

論文 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の提案

高野 真希子*1・阿部 忠*2・野口 博之*3・大窪 克己*4

要旨：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の推定法に関する研究である。小口径コアドリル装置に変位計、荷重計、電流計を取り付けてコンクリート表面から深さ方向それぞれのデータを動的に計測し、鉛直および回転切削エネルギーの合計から強度を推定した。その結果、合計エネルギーとコンクリートの圧縮強度の関係から提案したコンクリート強度推定式に合計切削エネルギーを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となった。また、実橋SFRC増厚補強したRC床版に本装置を用いてコンクリート強度を推定した結果、近似する結果が得られた。

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

道路橋のコンクリート部材は、交通車両の増大による疲労劣化や、建設地域の環境条件により、建設当初のコンクリートの性能が低下しているものも少なくない。例えば、海岸線に建設されているコンクリート橋は、飛来塩分による塩害、積雪寒冷地域では凍結防止剤の散布による塩害や凍害を受け、鉄筋やPCケーブルの腐食や凍結・融解の繰り返しにより、土砂化などの損傷を受けている。道路橋コンクリート部材の劣化についての診断技術としては各種の非破壊検査が提案されているもの脆弱箇所診断については明らかにされていないのが現状である。よって、道路橋RC床版やコンクリート橋などの維持管理においては、コンクリートの圧縮強度の低下等の劣化状態を適切に診断して補修・補強が実施可能であるかの判定を行った上で各種補強法の選定を行う必要がある。これらのことから、コンクリート部材やRC床版内部のコンクリート強度をコンクリート表面から内部方向に測定および診断する小口径コア型コンクリート強度診断試験機¹⁾(以下、小口径コア型試験機とする)を開発した。

そこで本研究では、最大骨材寸法10mmの粗骨材を配合したコンクリート床版および最大骨材寸法20mmの粗骨材を配合したコンクリート床版に小口径コア型試験機を用いて、コンクリート表面から深さ方向に圧縮強度と合計切削エネルギーの関係から強度推定式を提案した。また、合計切削エネルギーを得て、コンクリートの圧縮強度を推定した。さらに、実橋から撤去したSFRC増厚補強RC床版を用いて小口径コア型試験機によるコンクリート表面から50mmごとにコンクリートの強度を推定し、小口径コア型試験機を用いたコンクリートの圧縮強度を推定した。



(1) 床版内部の土砂化 (2) 水平ひび割れ

図-1 道路橋RC床版の内部損傷の一例

2. RC床版の損傷および圧縮強度と寿命の関係

2.1 RC床版の損傷事例²⁾

高速道路橋RC床版が疲労による損傷と凍結防止剤の散布による塩害と凍害の複合劣化により、供用開始後38年でPC床版に取り替えされた。その損傷事例を図-1に示す。図-1(1)は、コンクリート床版とSFRC上面増厚との下面付近で土砂化が生じている。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、この橋梁RC床版は、塩害による鉄筋に発錆や下面には2方向ひび割れから遊離石灰の滲出が著しい。床版撤去時に8ヵ所からコア採取し、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/mm²、最大値が26.9N/mm²、平均圧縮強度は23N/mm²であり、道路橋示方書・同解説³⁾(以下、道示)に規定するコンクリートの設計基準強度24N/mm²を下回る結果となっている。また、静弾性係数も16.5kN/mm²と、道示に規定する25.0kN/mm²を下回っていた。現状における橋梁点検および調査では、内部コンクリートの強度試験はあまり行われていないのが現状である。

2.2 コンクリートの圧縮強度と寿命の関係

阿部ら⁴⁾はコンクリートの圧縮強度19N/mm²~35N/mm²

*1 中日本ハイウェイ・エンジニアリング東京(株) 博士(工学) (正会員)

*2 日本大学 生産工学部土木工学科教授 博士(工学) (正会員)

*3 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 (学生会員)

*4 中日本ハイウェイ・エンジニアリング東京(株) 博士(工学)

