

非破壊検査を用いた RC 床版の疲労寿命の簡易劣化予測の研究

Study on deterioration prediction of the fatigue life of the RC slab using a non-destructive inspection

北見工業大学大学院	○学生員	高橋広平 (Kohei Takahashi)
北見工業大学	正 員	三上修一 (Shuichi Mikami)
北見工業大学	正 員	山崎智之 (Tomoyuki Yamazaki)
北見工業大学	正 員	井上真澄 (Masumi Inoue)

1. はじめに

我が国に架設されている橋梁の多くは、高度経済成長期に架けられ、それらは供用開始から 50 年程度経過する。現在では、インフラ長寿命化計画が進められており、維持管理の重要性が高まっている。そこで、維持・修繕による橋梁の長寿命化が求められるが、定量的かつ効率的に行う方法は確立されていない。これまで、松井氏の提案式¹⁾により床版の疲労寿命を用いて橋梁の余寿命を算出し維持・修繕に役立てる研究が行われており、筆者ら²⁾は、供用中の橋梁に対して非破壊検査を用いた床版の簡易劣化予測を行ってきた。しかし、その手法の特性上測定誤差に起因して疲労寿命の推定に差が生じる結果となった。

そこで本研究では、非破壊検査の測定精度を検証し、床版の簡易劣化予測における非破壊検査で得られたコンクリートの圧縮強度等の諸元が床版の疲労寿命に与える影響について検討を行った。

2. 床版の疲労寿命の算出方法

既往の研究により、RC 床版の輪荷重走行試験の結果に基づいた式¹⁾を床版の疲労寿命予測に用いる。

$$\log(P/P_{sx}) = \alpha \cdot \log N + \log 1.520 \quad (1)$$

$$P_{sx} = 2B(f_v \cdot x_m + f_t \cdot C_m) \quad (2)$$

ここで、

P : 輪荷重 (kN)

P_{sx} : 梁状化した RC 床版の押し抜きせん断耐力 (kN)

α : S-N 曲線の傾き (異形 : -0.07835²⁾, 丸鋼 : -0.09121³⁾)

N : 終局状態の繰返し回数

B : 梁状化したときの梁幅 (mm)

f_v : 最大せん断応力度 (N/mm²), $f_v = 0.656 \cdot f'_c{}^{0.606}$

f'_c : コンクリートの圧縮強度 (N/mm²)

x_m : 引張側コンクリートを無視したときの中立軸までの深さ (mm)

f_t : 最大引張応力度 (N/mm²), $f_t = 0.269 \cdot f'_c{}^{2/3}$

C_m : 主鉄筋のかぶり厚さ (mm)

床版の疲労寿命は式(1)の N を年間の交通量で除すことにより求められる。

3. 疲労寿命算出の影響因子

式(2)による床版の疲労寿命算出では、コンクリートの圧縮強度や中立軸深さ、かぶり厚などが影響する。これらの影響因子は設計図書や実測値がない場合が多く、非破壊検査によりデータを取得しなければならない。

3.1 圧縮強度推定

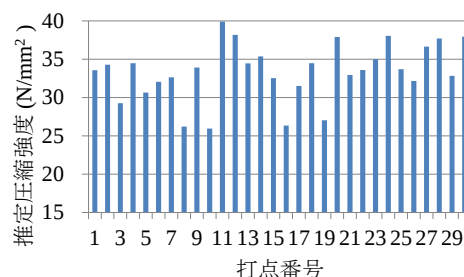


図-1 A 橋の推定圧縮強度

式(2)の f_v および f_t を求めるためには非破壊検査による測定が簡易的である。コンクリートの圧縮強度はテストハンマー強度の試験方法や機械インピーダンス法⁴⁾によって求める。機械インピーダンス法は、加速度計が内蔵されたハンマーでコンクリートの表面を打撃することで、圧縮強度を推定する方法である。既往の報告によると、機械インピーダンス法を用いた圧縮強度の推定では小径コアによる圧縮試験に比べ±15%程度の測定誤差が生じるとされている⁴⁾。またテストハンマー強度による測定精度は土木学会基準(JSCE-G 504-2013)によると標準円柱供試体の圧縮強度と±50%程度の誤差があることも知られている。

本研究では、機械インピーダンス法によって実橋の測定結果について検討する。

3.2 配筋の推定

配筋状態や床版厚は建設当初の設計図がある場合については容易に確認できる。しかし、供用年が古い市道橋等では図面が残っていない場合があり、この場合は電磁波レーダー法によりコンクリート内部の配筋状態(鉄筋間隔、かぶり厚、鉄筋径)を推定する方法がある。また、かぶり厚測定値の比誘電率補正などを行って測定精度の補正を必要とする。

