柱状サンプル採取法に用いる接着剤として適した材料である。

3.2 圧縮強度と材齢の関係

(1) 試験体の製作

接着剤の圧縮試験に用いる供試体は、内径φ 12.5mm、長さ 150mm の試験管を用いた。圧縮試験に用いる供試体はφ 12.5mm×25mm に切断し、1 本の試験管から 3 体の試験体を製作し、圧縮試験を行った。なお、試験体作成時および養生の温度は 20℃ に設定した。

(2) 圧縮強度と材齢の関係

エポキシ系接着剤 K-S の圧縮強度と材齢の関係は図-2 に示すように、硬化開始時間は材齢 4 時間後からであり、7 時間後の圧縮強度平均は 51.9N/mm² である。また、冬用の接着剤 K-W の硬化開始は材齢 2 時間後からであり、材齢 4 時間後の圧縮強度の平均は 42.7N/mm² である。

次に、変性アクリル接着剤 D の硬化開始は材齢 30 分後からであり、材齢 40 分後の圧縮強度の平均は 34.6N/mm² であり、この付近から固体化している。60 分

表-1 接着剤の材料特性値

項目	接着剤K-S 接着剤K-W	接着剤D	接着剤N
主成分	エポキシ樹脂	変性アクリル樹脂	メタクリル樹脂
混合比（主剤：硬化剤）	10：3	1：1	100：1～8
硬化物比重	1.2	1.02	1.03±0.10
粘度	150mPa・s	300mPa・s	100mPa・s以下
可使時間	119分/23℃※1)	20分/20℃※2)	30分以上/20℃※2)
硬化時間	K-S：7時間以上 K-W：4時間以上	40分	3時間以内
コンクリートとの接着強度	4.5N/mm ² 以上	1.9N/mm ² 以上	2.5N/mm ²
圧縮強度	50N/mm ² 以上	60N/mm ²	79N/mm ²

※1)温度上昇法、※2)ゲルタイム法

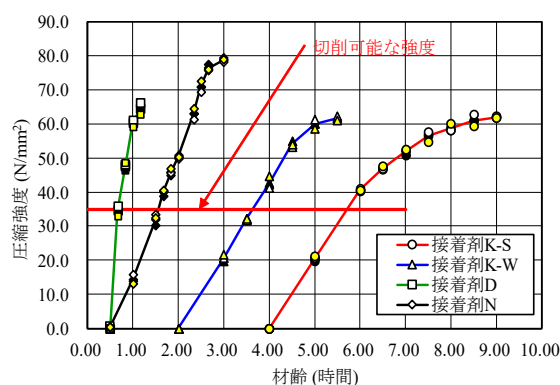


図-2 圧縮強度と材齢の関係

後の圧縮強度の平均は 60.3N/mm² である。また、メタクリル接着剤 N の硬化開始時間は 30 分後からであり、1 時間では 15.9N/mm² であり、1 時間 30 分では 32.4N/mm² であり、固体化している。3 時間後では 78.8N/mm² である。

よって、φ 12mm の孔に接着剤を充填した場合、各接着剤ともに圧縮強度が低い状態では接着剤は粘性状態であり、柱状サンプル採取においてはドリルの回転力に抵抗できる強度が必要である。本実験では、接着剤の圧縮強度が 35.0N/mm² 以上で固体化することから、この強度に達した時間をコア採取する時間の目安とする。よって、接着剤の圧縮強度 35.0N/mm² に達する時間は、接着剤 K-S、K-W はそれぞれ 5 時間 30 分、3 時間 30 分以上を要する。また、接着剤 D、N はそれぞれ 30 分、1 時間 30 分以上を要する。

以上より、本実験では内径φ 12.5mm の試験管を用いた試験結果であり、柱状サンプル採取においては接着剤の圧縮強度が 35.0N/mm² 以上の強度が発現できる時間でコア採取する必要がある。

