

層状ひび割れのあるコンクリートの力学的特性について

Mechanical characteristics of concrete with layered cracks

北海道大学工学部環境社会工学科 ○学生員 松田有加 (Yuka Matsuda)
(国研)土木研究所 寒地土木研究所 正会員 角間 恒 (Ko Kakuma)
北海道大学大学院工学研究院 正会員 松本高志 (Takashi Matsumoto)
(国研)土木研究所 寒地土木研究所 正会員 西 弘明 (Hiroaki Nishi)

1. まえがき

寒冷地では、凍害による橋梁の劣化が顕著であり、北海道で平成 18 年度に行われた橋梁点検結果によると、695 橋のうち約 17.3%に凍害劣化または凍害との複合劣化が認められた¹⁾。凍害に対する評価方法、修繕方法の確立が求められるなか、特に凍結融解により発生する層状ひび割れをもつ床版の特性については、いまだ十分に明確にされていない。

本研究では、供用後の橋梁床版から切り出した試験体を用いて、層状ひび割れのあるコンクリートの超音波伝播速度および圧縮強度の測定を行う。そしてその結果より、超音波伝播速度を用いて圧縮強度を推定する方法について検討する。

2. 試験方法

2.1 対象橋梁

北海道内で 46 年供用された後に撤去された床版を対象とした。表－1 に橋梁諸元を、図－1 に橋梁一般図を、写真－1 に本研究で対象とする箇所における床版下面の状況を示す。本床版では、凍害とアルカリシリカ反応による複合劣化が進行していたことが確認されている²⁾。写真－2 には撤去床版切断面における層状ひび割れの状況を示しており、最も下方にあるもので上側鉄筋と下側鉄筋の中間辺りの深さに位置していた。

2.2 超音波伝播速度および圧縮強度の測定

(1) 試験体種類

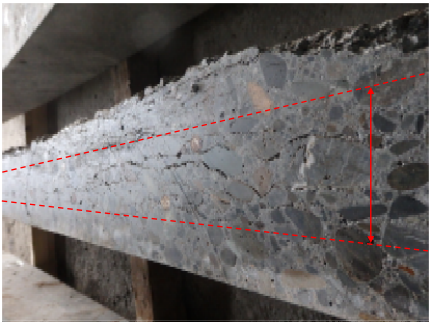
本研究では、上記の床版から採取した円柱形状および立方体形状のコンクリート試験体を使用する。円柱試験体の採取方向は床版厚さ方向（以下、鉛直方向）と床版面内方向（以下、水平方向）の 2 種類とした。水平方向に採取する円柱試験体および立方体試験体は、上側鉄筋と下側鉄筋の中間部（写真－2 中の赤色矢印）の層状ひ

表－1 橋梁諸元

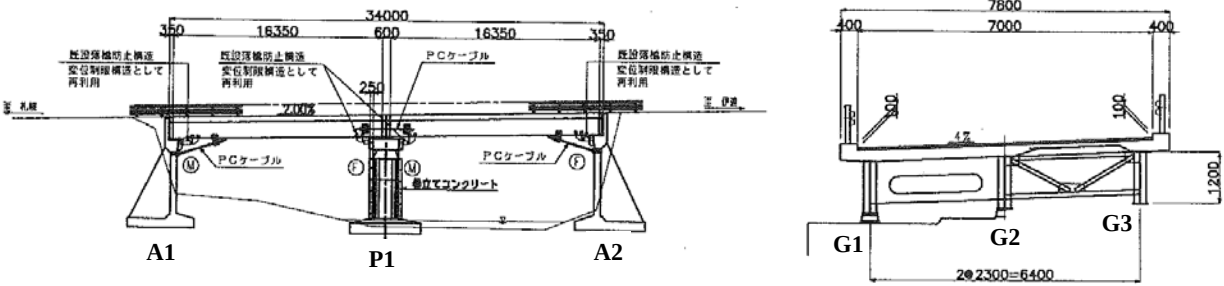
凍害危険度	3
大型車交通量	192 台／日（上下合計）
架設年次	昭和 46 年
適用基準	昭和 39 年鋼道路橋設計示方書
上部構造形式	2 径間単純合成鈑桁橋
橋長、幅員	34.0m, 8.20m