4. 簡易測定項目の測定誤差

4.1 コンクリートの圧縮強度

A 橋での測定結果により検討を行う。A 橋は 1980 年に供用が開始された、橋長 24.5m の単純支持鋼鈑桁橋であり、適用示方書は昭和 47 年道路橋示方書である。ここで A 橋において機械インピーダンス法により求めた圧縮強度を図-1 に示す。これは床版下面にて橋軸方向に計 30 の打撃点数で測定区間長は 90cm である。1 打点あたり 25 回の打撃を行った結果の平均値で、横軸は打点番号、縦軸は推定圧縮強度である。打点間での圧縮

強度のばらつきが大きく、これは床版内部の骨材等に影響している。また、1 打点毎の変動係数は 0.04-0.11 で全体での変動係数は 0.11 であった。

4.2 配筋状態

B 橋は 1963 年に供用が開始された橋長 59.9m、鉄筋コンクリート床版厚 170mm、アスファルト舗装厚 50mm の単純鋼溶接合成 I 桁橋であり、2014 年に架け替えに伴い床版を切り出した(B 橋)。この床版を用いて検討する。適用示方書は昭和 31 年鋼道路橋設計示方書である。切り出した床版において主鉄筋および配力鉄筋を電磁波レーダー法により解析した結果を図-2(a)に示す。実際の配筋(図-2(b))は断面観察により位置を確認できる。配筋状態およびかぶり厚は概ね良好に推定できた。また、図-2(b)に示す鉄筋(1-5)で走査線①、②による鉄筋間隔の推定結果を表-1 に示す。実測値と比べると差が大きい部分も存在する。

そこで、配筋図のある供用中の橋梁(C 橋)について同様にデータを取得し配筋図と比較した。

C 橋は 1996 年に供用を開始された橋長 80m、鉄筋コンクリート床版厚 220mm、アスファルト舗装厚 80mm の単純鋼溶接合成 I 桁橋である。また、配筋状態ならびに電磁波レーダー法を用いた非破壊検査での測定結果を表-2 に示す。この結果から、アスファルト舗装の上面からでも配筋間隔に関しては概ね推定可能だと言える。

5. 床版の疲労寿命の算出結果

B 橋および C 橋において式(1)に基づき疲労寿命を算出し、その結果を以下に示す。B 橋は架け替えにより役目を終えた橋梁から床版サンプルを得た。C 橋は供用中の橋梁である。なお、交通量に関して B 橋は交通センサデータを参照し、C 橋は終局状態の繰返し回数を用いて比較する。

5.1 B 橋の疲労寿命

ここでは、一方向のひび割れから遊離石灰が生じる供試体のうち凍害劣化が著しい供試体 1 と劣化の少ない供試体 2 を使用する。なお、これらの供試体は寸法が小さく、電磁波レーダー法による有効なデータ点数が少ないため、鉄筋間隔およびかぶり厚は実測データを用いる。

交通センサデータによると、平成 11 年は平日に 3168 台、休日に 3375 台、大型車混入率は 26.7%となる。また、平成 17 年は平日に 2944 台、休日に 2971 台、大型車混入率は 21.5%となる。これらを参考に日平均交通量は 3000 台、大型車混入率は 24.0%として疲労寿命を算出する。圧縮強度に関しては、床版下面において鉄筋を避けた部分で測定し供試体 1 では 35 打点で推定圧縮強度平均は 41.65N/mm^2 、供試体 2 では 40 打点で推定圧縮強度平均は 29.46N/mm^2 となる。また床版厚は 170mm で、鉄筋間隔は平均をとると引張側：99.3mm、圧縮側：201.2mm である。

以上を基に疲労寿命を算出すると、供試体 1 では 49 年($P_{sx}=342.91\text{kN}$)、供試体 2 では 5 年($P_{sx}=279.69\text{kN}$)と算出された。ここで、参考文献 5) に従い P_{sx} の補正係数

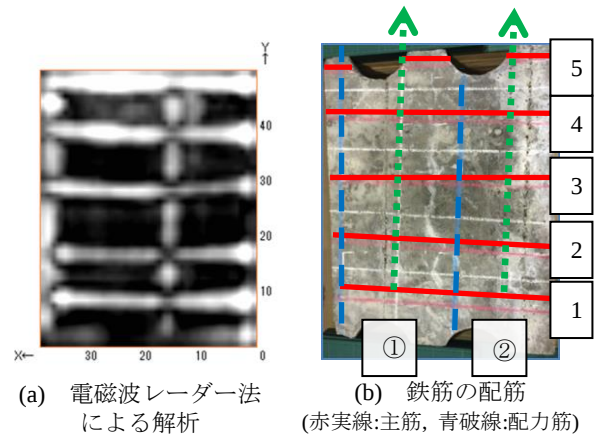


図-2 B 橋の配筋状態

表-1 B 橋における非破壊検査と実測による鉄筋間隔(mm)