の範囲のRC床版供試体を用いて輪荷重走行疲労実験をコンクリートの圧縮強度が耐疲労性に及ぼす影響についての研究成果を報告している。この結果、道示に規定するコンクリートの設計基準強度 24N/mm^2 を基準とした場合、圧縮強度 19N/mm^2 の供試体は寿命が0.14倍、 35N/mm^2 の供試体は3.6倍となる結果を報告している。したがって、老朽化したコンクリート部材の補強対策においてはコンクリートの圧縮強度の確保が重要となるものと考えられる。従来は $\phi 100 \times 200\text{mm}$ のコア採取による圧縮強度試験を行い、強度推定を行っていた。本提案する手法では、開発した小口径コア型試験機を用いることにより、RC床版やコンクリート部材に大口径の孔を開けることがなく、深さ方向に圧縮強度を推定することが可能となる。

3. 小口径コア型試験機を用いた強度推定

3.1 小口径コア型試験機の概要

本試験機は、試験体を切削するコアドリル、コアドリルを可動させる直流式のモータ、エアーコンプレッサーから送り込まれるエアーを作用荷重として載荷させるアクチュエータ、作用荷重を計測するロードセルおよび深さ方向の距離を計測する変位計で構成されている。この装置を用いた強度の推定は、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。小口径コア型試験機を図-2に示す。なお、ドリルビットの先端の工業用ダイヤモンドは掘削長さ8mまでは強度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1m掘削するごとにビットを研磨して、切削性能を保持した。

3.2 コンクリート切削エネルギーの算定式

本実験より得られたデータを用いて、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、本装置がコンクリートを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) を算定し、合計切削エネルギー (ΣE) を評価し、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。

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

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

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

ここに、 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、 ΔL : 計測間隔における深さ方向の変位 ($=\Delta L_{n+1} - \Delta L_n$ 、

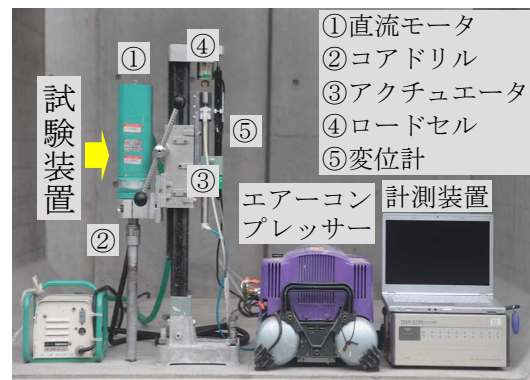


図-2 小口径コアドリル試験機一式

表-1 コンクリートの配合条件

(1) 最大骨材寸法10mm

スランブ (cm)	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位重量 (kg/m^3)				
				C	W	S	G	AD
18	4.5	58.5	48.3	313	186	840	940	3.13

(2) 最大骨材寸法20mm

スランブ (cm)	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位重量 (kg/m^3)				
				C	W	S	G	AD
18	4.5	51.0	46.2	365	186	780	948	3.65

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) (Nm)、 $\Delta \theta$: 計測間隔における回転角度 ($=$ 回転数 $\times 2\pi/60$) (red/sec)

4. 使用材料・供試体寸法および実験方法

4.1 使用材料およびコンクリート版試験体の寸法

本試験機を用いて圧縮強度を評価するコンクリート試験体の寸法は幅 $1,200 \times 1,200\text{mm}$ 、厚さ 200mm とする。圧縮強度 24N/mm^2 程度が確保できるように、試験体のコンクリートには、普通ポルトランドセメント、5mm以下の砕砂、最大骨材寸法10mmの粗骨材を使用した。配合表を表-1に示す。

4.2 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、エアーコンプレッサーによる作用荷重 (F_z) は 0.8MPa で作用させた。なお、深さ 200mm を一定の作用荷重により切削するためには、切削中にエアー圧力の増減がないように、エアーコンプレッサーのエアー圧力を設定する必要がある。深さ方向 200mm の切削に要する最大所要時間を5分、収録データ数を3000データと設定する。なお、ドリルの回転数は 1500回/min とした。この実験条件により、切削時間 (sec)、作用荷重 (N)、表面からの切削深さ (mm)、電流値 (A) 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。

