

論文

小径コアドリルを用いたRC床版の圧縮強度の推定および
柱状サンプル採取による診断法

野口 博之*, 阿部 忠**, 水口 和彦***, 木内 彬喬****, 李 秦陽****

*日本大学大学院, 生産工学研究科土木工学専攻博士後期課程 (〒 275-8575 千葉県習志野市泉町 1-2-1)

**博(工), 日本大学教授, 生産工学部土木工学科 (〒 275-8575 千葉県習志野市泉町 1-2-1)

***博(工), 日本大学准教授, 生産工学部土木工学科 (〒 275-8575 千葉県習志野市泉町 1-2-1)

****日本大学大学院, 生産工学研究科土木工学専攻博士前期課程 (〒 275-8575 千葉県習志野市泉町 1-2-1)

本研究は, 道路橋 RC 床版やコンクリート橋における内部コンクリートの圧縮強度をコア採取と同時に計測する装置の開発およびコア採取した柱状サンプルから内部ひび割れを診断する手法を提案した. 小径コア型試験装置を用いた圧縮強度の推定は, ドリルで切削する際のエネルギーとコンクリートの圧縮強度の関係から得た本提案する強度推定式に適用することでコンクリートの表面から深さ方向に圧縮強度の推定が可能になった. また, 小径コア型試験装置を用いた床版内部の水平ひび割れの診断については, 樹脂を注入して採取した柱状サンプルより, 水平ひび割れ箇所およびひび割れ幅が適切に診断することが可能となった.

キーワード: 小径コアドリル, コンクリート, 経年劣化, 圧縮強度

1. はじめに

道路橋 RC 床版の損傷事例には, 交通車両の増大により 2 方向ひび割れなど疲労損傷が発生した床版や橋面防水工が施されいない床版においては, 貫通ひび割れに雨水が浸透し, 輪荷重走行による擦り磨きなどによりセメント成分が下面に滲出¹⁾, すなわち走行による疲労損傷と漏水や遊離石灰が発生するなどの複合損傷が生じている²⁾. 一方, 積雪寒冷地域の RC 床版は, 車両走行による疲労損傷に加え, 凍結防止剤の散布による塩害, さらに凍害の影響により床版上面は土砂化するなどの損傷が生じ, 使用後 30 数年で取替床版が施された事例もある³⁾.

これらの劣化した RC 床版, とくに遊離石灰の発生が著しい床版は, 供用当時のコンクリートの圧縮強度が道路橋示方書・同解説⁴⁾ (以下, 道示とする) に規定するコンクリートの設計基準強度 24N/mm^2 を下回る事例も報告されている⁵⁾.

一方, 補修や補強した床版においては補修・補強界面ではなく離れや疲労損傷により内部コンクリートに水平ひび割れが生じている. これらの損傷の検出には非破壊検査による診断が行われているものの, 強度の推定や内部損傷についての診断法は確立されていないのが現状である. これらのことから筆者ら⁶⁾は, コンクリートの圧縮強度をコンクリートの表面から内部方向に測定・診断する小径コア型試験装置を開発した. また, 内部コンクリートの損傷状況については, コアドリル試験機を用いて RC 床版のコンクリート内部を診断する「コンクリート構造部材の柱状サンプル採取方法」⁷⁾を提案している.

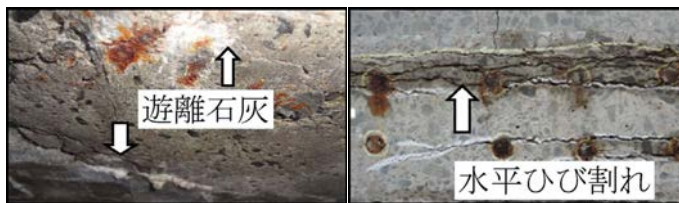
そこで本研究は, 供用開始後 33 年で撤去し, その後

SFRC 上面増厚補強した実橋 RC 床版を用いて, コンクリートの表面から深さ方向のコンクリートの圧縮強度の推定を行う. また, RC 床版の内部コンクリートの損傷状況について「柱状サンプル」採取法によりコンクリート内部のひび割れ損傷について検証し, 劣化したコンクリート部材の強度推定およびコンクリート部材の内部損傷の診断法の一助としたい.