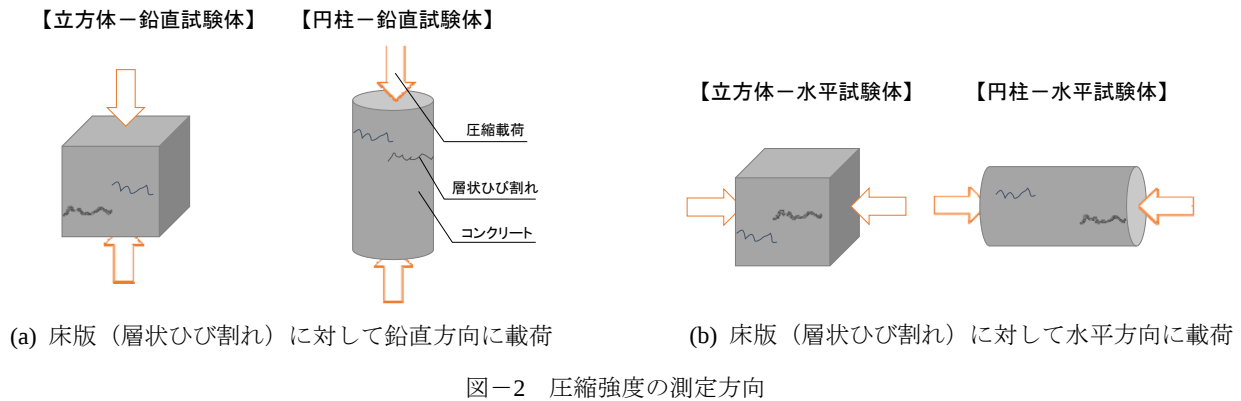
写真－1 床版下面の状況



写真－2 層状ひび割れの発生状況



図－1 橋梁一般図



ひび割れを多く含む部分から採取している。また、層状ひび割れの発生していない箇所からも鉛直方向に円柱試験体を取り出して試験を実施することで、圧縮強度に与える層状ひび割れの影響を確認できるようにした。

円柱試験体の寸法は、径 50mm および 73mm の 2 種類である。高さは径の 2 倍を基本としたが、一部では 2 倍に満たないものがあった。立方体試験体の寸法は一辺 50mm、60mm、80mm の 3 種類である。円柱試験体は鉄筋を避けた上で、できるだけ大きな径で採取したため、寸法は 2 種類となっている。立方体試験体も同様の理由で 3 種類の寸法があり、試験体の形状を円柱のみとしなかったのは、立方体の方が分離しにくく、効率的に採取できるためである。

(2) 超音波伝播速度の測定方法

採取した試験体について、透過法による超音波伝播速度の測定を実施した。透過方向は、後述する圧縮強度試験における荷重方向を基本とし、立方体試験および一部の円柱試験体については、荷重直角方向にも測定を実施した。

(3) 圧縮・静弾性係数試験方法

圧縮強度および静弾性係数の測定は、「コンクリートの静弾性係数試験方法（JIS A 1149）」に準拠（あるいは参考に）して行った。なお、立方体試験体の圧縮強度については、既往の研究³⁾を参考に、測定値に 0.8 を乗ずることで円柱試験体の値に補正した。

床版においてコンクリートの力学的特性を調査する場合、床版鉛直方向（層状ひび割れに対して直角方向）の特性を対象とすることがほとんどであるが、耐荷性能評価の観点ではむしろ床版水平方向（層状ひび割れに対して平行方向）の特性が重要であると考えられる。そこで、本研究では、通常の床版鉛直方向への圧縮・静弾性係数試験（以下、圧縮試験）だけでなく、床版水平方向に荷重する場合についても試験を実施した。図-2 には、圧縮強度の測定方向を示す。以下では、試験体形状や荷重方法の違いを区別する表記法として、試験体名に「形状－床版（層状ひび割れ）に対する荷重方向」試験体という呼称を用いる。例えば、「円柱－水平試験体」は水平方向に採取した円柱試験体に対して床版水平方向に圧縮試験を実施したことを、「立方体－鉛直試験体」は立方体試験体に対して床版鉛直方向に圧縮試験を実施したことを意味する。

