

論文

寒冷地特有の損傷が進行した床版の耐力低下に関する数値解析

角間恒*, 仁平陽一郎**, 蛭子恭好***, 三浦之裕***, 畠山乃***

*博(工), 寒地土木研究所, 寒地構造チーム (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目 1-34)

**国土交通省北海道開発局, 開発連携推進課 (〒060-0851 札幌市北区北 8 条西 2 丁目)

***寒地土木研究所, 寒地構造チーム (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目 1-34)

本稿は、寒冷地の RC 床版を対象に、凍害に起因するコンクリートの層状ひび割れが耐力低下に及ぼす影響を数値解析的に検討したものである。解析に当たっては、上面から深さ方向への層状ひび割れの発生範囲に加えて床版の設計年次および砂利化の発生深さをパラメータにしており、床版の諸元および損傷状態に応じた耐力低下を定量的に評価した。

キーワード：RC 床版, 寒冷地, 耐力低下, 数値解析

1. はじめに

寒冷地の道路橋 RC 床版（以下、床版）では、コンクリートの凍害に起因する層状ひび割れ（写真-1）の発生および進行が顕在化している¹⁾。維持管理の実務において、層状ひび割れは上面の砂利化に並ぶ重要な調査項目に位置付けられているが、その発生が床版の健全度に及ぼす影響は必ずしも明確になっていない。そのため、調査で得た情報が対策の優先順位付けや緊急性の判断に的確に反映されていない可能性がある。

著者らはこれまでに、層状ひび割れが発生した床版の力学挙動を明らかにすることを目的に、実橋床版から切り出した部材や模擬的な損傷を導入した部材の各種載荷試験を実施してきた^{2)~4)}。これらによると、力学挙動の評価に当たっては、層状ひび割れがコンクリートの力学性能に加えて鉄筋-コンクリート間の付着性能の低下をもたらすこと、昭和 40 年代中頃に境に使用頻度が大きく異なる鉄筋種類（丸鋼鉄筋および異形鉄筋）に応じた挙動評価が必要になることを指摘している。

本稿では、寒冷地における床版の健全度評価の体系化に向けた一検討として、数値解析的アプローチにより層状ひび割れが発生した床版の耐力評価を試みた。解析は、昭和 39 年および昭和 48 年の設計基準に準ずる 2 種類の床版を対象に実施しており、層状ひび割れによる耐力低下度を床版の設計年次別に明らかにする。

2. 数値解析モデルの構築および検証

本研究における床版の耐力評価は、汎用非線形構造解析システム DIANA (ver 10.6) を使用した 3 次元有限要素解析により実施した。解析モデルは、著者らが実施した層状ひび割れを有する RC 部材の載荷試験^{2)~4)}を基に



写真-1 床版コンクリートの層状ひび割れ発生事例

構築しており、本章では、載荷試験および解析モデルの概要とともに、両者の比較により解析モデルの妥当性を検証した結果を示す。なお、本研究で参照する載荷試験の方法や結果の詳細は文献 2~4 を参照されたい。

2.1 層状ひび割れが発生した RC 部材の載荷試験

(1) 試験概要

a) 実橋床版から切り出した部材の載荷試験²⁾

本試験（以下、実橋試験）は、北海道内の一般国道橋の床版から切り出したはり試験体を用いて、上面から深さ方向への層状ひび割れの発生範囲が部材耐力に及ぼす影響を検証したものである。試験対象となった床版は昭和 39 年鋼道路橋設計示方書（以下、S39 基準）により設計されており、鉄筋には丸鋼鉄筋（SR24）が配置されている。試験体の切出しは昭和 40 年の供用開始から 49 年間の経過した時点で実施しており、試験前の調査では、床版コンクリートに凍害およびアルカリシリカ反応の複合劣化に起因する層状ひび割れが発生していることを確認している。

表-1 荷重試験ケース

試験体	試験種類	鉄筋	層状ひび割れ発生範囲* (mm)
R-R1	実橋試験	丸鋼鉄筋 (SR24)	80
R-R2			160
S-R0	模擬試験	丸鋼鉄筋 (SR235)	0
S-R1			80
S-R2			160
S-D0		異形鉄筋 (SD345)	0
S-D1			80
S-D2			160