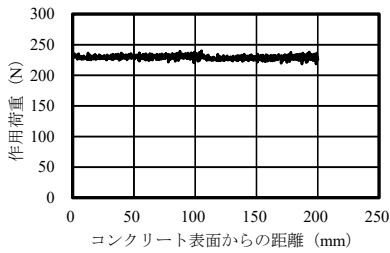


図-3 深さ方向と作用荷重の関係

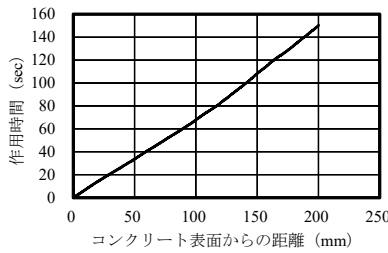


図-4 深さ方向と切削時間の関係

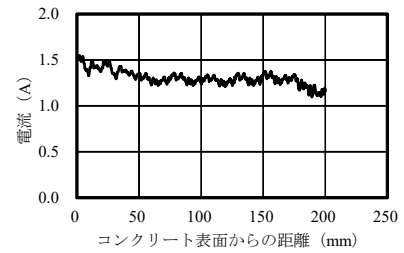


図-5 深さ方向と電流の関係

5. 計測結果および切削エネルギーの算出

5.1 深さ方向の作用荷重

コンクリート表面から深さ200mmまでの切削深さ (mm)と作用荷重 F_z (N)の関係を図-3に示す。コンプレッサーからのエア圧力を0.8MPa一定値で作用させた場合の作用荷重は約230Nである。図-3より、作用荷重は設定値230Nに対して225N~235Nの範囲 (± 5.0 N)で推移している。また、表面から深さ200mmまでの作用荷重の平均は230Nであり、最大骨材寸法10mmの骨材の影響を考慮しても安定した制御ができていたことが確認できた。

5.2 切削に要する時間

コンクリート表面から深さ200mmまで切削するに要する時間 (sec)と深さ (mm)の関係を図-4に示す。深さ200mmまで切削するに要する時間 (sec)は150.2secであり、図-4に示すとおりほぼ線形的に増加していることが確認できた。

5.3 切削時の電流

本装置のドリルモーターは、設定した回転数を一定に保つように電流値を上昇させてトルクが発現するように制御を行う特徴を有している。よって、強度の高低 (負荷の大小)が電流値に影響を与える。ここで、電流 (A)とコンクリート表面からの距離 (mm)の関係を図-5に示す。初期電流値は1.55Aと高いが、これはコンクリート表面にコアドリルが接触した際に負荷が大きくなり、電流が高い結果となる。その後徐々に安定し、電流は1.22A~1.32Aの範囲での増減となった。この増減が、回転エネルギーに大きく影響する。この電流の変化、すなわち切削トルク M_z (Nm)とモーターの回転数 (本装置の回転数は一定値1500回/min)から算定される回転角度 $\Delta\theta$ (rad/sec)を用いて、回転による切削エネルギー E_M が算定される。

5.4 コンクリートの切削エネルギーの算出

(1) 累積鉛直切削エネルギー: ΣE_F

本供試体の累積鉛直切削エネルギー ΣE_F とコンクリート表面からの距離の関係を図-6に示す。なお、図-6には切削深さ50mmごとの平均値も併記した。作用荷重が230Nで作用させた場合の切削時の累積鉛直切削エネルギー