4. 接着剤注入器具の取り付け方法および浸透状況

4.1 接着剤注入器具の取り付け方法

(1) 上面からの注入方法

RC 床版上面からコア採取する場合の接着剤の注入方

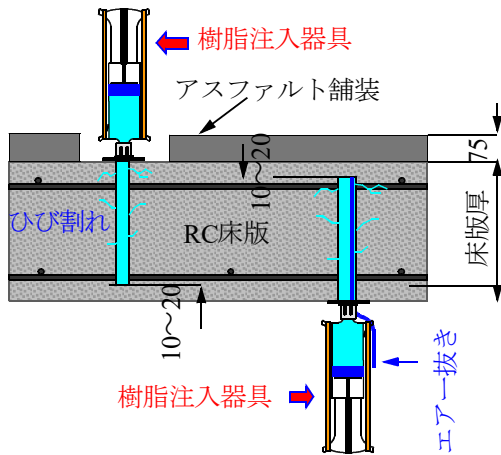


図-3 ドリルの設置と接着剤の注入状況

法(図-1④)は、図-3に示すように、アスファルト舗装を部分的に撤去する。コンクリート表面にドリルを設置し、RC床版底面から10mm～20mm内側まで削孔する。これは、接着剤が底面より漏洩しない程度とする。清掃した後、注入器具を設置する周辺にひび割れが見られる時は接着剤の漏洩を防止するためにひび割れをシール材で完全に覆う必要がある。その後、孔内を清掃し、樹脂注入器具等を取り付けて加圧ゴムの圧力(0.3MPa)で注入し、ひび割れや微細なひび割れに浸透させる。図-2に示す圧縮強度と材齢の関係に基づいて、圧縮強度が35N/mm²以上発現する時間まで養生する。その後、柱状サンプルを採取する。

(2) 下面からの切削方法

実橋での柱状サンプル採取法は、交通規制を伴わない床版下面からの採取が検討される(図-3)。削孔は床版上面から10mm～20mm程度内側までとする。ここで、φ10mm程度の孔内は接着剤注入と同時にエア抜き用の管を削孔深さまで挿入する。その後、下面のひび割れから接着剤が漏洩しないようにシール材で覆う。樹脂注入器具を取り付け、ゴムで加圧して注入する。接着剤が上縁に達した後は、エア排出管から接着剤が流出したことを確認し、流入を完了する。劣化状態によっても異なるが、接着剤の注入は50CC/1本であるので、注入が終了するまで、繰り返し行う。この注入はひび割れ補修も兼ねることができる。

4.2 各種接着剤の浸透状況

SFRC 上面増厚補強した実橋 RC 床版を用いて、柱状サンプル採取し、浸透状況を確認した。寸法は写真-1に示すように増厚層50mm、RC床版厚180mmである。

(1) エポキシ系接着剤K-SおよびK-W

夏用の接着剤 K-S を注入した供試体 K-S の浸透状況は、写真-1(1)に示すようにひび割れ発生位置に浸透し、1本化した柱状サンプルが採取された。ひび割れ箇所

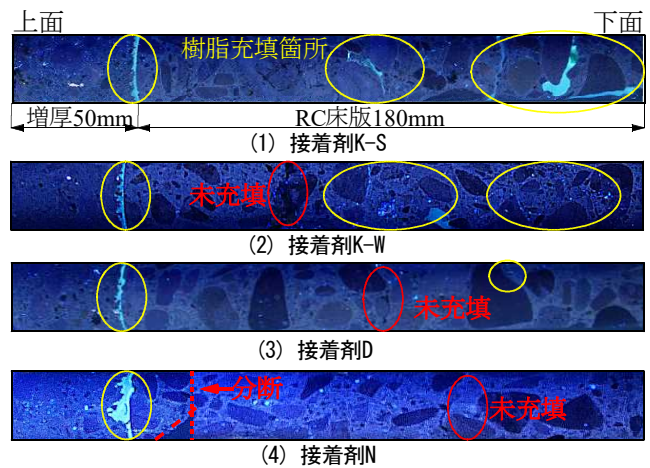


写真-1 接着剤の浸透状況

接着剤浸透状況は、下面から50mm付近に最大1mmのひび割れが発生している。次に、冬用の接着剤 K-W を注入した供試体(写真-1(2))においても一部の表面には樹脂の浸透が見られないものの1本化した柱状サンプルが採取された。ひび割れは下面から90mm付近に発生し、60mm付近には空隙箇所へ接着剤が浸透している。

以上より、本実験の範囲内では、エポキシ系接着剤は微細なひび割れに浸透し、ひび割れ診断が可能となると同時に1本化した柱状サンプル採取が可能となった。

(2) 変性アクリル接着剤Dおよびメタクリル接着剤N

接着剤 D を用いた供試体(写真-1(3))は、下面から40mm付近に最大0.5mm程度のひび割れが見られる。下面から80mm付近では未充填のひび割れ箇所が見られるものの1本化した柱状サンプルが採取された。