※試験体表面の目視観察により確認した試験体上面から深さ方向への概ねの発生範囲

b) 模擬損傷を導入した部材の荷重試験^{3), 4)}

本試験（以下、模擬試験）は、層状ひび割れが発生した部材の力学挙動に及ぼす鉄筋種類の影響を検証したものである。試験体の損傷は、フレッシュ状態のベースコンクリートに酸化カルシウムを主成分とする静的破砕剤を添加し、コンクリート中の水との反応による膨張圧を利用して模擬的に導入したものであり、導入されたひび割れの性状や本手法を部材の耐荷性能評価に用いることの妥当性は、文献3で検証されている。

(2) 試験体

表-1 に試験ケースを、図-1 に試験概要を示す。両試験で試験体形状（長さ 1200mm、幅 200mm、高さ 160mm）は同一であり、試験体毎に層状ひび割れの発生状況および鉄筋種類が異なる。断面内には下側鉄筋（φ16 または D16）が 2 本、上側鉄筋（φ16 または D16）が 1 本または 2 本配置されている。健全部コンクリートの圧縮強度および静弾性係数は、実橋試験体で 39.8N/mm² および 28.7kN/mm²、模擬試験体で 34.9N/mm² および 24.9kN/mm² である。

図-2 に、目視観察によりスケッチした試験体の損傷状況を示す。実橋試験体および模擬試験体ともに、試験体表面には複数本の水平ひび割れが発生していたが、模擬試験体においてひび割れ間隔がやや広く、発生箇所に偏りが生じる傾向が見られていた。

(3) 荷重方法

荷重は支点間隔 1000mm、せん断スパン 350mm とする 4 点曲げ（図-1）により実施し、試験体が破壊に至るまで荷重を静的に漸増させている。試験中の計測項目は荷重、たわみ、鉄筋ひずみ、コンクリート表面ひずみであり、試験および解析の比較には荷重およびたわみを使用する。

2.2 数値解析方法

(1) 解析ケース

表-2 に解析ケースを示す。ここでは、表-1 の荷重試験ケースに対応する 6 ケースについて解析を行った。

(2) 要素分割

図-3 に要素分割図の例（C-R1, C-D1）を示す。本解

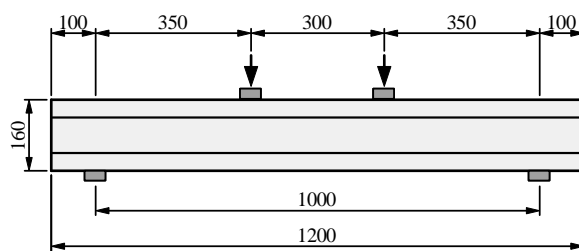
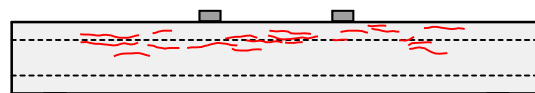


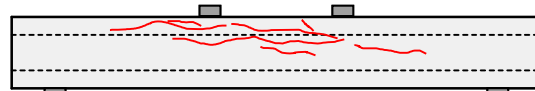
図-1 荷重試験の概要



(a) R-R1



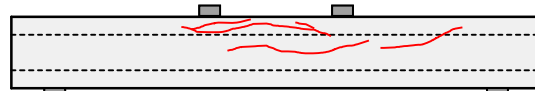
(b) R-R2



(c) S-R1



(d) S-R2



(e) S-D1



(f) S-D2

図-2 試験体の損傷状況

析では、試験体や荷重の対称性を考慮して 1/4 モデルを採用し、コンクリート、荷重鋼板、支点鋼板には 20 節点のソリッド要素を、鉄筋にはコンクリートとの間の付着すべりを考慮可能な埋込み鉄筋要素を使用した。試験体高さ方向は 5 層に等分割しており、C-R1 および C-D1 では上側 2 層、C-R2 および C-D2 では全 5 層で層状ひび割れの影響を考慮している。なお、解析に当たり、層状ひび割れが試験体軸方向に一樣に分布していると仮定した。また、C-R1 および C-D1 では、試験体の目視観察結果に対して層状ひび割れ発生範囲を浅く設定したが、予備解析により、発生範囲を 15mm 程度浅くすることによる解析結果への影響が小さいことを確認している。

