コンクリート橋検査における可搬型高エネルギーX 線源の

透過X線撮像能力の定量化

東京大学	大学院	正会員	〇竹内	大智
東京大学	大学院	非会員	小沢	壱生
東京大学	大学院	非会員	三津谷	有貴
東京大学	大学院	非会員	上均	反 充
土オ	卜研究所	正会員	大島	義信

1. 目的

コンクリート橋を対象とした X 線検査において,筆者らは 950 keV/3.95 MeV X 線源を活用することでより短時 間での検査,およびコンクリートの厚い箇所における検査を目標としており,過去に実橋梁における透過 X 線検査 を実施してきた.<sup>1)</sup>.しかし,両可搬型 X 線源が適用可能なコンクリートの厚さは,これまでは経験則に基づいて 判断されてきた.非破壊検査技術としての実用化にあたって,各 X 線源がどの程度のコンクリート厚さに対して適 用可能なのか定量的に評価することが重要である.そのため本研究では,コンクリート橋を対象とした,950 keV/3.95 MeV X 線源を用いた検査の適用可能なコンクリート厚さを特定する.

#### 2. コンクリート厚さごとの透過X線強度測定実験

実際の検査結果と、鋼材箇所における輝度値差を図-1 に示す. 図中の輝度値の分布は、十分に厚い 200 mm のコ ンクリート供試体を計測した際の X 線検査結果中に示されている直線上の輝度値分布である. この分布から、鋼材 のある箇所を透過した X 線の強度は、周囲のコンクリートを透過した X 線の強度と比べて低くなっており、輝度値 の差が生じていることが確認できる. また、輝度値の分布には、ノイズによる細かな振動が含まれていることが確 認できる. ここから、コンクリート構造物における検査において PC 鋼材を検出するための条件として、(a)X 線が コンクリートを透過すること、(b)コンクリートと PC 鋼材を識別できる輝度値差が生じること、(c)PC 鋼材箇所の輝 度値差がノイズに比べ十分に大きく、判別可能であることの 3 点を挙げることができる. これらの条件を満たす最 大のコンクリート厚さを、可搬型 X 線源の適用可能範囲とする. この適用可能範囲の特定にあたり、コンクリート

厚さとコンクリートを透過した X 線量 (透過 X 線強度)の関係を調べるため、コンクリート供試体を用いた実験を行った.

実験に使用したコンクリートは、一般 PC 橋を想定し、水セ メント比は 36%とした. コンクリートの配合を表-1 に示す. コンクリートは打設後,室内において封緘状態で1週間保管し たものを使用した. コンクリートの中央部には直径 10.8 mm 7 本より線の PC 鋼材 (JIS 規格 SEEE F130)を配置した. 実験 において撮影する供試体のコンクリート厚さは 200,300,400, 500 mm の4水準とし、透過X線強度および PC 鋼材箇所の輝 度値差、ノイズ量をそれぞれのコンクリート厚さに対して計 測する. 検出器には Perkin Elmer 社製フラットパネル検出器 (FPD)を用いた.

## 3. コンクリート厚さと透過 X 線強度の関係

コンクリートに対する透過 X 線強度は, FPD によって表現 される輝度値によって計測する. 透過 X 線強度 (Luminance

キーワード コンクリート橋,X線,透過X線検査,線源弱係数,実橋梁検査 連絡先 〒319-1188 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-22 東京大学 東海キャンパス



図-1 透過X線検査による撮像結果の例

<b>表-1</b> W/C 36 %	コンクリー	ト供試体の配合
---------------------	-------	---------

WIC	ala		単位量(kg)				
(%) (%)	air	117	a	q	a	AE	
	(%)	(%)	w	C	8	G	減水剤
36	50	1.1	167	463	726	966	2.77

TEL029-287-8432

-148

Value) は照射時間 t [秒], コンクリート厚さ x [mm], コンクリートの線源弱係数 μ<sub>c</sub> [mm<sup>-1</sup>]および初期線量 I を用 いて,式(1)のように表現される.式(1)を式(2)に変形し,実験値を用いて回帰分析を行った結果を図-2 に示す.

Luminance Value =  $t \cdot I \cdot e^{-\mu \cdot x}(1)$ ,  $\ln\left(\frac{Luminance}{dt}\right)$ 

$$e^{-\mu \cdot \mathbf{x}}(1), \qquad \ln\left(\frac{-\mu \cdot \mathbf{x}}{t}\right) = -\mu \cdot \mathbf{x} + \ln(I) \quad (2)$$

この回帰分析の結果から、コンクリートの線源弱係数は 950 keV X 線源では 0.017, 3.95 MeV では 0.011 となる ことがわかった.

# 4. PC 鋼材箇所に生じる輝度値差

コンクリート内部の PC 鋼材は, 透過 X 線検査の結果では画像中の輝度 値差として表現される.実験結果から,この輝度値分布における PC 鋼材 箇所における輝度値の変化を誤差関数でフィッティングすることで, PC 鋼材箇所の輝度値差を観測した.その結果を図-3 に示す.図-3より, PC 鋼材箇所の輝度値差は透過 X 線強度に対し線形に増加することが確認で きる.このことから PC 鋼材の直径を d[mm]とすると, PC 鋼材箇所の輝 度値差は式(3)に従うことが考えられる.

輝度値差 = t·l ( $e^{-\mu_c \cdot x} - e^{-\mu_c(x-d)-\mu_s \cdot d}$ )

式(3)を用いて各可搬型 X 線源使用時の PC 鋼材の線源弱係数 µ<sub>s</sub> を 実験結果の画像から平均を取得し計測した. その結果を表-2 に示す.

# 5. 可搬型X線源の適用可能なコンクリート厚さの特定

透過 X 線検査において, PC 鋼材箇所の輝度値差がノイズ量に対し て十分に大きい場合, PC 鋼材とコンクリートが判別可能となる.本 研究では,ノイズは検査結果の輝度値分布上に現れる振動であるた め,検査結果上の輝度値分布から,ハイパスフィルタを用いて微小な 振動量の分布としてノイズを抽出し,そのノイズ分布から 1σ 区間 をノイズ量として計測した.その結果,ノイズ量は透過 X 線強度に 対して 950 keV X 線源では 2%, 3.95 MeV X 線源では 2.5%ほど含ま れることが確認された.このノイズ量と PC 鋼材箇所に生じる輝度値 差を図-4 に示す.図-4 から各可搬型 X 線源の適用可能なコンク リート厚さの限界値は,950 keV X 線源では 350 mm, 3.95 MeV X 線源では 740 mm であると考えられる.

### 6. 結論

本研究により,950 keV X 線源はコンクリート 厚さ 350 mm まで,3.95 MeV X 線源はコンクリ ート厚さ 300 mm から 740 mm の範囲で適用可 能であると考えられる. 本研究は,一般 PC 橋で 用いられるコンクリートを想定して行われてい るため,実際の PC 橋に対して実橋梁検査を行う 場合においても同様の結果が見込めると考える.

## 参考文献

 上坂 充 他:"可搬型XバンドライナックX 線源による大型構造物内部透視動画と実橋 梁検査",検査技術, Vol.21, p. 45 – p.52, 2016.



図-3 PC 鋼材箇所輝度値差と透過 X 線強度の関係

表-2 鋼材箇所における線減衰係数