2. RC床版の損傷および圧縮強度と寿命の関係⁵⁾

2.1 38年供用されたRC床版のコンクリート強度

道路橋 RC 床版の損傷事例を図-1 に示す⁵⁾. この橋梁床版は, 疲労損傷と凍結防止剤の散布による塩害, さらに凍害による複合劣化により, 供用開始後 38 年で撤去された. 補修履歴は SFRC 上面増厚補強が 2 回施されている. 図-1(1)は, RC 床版の下面に 2 方向のひび割れと遊離石灰の沈着が著しい. また, 図-1(2)は鉄筋配置位置に水平ひび割れが発生している. さらに, 塩害による鉄筋の発錆が確認される. RC 床版撤去時に 8 箇所からコア採取し, コンクリートの圧縮試験を行い, 圧縮強度および静弾性係数を測定している. その結果, 圧縮強度の最小値は 19.3N/mm^2 , 最大値は 26.9N/mm^2 , 平均圧縮強度は 23N/mm^2 であり, 道路橋示方書・同解説 (以下, 道示) に規定するコンクリートの設計基準強度 24N/mm^2 を下回る結果となっている. また, 静弾性係数も 16.5kN/mm^2 と道示に規定する弾性係数を下回っていた. したがって, 漏水や床版下面に遊離石灰の発生が著しい床版においてコンクリートの圧縮強度の低下が著しいと推察される.



(1) 遊離石灰の発生 (2) 水平ひび割れ

図-1 道路橋 RC 床版の内部損傷の一例

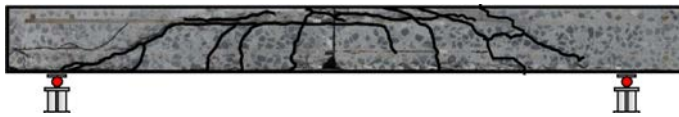


写真-1 輪荷重疲労実験における水平ひび割れ²⁾

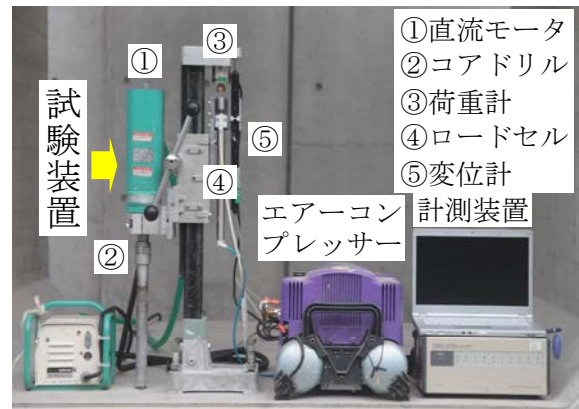


図-2 小口径コア型試験機一式

2.2 疲労実験による床版内部の損傷状況

RC 床版は、輪荷重走行により、床版内部に水平ひび割れも発生している。写真-1 は、阿部らが輪荷重走行疲労実験を行い、軸方向の切断面のひび割れ状況である。これによると、圧縮鉄筋配置付近に水平ひび割れが発生している。水平ひび割れの発生状況についての診断法も確立されていない。

2.3 圧縮強度および水平ひび割れの診断法

実橋におけるコンクリートの圧縮強度試験は、φ100mm のコア採取し、圧縮試験機を用いて圧縮強度試験を行い、コンクリート強度が評価されている。また、シュミットハンマー等を用いての圧縮強度が推定されている^{8), 9)}。しかし、これらの試験法においては、床版コンクリート全体の圧縮強度が推定されるのみで、表面から深さ方向のコンクリート強度の推定は困難である。そこで、筆者らはコンクリートの表面から深さ方向の強度推定を行うために小口径コア型試験機を開発し、コンクリート表面から深さ方向に掘削しながら強度を推定するものである。本実験では、試作機を用いてのコンクリート強度の推定を行うものである。

次に、コンクリート内部損傷の診断法として、打音法や非破壊試験機を用いての診断^{9), 10), 11)}が行われている。打音法においては車両走行の振動、騒音等が影響し、水平ひび割れの診断に至っていないのが現状である。また、微破壊試験として小径コア採取し、孔内側面を棒状スキャナー、内部カメラを用いた診断法も実施されている。一方、阿部ら⁷⁾は簡単でかつ正確な診断が可能な方法として、φ10mm 程度の小径孔を開け、この孔に蛍光塗料を混入した浸透性接着剤¹²⁾を注入し、水平ひび割れや脆弱箇所浸透させて一体化した後、外周をコアドリルで「柱状サンプル」を採取し、ブラックライトを用いて撮影することでひび割れが確認できるものであり、ひび割れ幅、位置が的確に診断できるものである。