(3) 材料モデル

a) コンクリート

コンクリートのひび割れモデルは固定ひび割れモデルとし、ひび割れ発生後の引張軟化挙動には Hordijk モ

表-2 解析ケース（はりの曲げ載荷）

ケース	鉄筋	層状ひび割れ発生範囲* (mm)	対応する試験ケース
C-R0	丸鋼鉄筋 (SR235)	0	S-R0
C-R1		64	R-R1, S-R1
C-R2		160	R-R2, S-R2
C-D0	異形鉄筋 (SD345)	0	S-D0
C-D1		64	S-D1
C-D2		160	S-D2

※上面から深さ方向への発生範囲

表-3 材料モデルの特性値

記号	単位	コンクリート		備考
		健全	損傷	
f'_c	N/mm ²	34.6	17.3	
ϵ'_{cm}	—	0.002	0.002	
G_{FC}	N/mm	51.8	36.6	文献 7
f_t	N/mm ²	2.45	1.54	文献 8
G_{FT}	N/mm	0.09	0.07	文献 8
$\tau_{max,d}$	N/mm ²	7.2	3.0	
$\tau_{max,r}$	N/mm ²	3.0	0.72	

【記号の説明】

コンクリート

 f'_c : 圧縮強度, ϵ'_{cm} : 圧縮強度時ひずみ, G_{FC} : 圧縮破壊エネルギー, f_t : 引張強度, G_{FT} : 引張破壊エネルギー

鉄筋-コンクリート間の付着すべり

 $\tau_{max,d}$: 異形鉄筋-コンクリート間の最大付着応力, $\tau_{max,r}$: 丸鋼鉄筋-コンクリート間の最大付着応力

デル⁹⁾を, ひび割れ面のせん断応力伝達には李・前川⁶⁾による接触密度関数モデルを採用した。圧縮挙動は, 圧縮強度までを放物線型, ポストピークを圧縮破壊エネルギーと要素寸法を考慮した線形の応力-ひずみ関係でモデル化とした。なお, 予備解析により, 鉄筋-コンクリート間の一体性を著しく低下させた場合に, 鉄筋定着部(埋込み鉄筋端部)のコンクリートに損傷が発生して解析が不安定になることを確認したことから, 支点より外側のコンクリートは線形弾性モデルとしている。

表-3 に, 解析時に入力した材料特性値をまとめる。健全部では, 圧縮強度をテストピースの圧縮試験に基づく 34.6N/mm²とし, 層状ひび割れが発生したコンクリートでは圧縮強度を健全部の 1/2 (17.3N/mm²) に減じた。これは, 文献 2 で実施した実橋試験体から採取したコンクリート試験片の圧縮試験において, 層状ひび割れに平行方向に計測した圧縮強度が健全部で計測した圧縮強度の 1/2 程度に分布したことに基づいている。

b) 鉄筋

鉄筋の応力-ひずみ関係は, 降伏後の剛性を弾性時の 1/100 とするバイリニア型でモデル化した。降伏応力は, 引張試験あるいはミルシートより, SR235 で 342N/mm², SD345 で 400N/mm²とした。