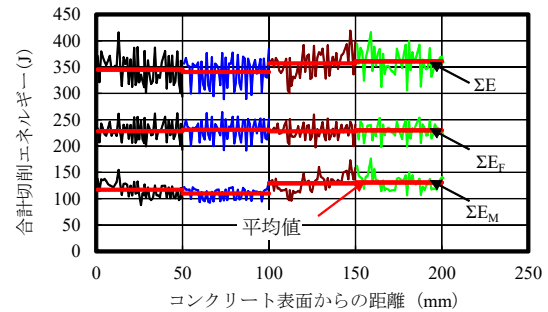


図-6 合計切削エネルギー

は200Jから260Jの範囲である。表面から深さ方向に50mmごとに累積鉛直切削エネルギーを算定した結果、表面から0mm~50mmまでが228J、50mm~100mmまでが231J、100mm~150mm、150mm~200mmでは228J、230Jである。

(2) 累積回転切削エネルギー: ΣE_M

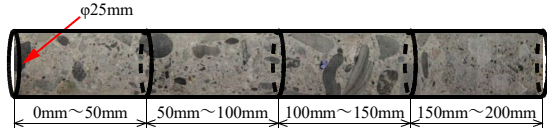
ドリルの回転数1500回/minおよび電流Aから算定される深さ方向の累積回転切削エネルギー ΣE_M とコンクリート表面からの距離の関係を図-6に併記した。切削するための累積回転切削エネルギーは図-6に示すように、コンクリート表面付近では138J、深さ12mm付近で154Jであり、その後減少している。また、50mmごとの累積回転切削エネルギーは、0mm~50mmまでが117J、50mm~100mmまでが110J、100mm~150mm、150mm~200mmでは129J、131Jである。なお、採取したコアを $\phi 25$ mm \times 50mmに成形して行った圧縮試験結果との相関関係は後述する。

(3) 合計切削エネルギー: ΣE

本試験機を用いて本計測条件および解析条件により得られた累積鉛直切削エネルギー ΣE_F と累積回転切削エネルギー ΣE_M の合計、すなわち合計切削エネルギー ΣE を図-6に併記した。本装置がコンクリートの深さ方向に切削するためのエネルギーには図-3に示すように、作用荷重がほぼ一定値で作用していることから、深さ方向の累積鉛直切削エネルギー ΣE_F は、ほぼ一定範囲で推移している。一方、ドリルの回転数および電流Aから算定される累積回転切削エネルギー ΣE_M は50mmの切削層ごとに差異が生じている。50mmごとの合計切削エネルギー

表-2 採取したコアの圧縮試験による圧縮強度

呼び強度 24N/mm ²	直径 (mm) : D			高さ (mm) : H			H _{AVE} /D _{AVE}	補正係数	最大荷重 (kN) : P	圧縮強度 (N/mm ²) : σ _c
	D ₁	D ₂	D _{AVE}	H ₁	H ₂	H _{AVE}				
0mm~50mm	24.40	24.45	24.43	47.50	47.40	47.45	1.94	0.995	11.22	23.84
50mm~100mm	24.50	24.45	24.48	48.30	48.15	48.23	1.97	0.997	11.02	23.36
100mm~150mm	24.50	24.50	24.50	48.90	48.80	48.85	1.99	0.999	11.60	24.59
150mm~200mm	24.60	24.60	24.60	48.50	48.70	48.60	1.97	0.997	11.80	24.76
平均										24.14



(1) コア採取による圧縮試験供試体の寸法



(2) 50mmに切断 (3) 小径コア圧縮試験

図-7 小径コア圧縮試験用供試体および圧縮試験

一は、0mm~50mmまでが345J、50mm~100mmまでが341J、100mm~150mm、150mm~200mmでは357J、361Jであり、合計切削エネルギーの平均値は351Jである。

6. コンクリートの強度推定

6.1 コンクリートの圧縮強度試験

採取した小径コアを用いた圧縮強度試験に用いる供試体寸法および小径コア用万能試験機を図-7に示す。

コンクリートの圧縮試験は、採取したφ25mm×200mmのコアを図-7(1)に示す試験体は高さ50mmごとにコンクリートカッターで切断し(図-7(2))、φ25mm×50mmの円柱供試体を4本製作する。圧縮試験は、図-7(3)に示す小径コア専用の万能試験機を用いて行った。荷重条件はJISに基づいて実施した。深さ50mmごとの圧縮試験の結果を表-2に示す。表-2より、コンクリートの圧縮強度は、深さ50mm付近までは23.8N/mm²、50mm~100mmの位置は強度が最も低く、23.4N/mm²である。100mm~150mmは24.6N/mm²、150mm~200mmは24.8N/mm²である。全体の平均は24.1N/mm²であり、ほぼ要求性能である圧縮強度24N/mm²が確保されている。