以上のように、本開発した小径コアドリルによる強度推定、水平ひび割れの診断法を提案する。

3. コンクリート切削エネルギーの算定式

3.1 小口径コア型試験機の概要

小口径コア型試験機を図-2 に示す。本試験機は、直流式のモータにより、ドリル全体を押す力、すなわちドリルの上方に荷重を作用させ、モータの回転により切削する装置である。この装置を用いた強度の測定は、ドリルの回転数、作用荷重 (F_z)、電流値 (A) を深さ方向 (ΔL) に動的に計測することにより行う。なお、ドリルビットの先端の工業用ダイヤモンドは掘削延長 8m までは計測値に影響なく切削できる結果が得られているが、本実験では掘削するごとにビットを研磨して、切削性能を保持することとする。

3.2 小口径コア型試験機を用いた強度推定

本実験より得られた計測値を用いて、鉛直方向の切削エネルギー (E_F) (以下、鉛直切削エネルギーとする) とドリルの回転による切削エネルギー (E_M) (以下、回転切削エネルギーとする) をそれぞれ深さ方向に算定する。また、本試験機がコンクリートを 1.0mm 切削するための鉛直切削エネルギーの累積 (ΣE_F) (以下、累積鉛直切削エネルギーとする) および回転切削エネルギーの累積 (ΣE_M) (以下、累積回転切削エネルギーとする) から、合計切削エネルギー (ΣE) を算出し、コンクリート圧縮強度 f_c を深さ方向に推定するものである。

以上より、本試験機による任意の深さの切削時の合計切削エネルギー (ΣE) は式(1)として与えられる。

$$\Sigma E = \Sigma(E_F + E_M) \quad (1)$$

$$E_F = F_z \times \Delta L \quad (1.1)$$

$$E_M = M_z \times \Delta \theta \quad (1.2)$$

ここで、 ΣE : 合計切削エネルギー (J)、 E_F : 鉛直切削エネルギー、 E_M : 回転切削エネルギー、 F_z : 作用荷重 (N)、 ΔL : 計測間隔における深さ方向の変位 ($=\Delta L_{n+1} - \Delta L_n$: ΔL_{n+1} : n+1 回目の深さ (mm)、 ΔL_n : n 回目の深さ (mm))、 M_z : 切削トルク ($=A \times 0.9511$, A : 電流 (A)) (N・m)、 $\Delta \theta$: 計

測間隔における回転角度 (=回転数×2π/60) (rad/sec)

4. コンクリートの強度推定

4.1 圧縮強度と合計切削エネルギーの関係

小口径コア型試験機を用いて、コンクリートの圧縮強度を評価するために、コンクリートの骨材寸法 15mm 以下を配合した呼び強度 24N/mm² で配合した供試体 3 体、30N/mm² で製作した供試体 1 体、および最大寸法 25mm 以下を配合した呼び強度 30N/mm², 35N/mm², 40N/mm² で配合した普通コンクリート床版供試体を用いて合計切削エネルギーを得た。一方、道路橋 RC 床版は劣化に伴い、鋼繊維補強コンクリート (SFRC) 材で上面増厚補強されている。そこで、筆者らの既往の研究において SFRC 材の合計切削エネルギーと圧縮強度 ($\Sigma E = 780J$, 圧縮強度 = 44N/mm²) の関係も含めて、コンクリート強度推定式を提案し、これを用いてコンクリートの強度推定を行った。しかし、コンクリートの圧縮強度が 40N/mm² 付近と RC 部材のコンクリート圧縮強度が高めに算定された。そこで、本研究では SFRC 材として、普通セメントに鋼繊維を混入した SFRC の要求性能を RC 床版と同様にコンクリートの設計基準強度 30N/mm², 40N/mm² を要求性能とした。なお、鋼繊維には φ0.62mm, 長さ 30mm を混入量 1.27Vol% で混入し、水セメント比 (W/C) は 53% および 41% とする。ここで、配合条件を表-1 に示す。SFRC コンクリート床版の合計切削エネルギーは本試験機を用いて、損傷を受けていない端部から 3 箇所、切削し、式(1)より、評価した。次に、SFRC の圧縮強度は、合計切削エネルギーを評価する 3 箇所付近から φ50mm×100mm のコア採取して、小径コア専用の圧縮試験機も用いて圧縮試験を行った。ここで、SFRC 材の圧縮強度と合計切削エネルギー (ΣE) を表-2 に示す。なお、表-2 に示した、SFRC 材の圧縮強度と合計切削エネルギー (ΣE) で*1 は、要求性能として圧縮強度 30N/mm², *2 は圧縮強度 40N/mm² の SFRC 床版から得られた結果である。また、無印は SFRC 上面増厚補強した床版から得られた結果であり、配合条件は不明である。これらの関係を表-2 に併記した。また、コンクリートの圧縮強度および合計切削エネルギーの関係を図-3 に示す。