c) 鉄筋-コンクリート間の付着すべり

鉄筋-コンクリート間の付着すべり挙動には島らのモデル⁹⁾を採用し, コンクリートの状態および鉄筋種類の組合せに応じて最大付着応力を変化させた。表-3 に

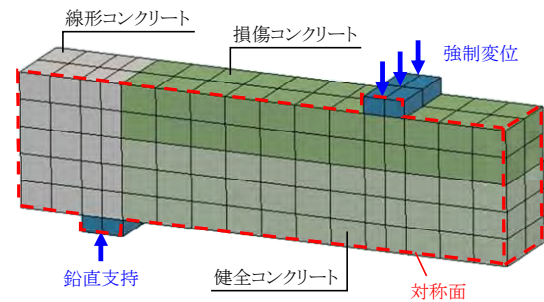
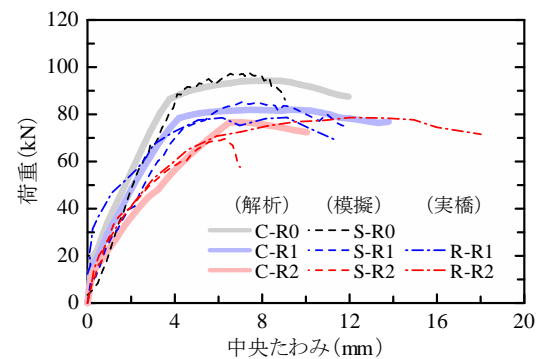
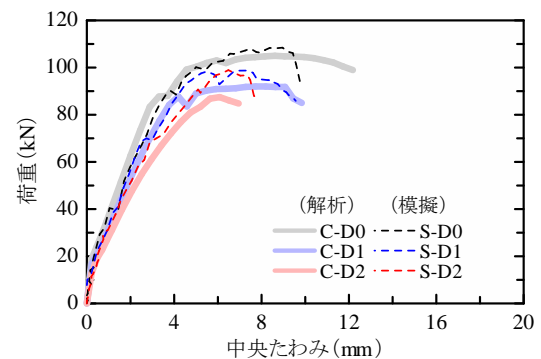


図-3 要素分割図の例 (C-R1, C-D1)



(a) 丸鋼鉄筋



(b) 異形鉄筋

図-4 荷重-中央たわみ関係の比較

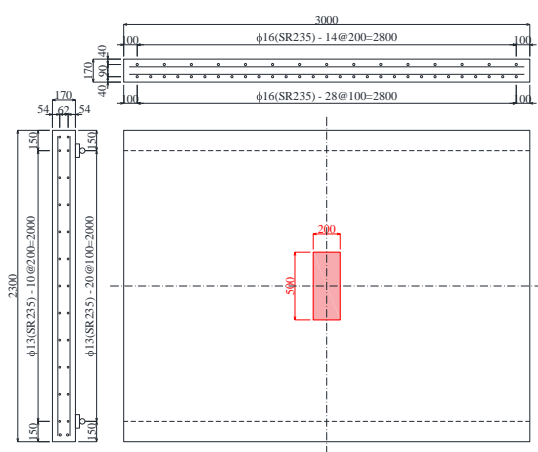
表-4 耐力の比較

ケース	耐力 (kN)		比 (解析/試験)
	解析	試験	
C-R0	94.2	97.8	0.96
C-R1	81.9	78.7~85.4	0.96~1.04
C-R2	76.6	69.6~78.6	0.97~1.10
C-D0	105.0	108.4	0.97
C-D1	92.0	98.8	0.93
C-D2	87.5	98.9	0.88

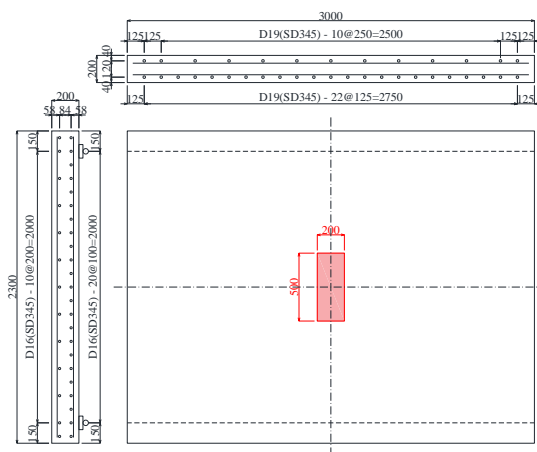
最大付着応力を示しており, 実橋試験体や模擬試験体を使用した鉄筋-コンクリート間の付着試験^{2,4)}を基に, 異形鉄筋-健全コンクリートで 7.2N/mm², 異形鉄筋-損傷コンクリートおよび丸鋼鉄筋-健全コンクリートで 3.0N/mm², 丸鋼鉄筋-損傷コンクリートで 0.72N/mm²とした。