表-2 超音波伝播速度とコンクリートの品質

超音波伝播速度 (m/s)	コンクリートの品質	試験体数	
		床版水平	床版鉛直
4,600 以上	優	2	1
3,700～4,600	良	4	4
3,100～3,700	やや良	0	7
2,100～3,100	不良	6	2
2,100 以下	不可	7	1
合計		19	15

3. 試験結果

3.1 超音波伝播速度

JCI 基準集⁴⁾による超音波伝播速度によるコンクリートの品質評価基準、またそれにより区分した試験体の数を表-2 に示す。「やや良」以下の評価となった試験体が過半数を占め、コンクリートの劣化が進行していることを表している。

3.2 圧縮強度および静弾性係数

図-3 に円柱試験体に関する静弾性係数と圧縮強度との関係を示す。図中の二点差線は、コンクリート標準示方書⁵⁾（以下、示方書）による健全なコンクリートにおける静弾性係数と圧縮強度の関係を示したものである。また、破線で囲った 2 体は健全部から採取した試験体の結果である。

図より、層状ひび割れに対して直角方向に荷重を行った円柱－鉛直試験体では、健全部での結果と比較して静弾性係数および圧縮強度が低下し、示方書での関係と比較しても静弾性係数が著しく低下していることがわかる。このような結果は、凍結融解試験に供した試験体⁶⁾にもみられる凍害を受けたコンクリートの一般的な特性と言える。

一方、層状ひび割れに対して平行方向に荷重を行った円柱－水平試験体では、1 体を除いて静弾性係数と圧縮強度の関係が示方書における関係に概ね一致し、健全部から採取した試験体から得られた結果と比較した場合には、圧縮強度が 40～60%程度に低下する結果であった。この結果は、静弾性係数の著しい低下が見られた鉛直試験体での試験結果および既往の研究とは異なるものであり、圧縮強度を層状ひび割れに対して鉛直方向に測定する場合と水平方向に測定する場合で、得られる力学的特

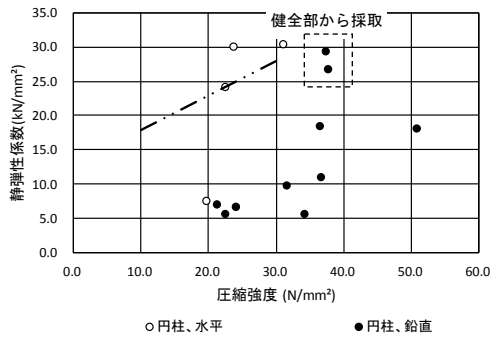
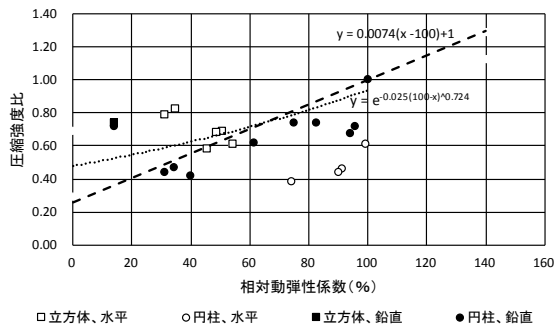
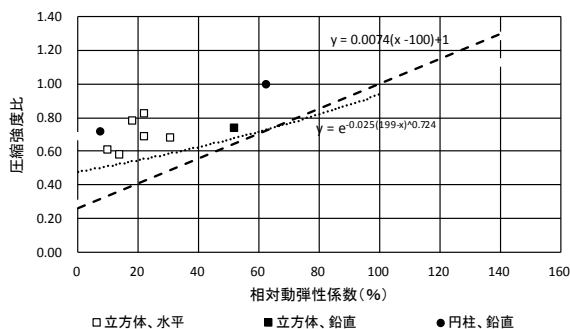


図-3 静弾性係数と圧縮強度



(a) 荷重方向の相対動弾性係数による整理



(b) 荷重直角方向の相対動弾性係数による整理

図-4 圧縮強度比と相対動弾性係数との関係

性が大きく異なることを意味する。なお、円柱一水平試験体のうち1体では静弾性係数の低下が見られたが、この試験体では下面から進展した曲げひび割れが試験体の軸直角方向に貫通しており、その影響を受けていたと考えられる。