コンクリートの圧縮強度 f_c の推定は、表-2 および図-3 に示した、コンクリートの圧縮強度と合計切削エネルギー ΣE の関係より近似式、すなわち RC 材と SFRC 材それぞれのコンクリート強度推定式と定義し、式(3), (4) を提案する。

既往の研究 (RC, SFRC 材) :

$$f_c = 0.3894 \times \Sigma E^{(0.7040)} \quad (2)$$

RC 材 :

$$f_{c,RC} = 0.5064 \times \Sigma E^{(0.6597)} \quad (3)$$

SFRC 材 :

$$f_{c,SFRC} = 0.2466 \times \Sigma E^{(0.7789)} \quad (4)$$

表-1 SFRC の配合条件

供試体	スランブ (cm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					SP (C×%)	AE (C×%)
				C	W	S	G	SF		
SFRC-24	8.0 ±2.5	53.0	51.4	330	175	889	873	100	2.00	0.004
SFRC-40	8.0 ±2.5	41.0	53.9	43	175	890	788	100	2.00	0.004

表-2 圧縮強度と合計切削エネルギー

供試体	圧縮強度 (N/mm ²)	合計切削エネルギー (J)
最大骨材寸法15mm以下のコンクリート	24.1	351
	24.5	359
	24.9	369
	29.2	473
最大骨材寸法20mm以下のコンクリート	31.0	480
	35.0	660
	39.8	742
	45.0	800
SFRC (鋼繊維100kg/m ³ , 最大骨材寸法20mm) (*1, *2: SFRC床版供試体, 無印: SFRC上面増厚)	38.0 *1	650
	44.0	780
	48.3	850
	54.1	1037
	61.0 *2	1176

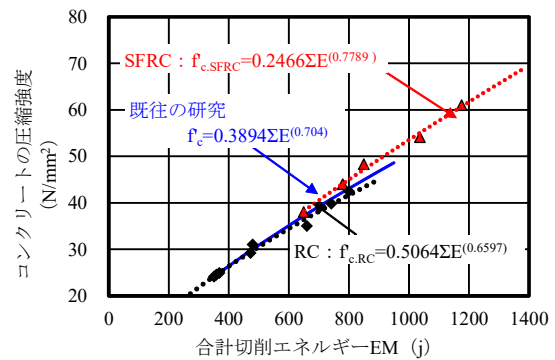


図-3 圧縮強度と合計切削エネルギーの関係

ここに、 f_c : コンクリートの圧縮強度 (N/mm²), ΣE : 合計切削エネルギー (J)

5. SFRC上面増厚補強したRC床版への適用例

5.1 供試体概要

実橋 RC 床版に SFRC 上面増厚補強した試験体を用いて本提案する小口径コア型試験機を用いたコンクリートの圧縮強度推定試験を行った。ここで、実験供試体の断面方向の損傷状況を写真-2 に示す。

本供試体は旧銚子大橋の床版であり、47 年間供用した後に撤去した床版である。この床版の寸法は、既設 RC 床版が 130mm, SFRC 増厚層が 80mm であった。既設 RC 床版の SFRC 増厚層には φ0.6mm, 長さ 30mm の鋼繊維, 最大寸法 15mm の砕石が混入されている。また、既存の RC 床版には最大寸法 20mm の骨材が混入していた。これを実験のため、増厚層を 30mm 切削して 50mm の増厚に整