2.3 解析結果

図-4 に試験および解析から得た荷重-中央たわみ関



(a) S39 モデル



(b) S48 モデル

図-5 解析対象とした床版

表-5 解析ケース

解析ケース※	モデル	砂利化 深さ (mm)	層状ひび割れ 発生範囲 (mm)
S39-00-0.0	S39	0	0
S39-00-0.4		0	68
S39-00-1.0		0	170
S39-20-0.0		20	0
S39-20-1.0		20	150
S39-40-0.0		40	0
S39-40-1.0		40	130
S48-00-0.0	S48	0	0
S48-00-0.4		0	80
S48-00-1.0		0	200
S48-20-0.0		20	0
S48-20-1.0		20	180
S48-40-0.0		40	0
S48-40-1.0		40	160

※解析ケースの最初の記号は床版モデル、2 番目の記号は上面かぶり厚の減少量（≒砂利化深さ）、3 番目の数字は床版厚に対する層状ひび割れ発生範囲（上面からの深さ）の比を表す。

係を示す。荷重試験では、鉄筋種類によらず層状ひび割れが発生している場合に耐力低下が生じたが、深さ方向への層状ひび割れの発生範囲の違いは最大荷重に大きく影響していない。ただし、発生範囲が試験体全厚に及ぶときには部材剛性の低下をもたらしており、文献4では、軸方向鉄筋のひずみ分布を基に、この部材剛性の低下が試験体全長に及ぶ鉄筋-コンクリート間の付着破壊の進行に起因するものと推察している。

解析結果に着目すると、全てのケースで試験による荷重-中央たわみ関係を大略再現できている。また、表-4は最大荷重（耐力）の試験値および解析値を比較した結果であり、解析では試験に対して誤差10%程度の範囲で耐力を評価できていることがわかる。

以上より、2.2の数値解析モデルを適用することで、層状ひび割れが発生したRC部材の耐力や剛性の評価が可能であることを確認した。なお、本稿では紙面の都合

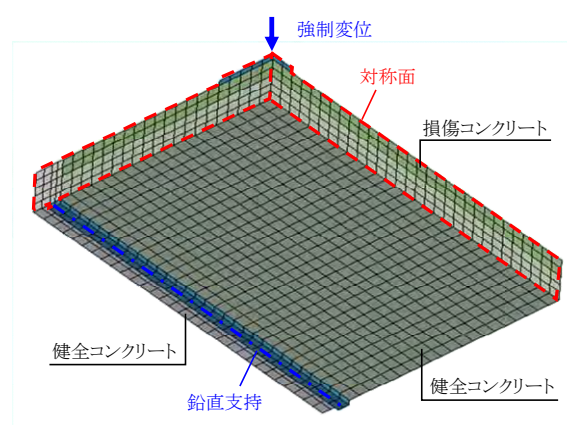


図-6 要素分割図の例 (S39-00-0.4)

上、荷重とたわみに着目した比較結果のみを記載したが、本モデルにより破壊形態の再現が可能なことを確認している。

3. 層状ひび割れが発生した床版の耐力評価

2章で構築した数値解析モデルに基づき、層状ひび割れが床版の静的耐力に及ぼす影響を評価する。本研究では、耐荷・耐久性が低いとされるS39基準に準ずる床版、および、床版厚や鉄筋量の増加により耐荷・耐久性が改善された昭和48年道路橋示方書（以下、S48基準）に準ずる床版を対象に解析を行い、床版の設計年次に応じた層状ひび割れによる耐力低下度を把握する。

3.1 解析方法

(1) 解析ケース

図-5に、解析対象とした2種類（S39モデル、S48モデル）の床版の概要を示す。S39モデルはS39基準に準ずる厚さ170mmの床版を想定したものであり、鉄筋には主鉄筋φ16（SR235）を100mmピッチ、配力鉄筋φ13（SR235）を200mmピッチで配置している。また、S48