3.3 超音波伝播速度による圧縮強度の推定

既往の研究より、コンクリートの圧縮強度と相対動弾性係数には相関関係があることが分かっている⁶⁾。本研究においては、超音波伝播速度から算出した相対動弾性係数と圧縮強度比との関係を整理し、これまでに提案された圧縮強度低下の推定式の層状ひび割れコンクリートへの適用性を検討した。

(1) 相対動弾性係数および強度比

相対動弾性係数および圧縮強度比は、式(1)および式(2)により定義する。

$$E = V_{Ln}^2 / V_{L0}^2 \times 100 \quad (1)$$

$$R_c = f_n / f_0 \quad (2)$$

ここで、 E ：相対動弾性係数（%）、 V_{Ln} ：超音波伝播速度、 V_{L0} ：超音波伝播速度基準値、 R_c ：圧縮強度比、 f_n ：圧縮強度、 f_0 ：圧縮強度基準値である。超音波伝播速度基準値および圧縮強度基準値には、供用開始前の健全状態での測定値を用いるべきであるが、それらのデータを得ることは困難である。そのため、本研究では、得られた超音波伝播速度（各試験体の最大値）と圧縮強度のそれぞれの最大値を基準値とした。

また、文献7においては、「縦断方向における超音波伝播速度の測定が不可能である場合、それに対して直角方向における超音波伝播速度の最小値を用いることで、耐凍結融解特性の評価が行える」としており、本研究においても、複数箇所を測定している試験体については、最小値を用いることとした。

(2) 既往の推定式

式(3)⁸⁾ および式(4)⁹⁾に、既往の研究により導出された圧縮強度比と相対動弾性係数との関係式を示す。

$$R_c = \exp\{-0.025(100 - E)^{0.724}\} \quad (3)$$

$$R_c = 0.0074(E - 100) + 1 \quad (4)$$

式(3)は、径 100mm×高さ 200mm の円柱試験体を凍結融解試験に供し、相対動弾性係数と圧縮強度の関係を調査したものである。相対動弾性係数は超音波伝播速度から算出されており、超音波伝播速度の測定方向は荷重方向と同方向である。

式(4)は、凍害を受けた RC 開水路側壁から径 100mm×高さ 200mm の円柱試験体を採用し、試験を行っている。また、相対動弾性係数を得るための超音波伝播速度は荷重方向に測定されていた。なお、この研究では開水路側壁から採取したコアの他に、試験室内で製作し凍結融解試験に供した試験体および既往の研究で使われたデータを基にしてこの式を導出している。

(3) 荷重方向の相対動弾性係数による整理

図-4(a)に、圧縮荷重方向に超音波伝播速度を測定した場合に関する、圧縮強度比と相対動弾性係数の関係を示す。

図より、円柱一鉛直試験体に関しては、相対動弾性係数の低下に伴い圧縮強度が線形的に低下する傾向は既往の研究と一致する。このことから、層状ひび割れ直角方向の相対動弾性係数を測定することで、層状ひび割れ直角方向の圧縮強度低下を推定できる可能性が高い。ただし、既往の式と比較すると、相対動弾性係数が同程度のとき、本試験結果において圧縮強度を小さく見積もる結果となっている。これは、既往の研究と本研究とで測定した相対動弾性係数の持つ意味合いが異なることに起因する。既往の研究では凍結融解試験により一様に劣化した試験体を使用しているが、本研究で対象とした実橋から採取した試験体では、一つの試験体の中でも深さ方向に劣化程度が大きく異なる。つまり、本研究では、劣化が分布する試験体に対する平均的な相対動弾性係数を測定したに過ぎず、劣化程度が小さい部位での超音波伝播の影響を受けて相対動弾性係数が大きめに測定されやすくなるためであると考えられる。

また、層状ひび割れに対して水平方向に荷重した場合、

圧縮強度比と相対動弾性係数に相関関係はなく、相対動弾性係数によらず圧縮強度比 0.4～0.8 の範囲に分布する結果となった。

以上より、既往の研究で提案されている相対動弾性係数に基づく圧縮強度低下の推定式は、層状ひび割れに対する方向によって適用性が異なり、層状ひび割れに平行方向の強度推定には適用が困難であると言える。