6.2 圧縮強度と合計切削エネルギーの関係

小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、表-1に示した最大骨材寸法10mm以下の粗骨材を使用した呼び強度24N/mm²の供試体から採取したコア3体に加え、最大骨材寸法10mm以下の粗骨材を使用した呼び強度30N/mm²の供試体から採取したコ

表-3 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)
骨材の最大寸法 10mm以下の コンクリート	24.1	351
	24.5	359
	24.9	369
	29.2	473
骨材の最大寸法 20mm以下の コンクリート	31.0	480
	39.8	742
	44.1	780

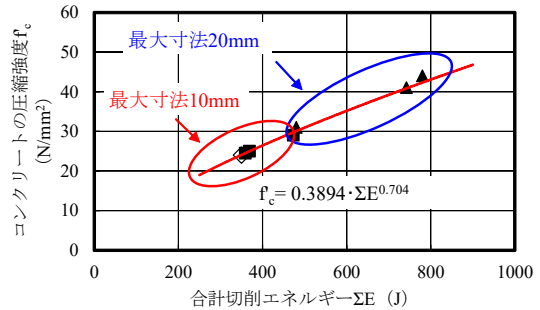


図-8 圧縮強度と合計切削エネルギーの関係

ア1体、最大骨材寸法20mm以下の粗骨材を使用した呼び強度30N/mm²の供試体から採取したコア1体、最大骨材寸法20mm以下の粗骨材を使用した呼び強度40N/mm²の供試体から採取したコア2体を用いて合計切削エネルギーを得た。また、圧縮強度についてはコア採取した試験体を用いて圧縮試験を実施した。

以上より、コンクリートの圧縮強度と合計切削エネルギーの関係として表-3に示した。また、コンクリートの圧縮強度推定式を得るためにコンクリート圧縮強度と合計切削エネルギーの関係を図-8に示した。これより、本実験範囲における合計切削エネルギーに対する圧縮強度推定式は式(2)で与えられる。よって、深さ方向に対応した切削時の合計切削エネルギーを式(2)に適用することにより、深さ方向のコンクリートの圧縮強度を推定することができる。

$$f_c = 0.3894 \times \Sigma E^{(0.704)} \quad (2)$$

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)