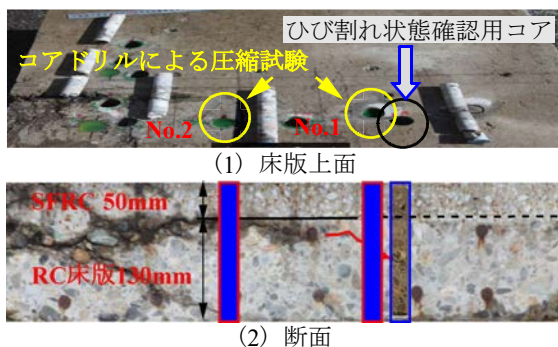


写真-2 試験に用いた SFRC 上面増厚床版

形し、輪荷重走行による疲労実験を行い、押抜きせん断破壊させた供試体である。床版撤去時に SFRC 増厚層から $\phi 50 \times 80 \text{mm}$ の小径コア、疲労試験用に加工した供試体から $\phi 25 \times 50 \text{mm}$ のコア採取して圧縮試験を行った。その結果、SFRC 増厚層の圧縮強度の平均は 56.4N/mm^2 、既設 RC 床版の圧縮強度の平均は 38.2N/mm^2 であった。

5.2 実験方法

供試体上面に本試験機を設置する。小口径コアビットの寸法は内径 $\phi 25 \text{mm}$ 、厚さ 3.0mm 、長さ 300mm である。また、エアコンプレッサーによる作用荷重は 0.72MPa で作用させた。深さ方向 180mm の切削に要する時間を 5 分、収録データ数を 3,000 データと設定した。なお、ドリルの回転数は $1,500 \text{回/min}$ とした。この実験条件により、切削時間、作用荷重、表面からの切削深さ、電流値のデータを動的に計測し、合計切削エネルギー ΣE を式(1)より算出した。

5.3 深さ方向の作用荷重

SFRC 上面増厚補強を施した RC 床版のコンクリート表面からの距離と作用荷重の関係を図-4 に示す。作用荷重の目標を 200N とすることからコンプレッサーの出力を 0.72MPa で作用させた。コンクリート表面からの切削完了までは押し力の変動があるものの 200N と一定の押し力で切削している。

5.4 切削に要する時間

コンクリート表面から深さ 180mm まで切削するに要する時間と深さの関係を図-5 に示す。ドリルの回転数は $1,500 \text{回/min}$ の一定値とした。増厚層の切削時間と RC 床版部の切削時間が強度の違いにより変化している。

5.5 切削に要する電流

電流と深さ方向の関係を図-6 に示す。コア No.1 はコンクリート表面から 50mm の位置までは SFRC 増厚部なので電流が $0.9 \sim 1.1 \text{A}$ の範囲で変動している。しかし、切削深さ 50mm を超えた付近で電流の 0.75A に低下し、電流の変動があるものの一定の電流が計測されている。