	1-2 間	2-3 間	3-4 間	4-5 間
走査線①	97.5	67.5	125	140
走査線②	97.5	72.5	122.5	130
実測値	82.5	64	127	114.5

表-2 C 橋の諸元

		図面の配筋	非破壊検査による鉄筋間隔
主鉄筋 (mm)	圧縮側	D19@250	250.6
	引張側	D19@125	126.1
配力鉄筋 (mm)	圧縮側	D16@250	244
	引張側	D16@125	123.9

1.25 を乗じると、供試体 1 では 566 年($P_{sx}=428.64\text{kN}$)、供試体 2 では 60 年($P_{sx}=349.62\text{kN}$)となった。本橋梁は架け替えが行われた橋梁であり、ひび割れ密度は供試体 1 で 5.88m/m^2 、供試体 2 で 3.34m/m^2 であることを考慮すると、この算出結果は妥当ではないと考えられる。

5.2 C 橋の疲労寿命

ここでは、コンクリートの圧縮強度を設計基準強度である 24N/mm^2 を用い、疲労寿命は交通量の影響を受けない終局状態の繰返し回数で比較する。電磁波レーダー法によるコンクリートの比誘電率補正は参考文献 6) に従い独立行政法人 土木研究所の VBA により行った。

図面の鉄筋配置を用いた寿命は設計値である、かぶり厚 40mm として、式(2)より押抜きせん断耐力は 349.67kN となり、式(1)より終局状態の繰返し回数は 3.847×10^8 となる。

電磁波レーダー法で比誘電率を 8.0 とした場合のかぶり厚は 31.6mm と測定され、押抜きせん断耐力は 326.96kN 、終局状態の繰返し回数は 1.590×10^8 となる。図面の値を参照した場合と比較すると、押抜きせん断耐力は約 94%、終局状態の繰返し回数は約 42%となる。

比誘電率について土木研究所の補正をした場合かぶり厚は 38.3mm と補正され、押抜きせん断耐力は 344.35kN 、終局状態の繰返し回数は 3.162×10^8 となる。図面の値を参照した場合と比較すると、押抜きせん断耐力は約 98%、終局状態の繰返し回数は約 82%となる。

6. 影響因子が疲労寿命に及ぼす影響

圧縮強度ならびに床版厚、使用鉄筋が床版の疲労寿命に与える影響を検討するため、B 橋の諸元を参考に床版の床版厚および圧縮強度を変化させ式(1)、(2)により算出される疲労寿命に与える影響を検討した。

床版におけるかぶり厚は 40mm、主鉄筋径 19mm、配筋間隔 100mm、配力鉄筋径 16mm とし、圧縮側の主鉄筋は引張側の 1/2 の配筋量とする。床版厚は 180-200mm の範囲で 10mm 刻みに、圧縮強度は 20-30N/mm² の範囲で 1N/mm² 刻みに変化させ、鉄筋の配筋状態を変えずに、使用鉄筋のみを変化させた。

その結果、床版の疲労寿命は、圧縮強度が 3N/mm² 大きくなると、約 210%程度に、床版厚が 10mm 減少すると約 45%程度となった。実橋梁への適用を考えると、圧縮強度は破壊試験を用いてもばらつきを生じ、非破壊検査ではさらにばらつきを持つ。そのため、簡便でかつ床版に損傷を与えない非破壊検査を適用する際は、測定誤差の影響が大きいため注意が必要であると言える。

圧縮強度および床版厚、使用鉄筋を変化させたときの疲労寿命を図-3 に示す。丸鋼鉄筋と異形鉄筋とで比較すると、使用鉄筋以外の条件が同一の場合でも、丸鋼鉄筋の寿命は異形鉄筋の 4~10%程度と耐久性の面で劣る結果となった。これは、丸鋼鉄筋を用いた床版では異形に比べ鉄筋の付着力が減少し、繰返し荷重に対して十分な耐久性を持たないためと考えられる。そのため、使用鉄筋や適用示方書を事前に把握することが必要である。