次に、メタクリル接着剤 N を用いた供試体(写真-1(4))のひび割れ状況は下面から50mm付近に最大1mmのひび割れが発生しているが、接着剤は浸透されていない。上面から60mm付近では、ひび割れへの接着剤の浸透は認められず、ひび割れ箇所での分断している。

以上より、本実験の範囲内では接着剤 D および N は硬化開始時間が早く、孔内表面には接着するものの、微細なひび割れへの浸透性が低く、ひび割れ箇所でのコアの分断により詳細な診断は困難となる結果となった。

5. 実橋での「柱状サンプル採取法」による劣化診断

5.1 実橋床版の損傷状況および診断位置

本調査法の検証対象は、積雪寒冷地域に建設された高速道路の PC 橋 RC 床版であり供用後 38 年が経過している。ここで、幅員構成および主桁配置、柱状サンプル採取位置を図-4に示す。パネル 1 の近接目視による点検では図-4(3)、2)に示すようにひび割れが発生し、漏水・遊離石灰の発生が見られる。なお、パネル 2 は(図-4(3)、1))、漏水の跡がみられ、補修済みである。

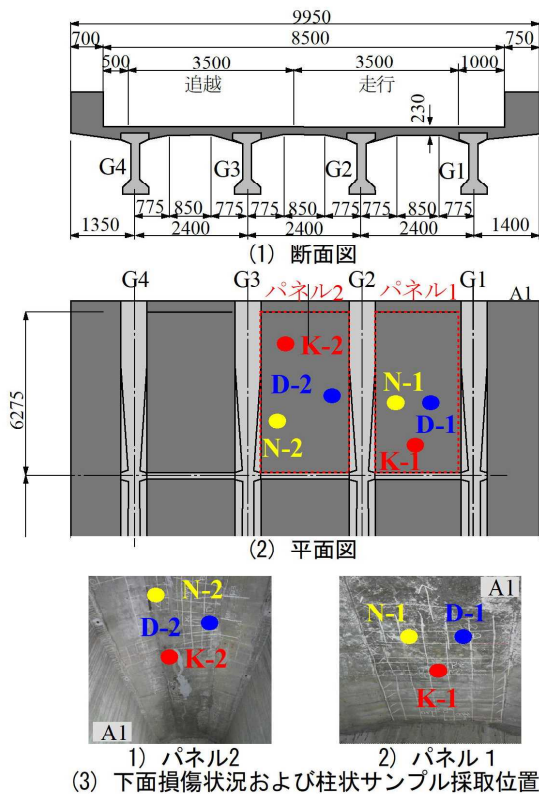


図-4 PC橋の寸法および柱状サンプル採取位置



写真-2 下面からの柱状サンプル採取状況

柱状サンプル採取による内部損傷の調査箇所を図-4(2)に示す。パネル1、パネル2ともに、エポキシ系接着剤 K-W (図中記号 K-1, K-2), 変性アクリル接着剤 D (図中記号 D-1, D-2), メタクリル接着剤 N (図中記号 N-1, N-2) の3種類の接着剤を用いた。パネル1での調査箇所は、それぞれ図-4(2)、図-4(3)、2)に示す3点とする。また、パネル2は、図-4(2)、図-4(3)、1)に示す。記号はそれぞれ K-2, D-2 および N-2 とする。

5.2 柱状サンプル採取方法

高速道路のPC橋での柱状サンプル採取は、交通規制を伴わない床版下面から実施した。下面からの柱状サンプル採取法の手順は図-1に示す手順で行う。実橋における下面からの柱状サンプル採取状況を写真-2に示す。RC床版下面からひび割れ状況を確認するとともに、電

表-2 接着剤の注入量と硬化時間

接着剤の種類	パネル1 (G1-G2間)				パネル2 (G2-G3間)			
	記号	注入本数	注入量	養生時間	記号	注入本数	注入量	養生時間
接着剤 K	K-1	1本	50g	4時間	K-2	21本	1,050g	4時間
接着剤 D	D-1	1本	50g	30分	D-2	2本	100g	30分
接着剤 N	N-1	6本	300g	3時間	N-2	8本	400g	3時間