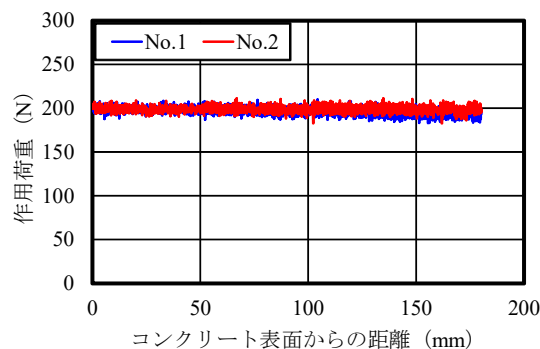


図-4 作用荷重と深さ方向の関係

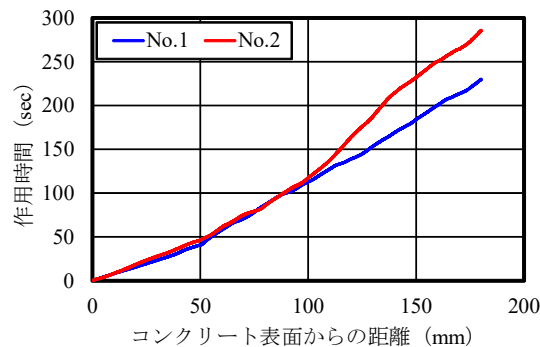


図-5 切削時間と深さ方向の関係

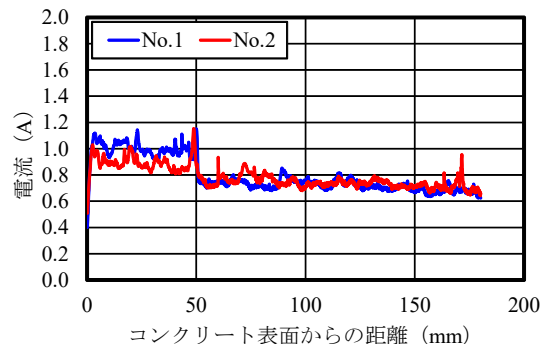


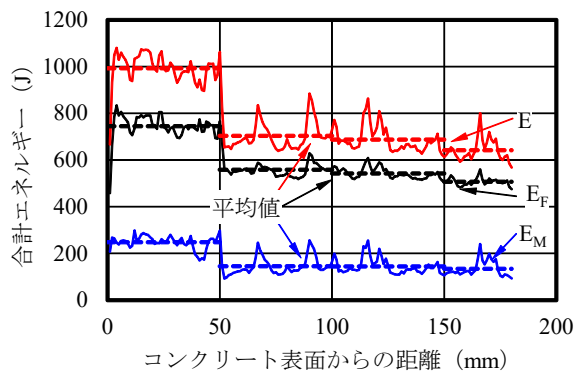
図-6 電流と深さ方向の関係

コア No.2 も同様に 50mm の位置までは SFRC 増厚部であり、電流が $0.8 \sim 1.2 \text{A}$ の範囲で変動し、No.1 に比して低下している。切削深さ $50 \text{mm} \sim 100 \text{mm}$ の変動が大きい、 0.75A に低下し、電流の変動があるもののほぼ一定の電流が計測されている。骨材の位置による変動と急激な強度差が生じる位置では直流モータの特徴により 5%程度電流が増加する結果が得られている。

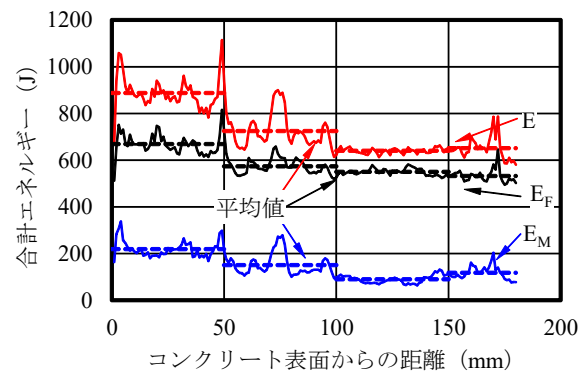
電流の変動が確認された位置は SFRC 層と既設 RC 床版との界面の位置であり、コンクリートの圧縮強度に差異が生じていることが推察される。この計測したデータを基に切削エネルギーおよび SFRC 増厚層および既設 RC 床版のコンクリートの圧縮強度を推定する。

5.6 切削エネルギーの算出および圧縮強度の推定

深さ方向と累積鉛直切削エネルギー、累積回転切削エネルギーおよび合計切削エネルギーの関係を図-7 に示

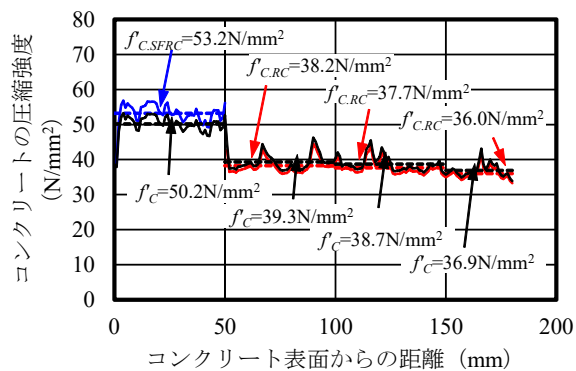


(1) No.1

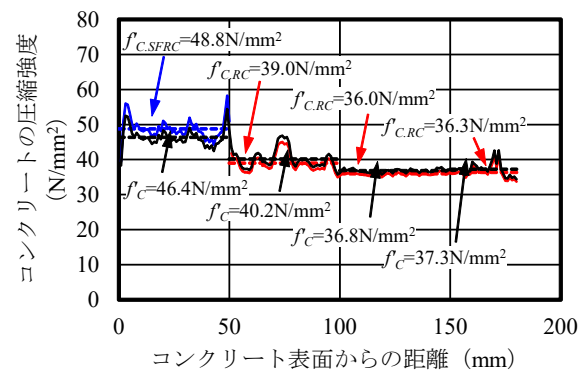


(2) No.2

図-7 合計エネルギーと深さ方向の関係



(1) No.1



(2) No.2

図-8 コンクリートの圧縮強度と深さ方向の関係

す。また、合計切削エネルギー式(1)およびコンクリート圧縮強度推定式(2)~(4)によって算出されるコンクリートの圧縮強度と深さの関係を図-8に示す。

式(1)を用いて合計切削エネルギーを算出するとコア No.1 は 0 ~ 50mm すなわち SFRC 層では平均 993J, 50mm 以降は平均 677J の合計切削エネルギーが得られている。コア No.2 の合計切削エネルギーは SFRC 層で平均 888J, 50mm 以降の既設 RC 床版では平均 672J の合計切削エネルギーが得られている。