6.3 合計エネルギーから評価される圧縮強度の推定

本実験から得られた合計切削エネルギーΣEは図-6に示してある。この合計切削エネルギーΣEをコンクリート圧縮強度推定式(2)に適用した場合のコンクリート圧

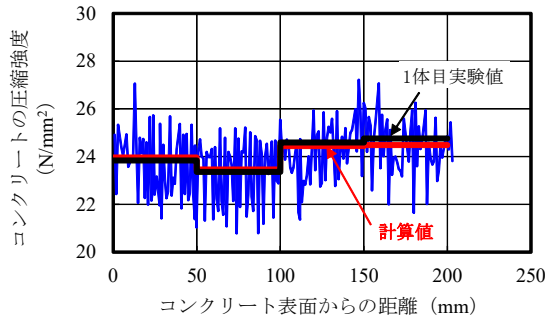


図-9 コンクリートの圧縮強度

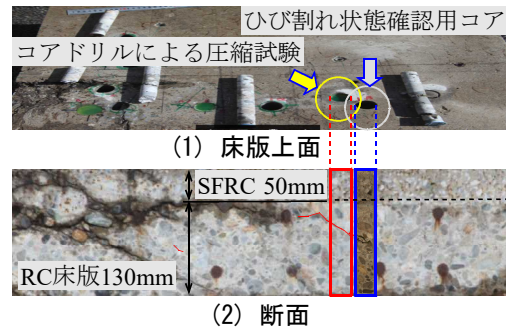


写真-1 試験に用いたSFRC上面増厚床版

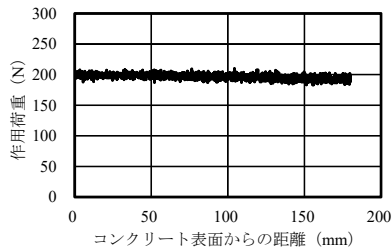


図-10 作用荷重と深さ方向の関係

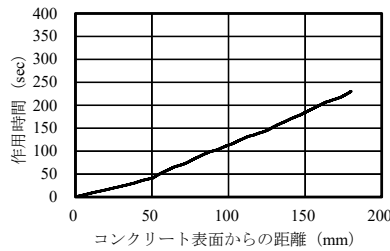


図-11 切削時間と深さ方向の関係

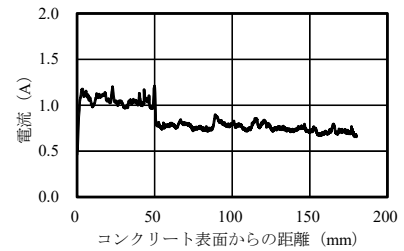


図-12 電流と深さ方向の関係

縮強度 f_c を図-9に示す。

本供試体の合計切削エネルギーをコンクリート強度推定式(2)に適用すると、表面から50mmまでの合計切削エネルギーから算定した圧縮強度は24.0N/mm²、小径コア圧縮試験による圧縮強度が23.8N/mm²である。50mmから100mmまでの圧縮強度の推定値は23.5N/mm²、実験値が23.4N/mm²である。同様に、100mmから150mmでは、推定値が24.4N/mm²、実験値が24.6N/mm²である。150mmから200mmまでの推定値は24.5N/mm²、実験値が24.8N/mm²であり、ほぼ近似した結果が得られた。

よって、コンクリート表面から深さ方向にコンクリートの圧縮強度を推定することが可能となることから、劣化したRC床版や凍害を受けたRC床版の脆弱層や水平ひび割れ発生位置での合計エネルギーの変化などから、脆弱箇所の判定に適用できると考えられる。

7. SFRC上面増厚補強したRC床版への適用例

7.1 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の推定試験を行った。ここで、実験供試体の断面方向の損傷状況を写真-1に示す。

本供試体は旧銚子大橋の床版であり、47年が経過し、撤去された床版である。この床版の寸法は、既設床版部が130mm、SFRC増厚部が80mmであった。このRC床版のSFRC増厚部にはφ0.6mm、長さ30mmの鋼繊維、最大寸法15mmの採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増厚部からφ50mm×80mmの小径コア、疲労試験用に加工した供試体からφ25×50mmのコア採取して圧縮試験を行った。その結果、SFRC増厚部の3本のコアの圧縮強度の平均は56.4N/mm²である。また、RC床版部からφ50mm×100mmの3本のコア採取による圧縮強度の平均は38.2N/mm²であった。このRC床版を写真-1に示す位置でコア採取による強度試験を実施した。また、写真-1(2)にはひび割れ箇所を併記した。

7.2 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-10に示す。コンプレッサーの出力を0.7MPa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。

7.3 切削に要する時間

コンクリート表面から深さ200mmまで切削するに要する時間(sec)と深さ(mm)の関係を図-11に示す。ドリルの回転数は1500回/minの一定値とした。増厚部の切削時間とRC床版部の切削時間が強度の違いにより変化している。

7.4 切削に要する電流

電流と深さ方向の関係を図-12に示す。コンクリート表面から50mmの位置までは電流が1.0～1.5Aの範囲で変動し、切削されている。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