全体の傾向としては床版厚が薄くかつ圧縮強度が小さいほど異形・丸鋼間での差は小さく、床版厚および圧縮強度の増加に伴い異形の疲労寿命は増加の傾向が顕著に表れる。そのため、圧縮強度が大きい場合は異形・丸鋼間での差が広がる結果となった。

7. 考察

B 橋の疲労寿命は押抜きせん断耐力 P_{sx} の補正を行うと供試体 1 では 566 年、供試体 2 では 60 年となった。床版下面に着目すると一方向性のひび割れが生じ、遊離石灰が確認され、ひび割れ密度は供試体 1 で 5.88m/m²、供試体 2 で 3.34 m/m²であることを考慮すると、供試体 1、2 共に健全度ランクⅡの潜伏期⁷⁾であると推察される。また、ひび割れ密度は 6 m/m² を超えると進展期に移行する。供試体 1 ではコンクリートの推定圧縮強度が高いことにより疲労寿命が長く算出されたと考えられる。また、供試体 1 は凍害劣化による圧縮側コンクリートの減少が顕著であり圧縮側のコンクリートが力学的に機能していないことを考慮すれば算出結果よりも非常に早く終局を迎えると考えられる。ここで、圧縮側のコンクリート厚を 0mm とすれば疲労寿命は 22 年と算出される。このことから、実際は凍害劣化により段階的にコンクリート厚が減少しそれに伴い疲労寿命も徐々に減少したと推察される。

C 橋の終局状態の繰返し回数は図面の値を用いた場合 3.847×10^8 回、鉄筋に関して非破壊検査を用いた場合 1.590×10^8 回(図面参照の約 42%)、さらに比誘電率補正

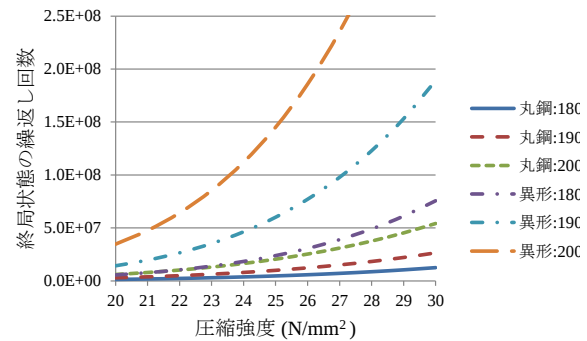


図-3 種々の条件における疲労寿命

を行った場合 3.162×10^8 回(図面参照の約 82%)と算出された。このことから、非破壊試験を用いた場合で鉄筋に関しては比誘電率補正を用いることで疲労寿命予測の精度向上が図れる。鉄筋間隔に関しては図面と非破壊検査で同等の値を得たため、かぶり厚の測定結果によるものと推定される。図面のかぶり厚は 40mm、非破壊検査における比誘電率補正なしの場合 31.6mm、補正後の場合 38.3mm となる。これは、式(2)においてかぶり厚が 5mm 減少すると終局状態の繰返し回数が 64%程度に減少することによる影響だと考えられる。

8. まとめ

本論文では、非破壊検査を用いた場合に床版の疲労寿命予測に及ぼす影響を検討した。その結果を以下に示す。

- (1)非破壊検査によって疲労寿命予測が可能である。
- (2)目視の点検結果やひび割れ密度などから判断される床版の健全度ランクと疲労寿命を比較検討した。
- (3)比誘電率の補正と劣化予測の関係を検討した。

【参考文献】

- 1) 松井繁之：道路橋床版 設計と維持管理，森北出版株式会社，pp.47-55，2007。
- 2) 高橋広平，三上修一，山崎智之，井上真澄：非破壊検査を用いた RC 床版における疲労寿命の簡易予測，土木学会第 70 回年次学術講演会，I-403，pp.805-806，2015。
- 3) 赤代恵司，三田村浩，渡辺忠朋，岸徳光：丸鋼鉄筋を用いた RC 床版の疲労特性に関する実験的研究，構造工学論文集 Vol.57A，pp.1297-1304，2011。
- 4) 土木研究所，日本非破壊検査協会：非破壊・微破壊試験によるコンクリート構造物の検査・点検マニュアル，pp.148-153，2010。
- 5) 国土交通省大臣官房技術調査課：非破壊試験によるコンクリート構造物中の配筋状態及びかぶり測定要領，pp.8-10，2012。
- 6) 独立行政法人 土木研究所：電磁波レーダ法による比誘電率分布（鉄筋径を用いる方法）およびかぶりの求め方。
- 7) 玉越隆史，大久保雅憲，渡辺陽太：道路橋の計画管理に関する調査研究，p.44，pp.50-58，国総研資料，第 523 号。