既往の研究である式(2)を用いて算出したコンクリートの圧縮強度と合計切削エネルギーの関係から得られたコア No.1 の SFRC 増厚層の推定圧縮強度は 50.2N/mm² である。既設 RC 床版の 50mm ~ 100mm 層の圧縮強度の平均が 39.3N/mm², 100mm ~ 150mm が 38.7N/mm² となった。150mm から 180mm 層内は 36.9N/mm² と既設 RC 床版の平均圧縮強度は 38.3N/mm² となった。SFRC 増厚層の圧縮強度はコア採取による圧縮強度 56.4N/mm² の 0.89 倍である。また、既設コンクリート床版の圧縮強度 38.2N/mm² の 1.00 倍である。コア No.2 の SFRC 増厚層の推定圧縮強度は 46.4N/mm² である。既設 RC 床版の 50mm ~ 100mm 層の圧縮強度の平均が 40.2N/mm², 100mm ~ 150mm が 36.8N/mm², 150mm から 180mm 層内は 37.3N/mm² と既設 RC 床版の平均圧縮強度は 38.1N/mm² となった。SFRC 増厚層

の圧縮強度はコア採取による圧縮強度 56.4N/mm² の 0.82 倍、既設コンクリート床版の圧縮強度 38.2N/mm² の 0.99 倍である。

次に、RC 部材の強度推定式(3)と SFRC の強度推定式(4)を適用した場合、コンクリートの圧縮強度と合計切削エネルギーの関係から得られたコア No.1 の SFRC 増厚層の推定圧縮強度は 53.2N/mm² である。既設 RC 床版の 50mm ~ 100mm 層の圧縮強度の平均が 38.2N/mm², 100mm ~ 150mm が 37.7N/mm² となった。150mm から 180mm 層内は 36.0N/mm² と既設 RC 床版の平均圧縮強度は 38.3N/mm² となった。SFRC 増厚層の圧縮強度はコア採取による圧縮強度 56.4N/mm² の 0.94 倍、既設コンクリート床版の圧縮強度 38.2N/mm² の 0.98 倍である。コア No.2 の SFRC 増厚層の推定圧縮強度は 48.8N/mm² である。既設 RC 床版の 50mm ~ 100mm 層の圧縮強度の平均が 39.0N/mm², 100mm ~ 150mm が 36.0N/mm² となった。150mm から 180mm 層内は 36.3N/mm² と既設 RC 床版の平均圧縮強度は 37.1N/mm² となった。SFRC 増厚層の圧縮強度はコア採取による圧縮強度 56.4N/mm² の 0.87 倍、既設コンクリート床版の圧縮強度 38.2N/mm² の 0.97 倍である。

以上より、小口径コアドリル試験機を用いたコンクリートの圧縮強度推定は実橋梁床版の φ50×80mm と φ25×50mm で採取したコアサンプルの圧縮強度と近似す