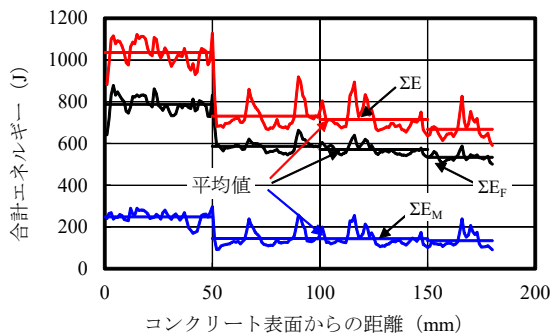


図-13 深さ方向と合計エネルギーの関係

の一定の電流が計測されている。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増厚部および既設RC床版のコンクリートの圧縮強度を推定する。

7.5 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-13に示す。また、図-13には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)によって評価されるコンクリートの圧縮強度の関係を図-14に示す。合計切削エネルギーは0~50mmすなわちSFRC層では平均1050J、50mm以降は平均700Jの合計切削エネルギーが得られている。次に、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SFRC増厚部の推定圧縮強度は52.7N/mm²である。既設RC床版の50mm~100mm層の圧縮強度の平均が40.4N/mm²、100mm~150mmが39.8N/mm²になった。150mmから180mm層内は37.9N/mm²である。したがって、SFRC増厚部の圧縮強度はコア採取による圧縮強度56.4N/mm²の0.93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1.05倍である。

以上より、実橋梁のコンクリートの圧縮強度と同等の結果が得られていることからコンクリートの圧縮強度を層ごとに推定が可能であると考えられる。

8. まとめ

- (1) 本実験装置を用いて、切削時間 (sec), 荷重 (N), 表面からの深さ方向の寸法 (mm), 電流 (A) が適切に収録できた。また、切削深さと荷重の関係から得られた式(1)から累積鉛直切削エネルギー ΣE_F および累積回転切削エネルギー ΣE_M が算定され、これらを合計することで合計切削エネルギー ΣE の評価が可能となった。

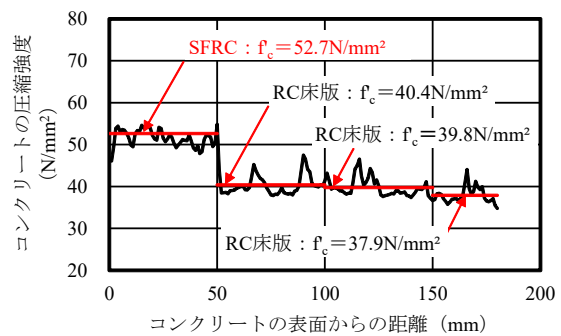


図-14 深さ方向とコンクリートの圧縮強度の関係

- (2) SFRC上面増厚補強したRC床版への適用事例では、SFRC増厚層と既設RC床版との界面付近で電流が著しく変動する結果が得られた。この電流の変動は収録データから算出されるコンクリートの圧縮強度の変化を適切に反映している。
- (3) 累積鉛直切削エネルギーと累積回転切削エネルギーの合計、すなわち合計エネルギーを評価すると、コンクリートの圧縮強度の差異により合計切削エネルギーも増減し、強度の変化に対応していることが確認できた。そこで、合計切削エネルギーとコンクリートの強度関係から合計切削エネルギー ΣE を変数とするコンクリート強度推定式を提案し、コンクリートを切削した場合の合計切削エネルギー ΣE を提案式に適用することで切削層のコンクリートの圧縮強度を推定することが可能である。
- (4) 本論文による提案式は、最大骨材寸法10mm以下のコンクリートによる圧縮強度24N/mm²の供試体および最大骨材寸法20mm以下のコンクリートによる圧縮強度44N/mm²の供試体から得られた評価式である。今後、強度範囲や実構造物の骨材状況等も踏まえてデータを蓄積することにより、推定式の精度向上を図る必要があると考える。

参考文献

- 1) 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, 2017.
- 2) 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
- 3) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 I, II, 2012.3
- 4) 阿部忠, 木田哲量, 高野真希子, 川井豊: 道路橋RC床版の押抜きせん断耐力および耐疲労性の評価, 土木学会論文集A1, pp.39-54, 2011.1