磁波レーダーによる鉄筋探査を行い、鉄筋位置を確認する(写真-2(1))。次に、RC床版下面にドリルを設置し、φ10mmの孔を深さ190mm削孔する(写真-2(2))。削孔した孔内をエアー等で粉体を除去する(写真-2(3))。同時に周辺のひび割れから接着剤が漏洩しないようにパテ剤で覆う(写真-2(4))。接着剤注入器具を取り付けし、接着剤を注入する(写真-2(5))。それぞれの接着剤を注入した後、図-2に示す圧縮強度と材齢の関係を基に硬化時間を確認し、養生後に柱状サンプルを採取する。本調査での柱状サンプルの採取は、当日および翌日にかけて行った。(写真-2(6))。

6. 実橋RC床版の柱状サンプル採取による診断結果

6.1 接着剤の注入量と硬化時間

接着剤の硬化時間は、概ね表-1の接着剤の材料特性に示す硬化時間での硬化が確認された。なお、調査時の平均気温は25℃であった。ここで、接着剤の注入量と硬化時間を表-2に示す。

パネル1でのエポキシ系接着剤を用いた記号 K-1 の注入量は50gであり、ひび割れが軽微であることが予測できる。アクリル系接着剤を用いた記号 D-1 および N-1 の注入量は、それぞれ50g、300gであり、接着剤の注入量がパネル2と比較して少ないことから、内部のひび割れは軽微であることが予測できる。一方、パネル2は、エポキシ系接着剤を用いた記号 K-2 の注入量は1,050gであり、内部ひび割れの発生状況が著しいことが予測できる。この注入時間に多くの時間を要したことから、翌日に柱状サンプルを採取した。次に、アクリル系接着剤を用いた記号 D-2 では100g、記号 N-2 においては400gが注入された。パネル1に比べて接着剤注入量が多いことから、水平ひび割れが広範囲に渡っていることが予想される。柱状サンプルの採取は、作業時間の関係上、記号 D-1 および D-2 は当日、記号 N-1, N-2 および記号 K-1, K-2 は、翌日に柱状サンプルを採取した。

6.2 柱状サンプルによるひび割れ診断

柱状サンプルによる内部損傷状況についてパネル1を図-5、パネル2を図-6に示す。柱状サンプルによるひび割れ発生状況の診断は、自然光および紫外線による撮影を行った。また、柱状サンプル円周を4分割して撮影し、平面図で示す。なお、ひび割れに接着剤が充填されている箇所は黄枠、接着剤が未充填により分断された箇

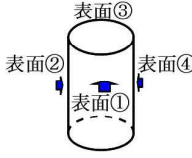
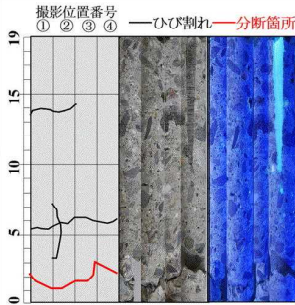
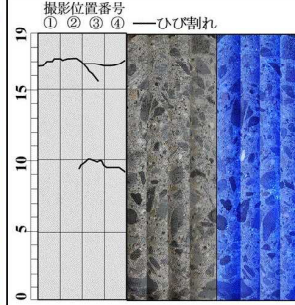
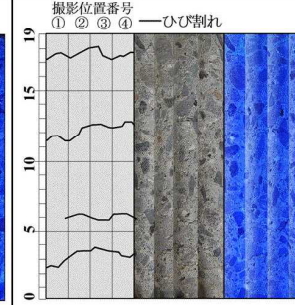

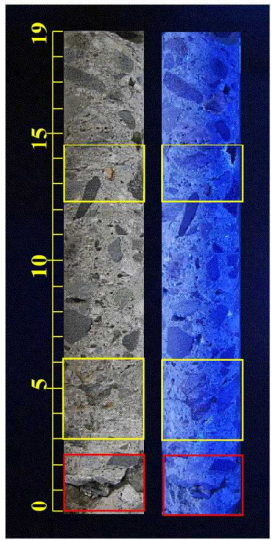
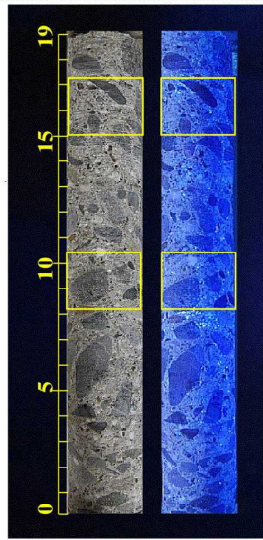
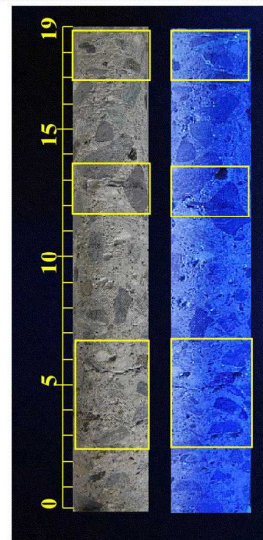
柱状サンプル記号	記号K-1	記号D-1	記号N-1
ひび割れ図 撮影条件	ひび割れ 自然光 紫外線	ひび割れ 自然光 紫外線	ひび割れ 自然光 紫外線
柱状サンプル表面のひび割れ状況 			
撮影条件	自然光 紫外線	自然光 紫外線	自然光 紫外線
柱状サンプル表面一部のひび割れ状況 			