(4) 載荷直角方向の相対動弾性係数による整理

図-4(b)に、圧縮載荷方向に対して直角方向に超音波伝播速度を測定した場合に関する、圧縮強度比と相対動弾性係数の関係を示す。図より、サンプル数は少ないものの、載荷方向によらず圧縮強度比と相対動弾性係数には線形の関係が成立する傾向があり、載荷直角方向の相対動弾性係数により圧縮強度を推定できる可能性がある。

なお、本試験結果と既往の式を比較すると、多くの試験体が既往の式を上回っているが、これは立方体試験体で得られた圧縮強度を円柱試験体に補正するための係数に起因していると考えている。本研究では、型枠を用いて製作した試験体の圧縮試験から得られている補正係数 0.8 を採用したが、構造物から切り出した試験体に対する適用性は現段階で不明である。したがって、既往の強度低下推定式の妥当性については、今後詳細な検討を要する。

4. まとめ

本研究から得られた主な結果を以下にまとめる。

- 1) 床版鉛直方向（層状ひび割れ直角方向）に圧縮試験を実施した結果、凍結融解作用を与えたコンクリートを使用した試験で得られるような静弾性係数の著しい低下が見られた。
- 2) 床版水平方向（層状ひび割れ平行方向）に圧縮試験を実施した結果、静弾性係数が低下することなく圧縮強度が健全時の 40～60%に低下した。1)の結果を併せると、層状ひび割れのあるコンクリートでは、層状ひび割れ鉛直方向と水平方向とで力学的特性が大きく異なることが示唆される。
- 3) 床版鉛直方向の相対動弾性係数によって、層状ひび割れによる床版鉛直方向の圧縮強度低下を推定できる可能性がある。
- 4) 層状ひび割れのあるコンクリートでは、載荷方向によらず、載荷直角方向の相対動弾性係数によって圧縮強度の低下を推定できる可能性がある。

本研究で得た結果は、1 橋のみを対象とし、またサンプル数も少ない。今後は、劣化程度の異なる部位や他の橋梁から採取した試験体に対しても同様の試験を実施する。これにより、データの充実を図り、本研究で得られた知見の妥当性を検証する予定である。

謝辞

本研究を実施するにあたり、(一社)施工技術総合研究所・渡邊晋也氏には多大なるご協力をいただきました。ここに付記し、謝意を表します。

参考文献

- 1) 花田眞吉、杉山隆文、馬場道隆：積雪寒冷地におけるコンクリート構造物の複合劣化要因に関する調査報告—橋梁点検—、プレストレスとコンクリート技術協会第 20 回シンポジウム論文集、283-286、2011.
- 2) 角間恒、佐藤孝司、渡邊晋也、谷倉泉：凍害・ASR による複合劣化が生じた RC 床版の調査事例、第 9 回道路橋床版シンポジウム論文報告集、pp.37-40、2016.
- 3) A.M. Neville：ネビルのコンクリートの特性、技報堂出版、1979.
- 4) 日本コンクリート工学協会、JCI 基準集、2004.
- 5) 土木学会：2012 年制定 コンクリート標準示方書〔設計編〕、2012.
- 6) 日本コンクリート工学協会、コンクリートの凍結融解抵抗性の評価方法に関する研究委員会報告書、2008.
- 7) 高田龍一、郭世文、緒方英彦、服部九二雄：超音波法によるコンクリートの耐凍結融解性能評価に関する検討、コンクリート工学年次論文集、Vol.26、No.1、pp.1911-1916、2004.
- 8) 野口博章、満木泰郎、溝渕利明、山田啓介：凍結融解作用を受けるコンクリートの劣化深度評価に関する基礎的研究、土木学会論文集 E、Vol.62、No.3、pp.592-605、2006.
- 9) 周藤将司、緒方英彦、石神暁郎、佐藤智：凍害劣化の生じたコンクリートの力学的特性および現地非破壊試験による動弾性係数の評価法に関する研究、農業農村工学論文集、Vol.84、No.3、pp.I291-I299、2016.