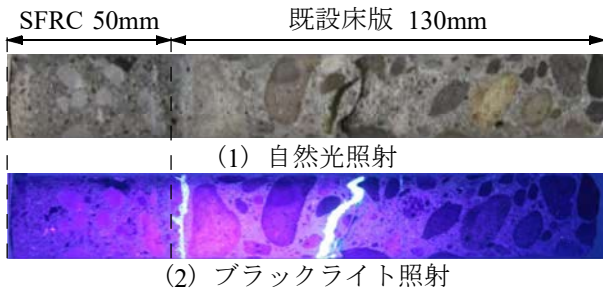


写真-3 採取した柱状サンプルの内部変状

る結果が得られ、圧縮強度を層ごとに推定が可能であると考えられる。

5.7 採取したコアサンプルの内部変状調査

本実験でコンクリートの強度推定を検証した実橋梁 RC 床版は写真-2 に示すコア No.1 の近傍に水平ひび割れが生じている。そこで、内部変状を調査するために柱状サンプル採取法を用いて、小径コアを採取した。採取方法は、 $\phi 10\text{mm}$ のコアドリルを用いて穿孔し、側面には水平ひび割れが確認されることから、浸透性接着剤の漏出防止としてシール材で覆う。その後、 $\phi 10\text{mm}$ の孔に蛍光塗料を混入した浸透性接着剤を圧入した。養生終了後、 $\phi 25\text{mm}$ のコアドリルで切削し、自然光およびブラックライトを照射して柱状サンプルを撮影した。ここで、採取した柱状サンプルの内部変状を写真-3 に示す。その結果、写真-3(1)に示すように自然光を照射した場合には微細なひび割れを目視で確認が困難である。一方、写真-3(2)に示すようにブラックライトを照射した場合には、増厚界面付近や上面から 120mm の位置に発生している微細なひび割れが目視によって確認される。

以上より、浸透性接着剤に蛍光塗料を混入することでコンクリートの内部に生じているひび割れを的確に判定することが可能となる。

6. まとめ

- (1) 本実験装置で収録された計測データより、作用荷重と回転数が一定に作用していることから電流の変動が著しい位置では骨材の混入状況や内部変状が発生していると考えられる。また、上面増厚補強された実床版では SFRC 層と既設床版との界面で電流の変動が確認されることから収録されたデータから算出されるコンクリートの強度の変化に反映される結果となった。
- (2) 本実験装置で収録できる切削時間 (sec)、荷重 (N)、表面からの深さ方向の寸法 (mm)、電流 (A) を用いて算出される合計切削エネルギー ΣE と $\phi 50 \times 100\text{mm}$ のコアサンプルから得られた圧縮強度の関係からコンクリートの強度推定式を提案し、算出された強度

が実橋梁から採取したコアサンプルの強度と近似することから実構造物の内部コンクリートの強度推定が可能となる。

- (3) 本実験装置を用いたコンクリート床版内部のひび割れや内部損傷の診断は、水平ひび割れが発生した RC 床版から浸透性接着剤の注入により、1 本化された柱状サンプルの採取が可能となった。また、蛍光色を混入した浸透性接着剤がブラックライトを照射することにより、可視化や水平ひび割れ幅の測定が可能となる。
- (4) コア採取によるコンクリート床版の内部変状確認調査は、床版厚さ全幅の内部変状の発生位置や寸法を極力見落とすことなく把握でき、適切な補修補強対策が適用することが可能であることから本提案する診断法は有効な調査技術であると考えられる。

参考文献

- 1) 土木学会：鋼構造シリーズ 27 道路橋床版の維持管理マニュアル 2016, 2016.10
- 2) 国土交通省道路局：道路橋定期点検要領, 2014.6
- 3) 伊藤清志, 阿部忠, 岩崎正二, 大塚裕太：塩害・凍害の複合劣化を受けた RC 床版の上面増厚補強法による耐疲労性の評価, 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 13 巻, pp.373-380, 2013.11
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I, II, 2012.3
- 5) 東日本高速道路(株)東北支社仙台管理事務所：東北自動車道仙台宮城 IC ~ 泉 IC 間 綱木川橋梁老朽化対策工事について (下り線), 資料, 2013.11
- 6) 阿部忠, 高野真希子：コンクリート構造部材の深さ方向性状測定方法及び装置, 特許第 6093951 号
- 7) 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 号
- 8) 土木学会：硬化コンクリートのテストハンマー強度試験法, コンクリート標準示方書 [規準編], 2010.11
- 9) 日本コンクリート工学会：コンクリート診断技術' 14 [基礎編], 2014.2
- 10) 鎌田敏郎, 内田慎哉：コンクリートの非破壊試験の理論と実際③弾性波法 (超音波法・衝撃弾性波法) の理論と実際, コンクリート工学, Vol.51, No.4, pp.340-347, 2013.4
- 11) 田中正吾, 岡本昌幸：電磁波レーダを用いた鉄筋コンクリートにおける鉄筋のかぶり高精度非破壊測定, 非破壊検査 Vol.59, No.4, pp.183-188, 2010
- 12) 大野晃, 伊藤清志, 山下雄史, 阿部忠：超速硬繊維補強セメントモルタルを用いた道路橋 RC 床版の部分補修技術に関する研究, 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 13 巻, pp.357-264, 2013.11

(2018 年 7 月 20 日)