図-5 柱状サンプル採取によるパネル1の損傷状況

所を赤枠で示した。

(1) パネル1

パネル1から採取した柱状サンプルは、いずれもひび割れに接着剤が浸透し、ひび割れ箇所では分断されずに柱状サンプルの採取が可能であった。接着剤 K-W を注入した記号 K-1 の柱状サンプルには、下面から 50mm、130mm 付近に最大ひび割れ幅 0.5mm のひび割れが確認された。なお、下縁から 15mm の位置は、切削時に鉄筋位置が確認され、5mm 程位置変更したことによる分断であるが孔内の接着剤により、部分的に一本化している。また、接着剤 D を注入した記号 D-1 の柱状サンプルでは、下面から 180mm 位置に最大ひび割れ幅 0.2mm のひび割れが確認された。接着剤 N を注入した記号 N-1 の柱状サンプルでは、下面から 30mm、60mm、130mm、180mm 位置に幅 0.5～1.8mm のひび割れが確認された。よって、全供試体ともに1本化した柱状サンプルの採取が可能となり、ひび割れ位置も確認された。

(2) パネル2

パネル2から採取した柱状サンプルは、接着剤 N-2 を除き接着剤がひび割れに浸透し、一体化した柱状サン

ルの採取が可能となった。接着剤 K を注入した記号 K-2 の柱状サンプルには、下面から 30mm～90mm、170mm～190mm の範囲に水平ひび割れが層状に確認された。接着剤の注入量も 1,050g であり、ひび割れが広範囲に渡っていることが推察できる。また、自然光での撮影結果に対して、紫外線照射での観察結果はひび割れ幅、ひび割れ形状等を明確に確認することができた。一方、接着剤 D を注入した記号 D-2 の柱状サンプルでは、下面から 70mm および 170mm 位置に最大幅 0.5mm のひび割れが確認された。接着剤 N を注入した記号 N-2 の柱状サンプルでは、下面から 70mm までは接着剤が充填されていたが、70～190mm の範囲には、上縁まで接着剤の充填が見られず、ひび割れ箇所では分断された。原因は、接着剤の注入は、図-3に示すように、エア抜き管を上縁まで差し込み、エア抜き管から接着剤が排出されたことを確認しながら注入を行っている。よって、一度、上縁まで注入されたものの、下面から 50mm 付近のひび割れ幅が 2mm 程度であることから、孔内に注入された接着剤が水平ひび割れに浸透し、孔内の接着剤が減少し、コア採取時に分断されたものと考えられる。なお、接

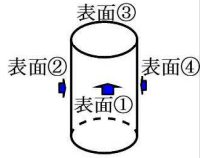
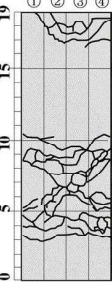
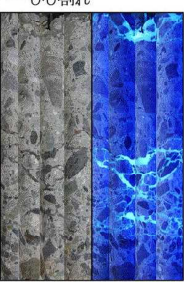
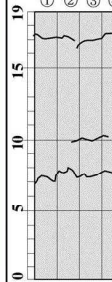
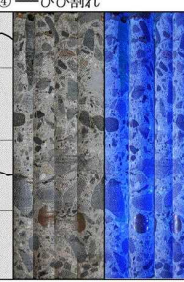
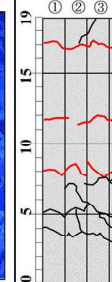
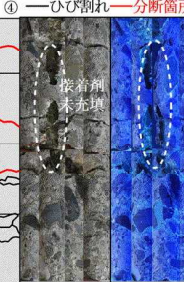

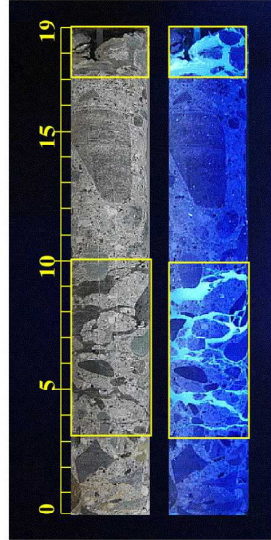
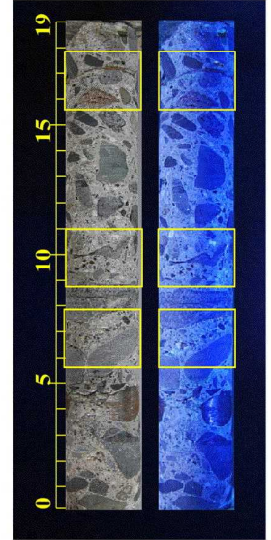
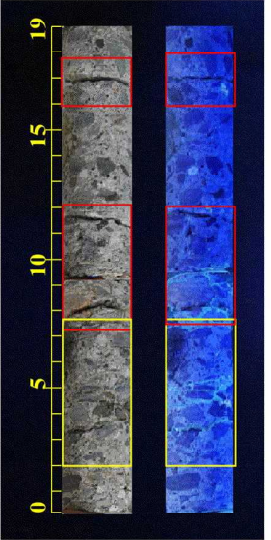
柱状サンプル記号	接着剤K-2	接着剤D-2	接着剤N-2
ひび割れ図 撮影条件	ひび割れ 自然光 紫外線	ひび割れ 自然光 紫外線	ひび割れ 自然光 紫外線
柱状サンプル表面のひび割れ状況 	撮影位置番号 ① ② ③ ④ —ひび割れ  	撮影位置番号 ① ② ③ ④ —ひび割れ  	撮影位置番号 ① ② ③ ④ —ひび割れ—分断箇所  
撮影条件	自然光 紫外線	自然光 紫外線	自然光 紫外線
柱状サンプル表面一部のひび割れ状況 			

図-6 柱状サンプル採取によるパネル2の損傷状況

着剤が充填されている範囲の紫外線照射による観察より、下面から30～50mm範囲にひび割れが層状に発生していることが確認された。

以上より、柱状サンプル採取において3種類の接着剤を用いた結果、損傷が著しい箇所では接着剤の注入力および浸透状況に差異が生じる結果となった。接着剤K-Wは、接着剤DおよびNと比較して可使時間が長いことから注入からコア採取までの時間を要するが、ひび割れへの確実な浸透性および接着性が確認された。

7. まとめ

- (1)本研究では、浸透性および硬化時間に着目した3種類の接着剤について、直径φ12.5mm×24mmの円柱試験管を用いて圧縮試験を行った結果、圧縮強度が35N/mm²にまで発現する時間がエポキシ系接着剤K-S、K-Wではそれぞれ、5時間30分、3時間30分以上となる。また、接着剤D、Nはそれぞれ30分、1時間30分以上であり、アクリル系接着剤D、Nの硬化時間が早い結果が得られた。
- (2)実橋からの切出し床版を用いた接着剤の浸透状況に

おいてはエポキシ系接着剤K-S、K-Wは微細なひび割れに浸透する結果が得られた。

- (3)実橋における下面からの柱状サンプル採取法による内部診断では、従来の非破壊検査では確認することが出来なかった水平ひび割れに接着剤が浸透し、内部の損傷状況の診断が適切に行うことが可能となった。とくに、エポキシ系接着剤は、幅0.05mm以上のひび割れに浸透し、ひび割れ幅、ひび割れ形状などが明確に確認できる結果が得られた。また、浸透状況からひび割れ補強としても効果を発揮するものとする。

参考文献

- 1) 阿部忠, 大窪克己, 高野真希子: コンクリート構造部材の柱状サンプル採取方法, 特許第6308541
- 2) 野口博之, 阿部忠, 木内彬喬: 小口径コア型試験機によるコンクリートの圧縮強度推定法および内部損傷の診断法の提案, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第18巻, pp69-74, 2018.10