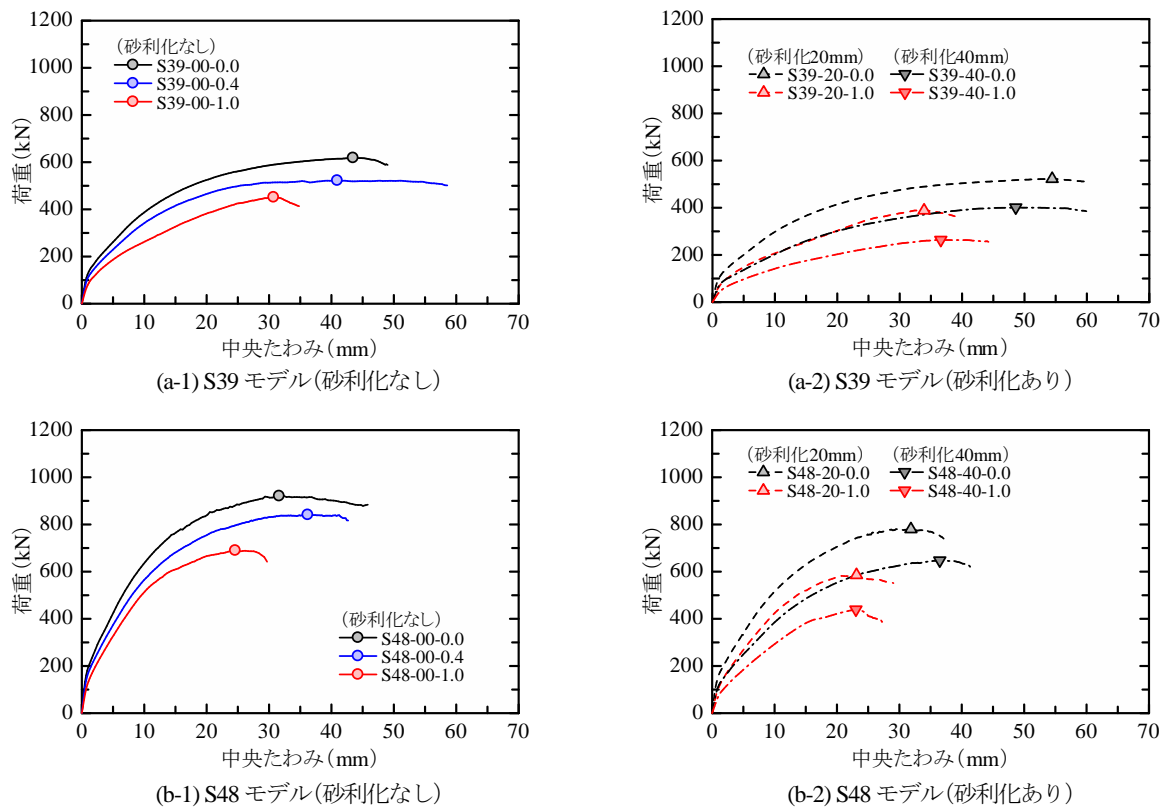


図-7 荷重-中央たわみの関係 (床版の耐力解析)

モデルは S48 基準に準ずる厚さ 200mm の床版を想定したものであり、鉄筋には主鉄筋 D19 (SD345) を 125mm ピッチ、配力鉄筋 D16 (SD345) を 200mm ピッチで配置している。いずれのモデルも、床版の支持は二辺単純支持 (支持間隔 2000mm)、載荷位置は試験体中央の 500mm × 200mm の範囲とした。

表-5 に解析ケースを示す。本研究では、それぞれのモデルに対して、「層状ひび割れなし」、「断面上側に層状ひび割れが発生」、「床版全厚に層状ひび割れが発生」を想定した 3 ケースに、砂利化の発生を考慮した 4 ケースを加えた合計 7 ケースについて解析を実施した。ここで言う断面上側とは、床版厚さ方向を 5 等分に要素分割したうちの上側 2 層のことを指す。また、砂利化深さとして 20mm または 40mm を設定しており、解析上では床版全面の上面かぶり厚を減少させることでモデル化している。

図-6 に要素分割図の例 (S39-00-0.4) を示す。本解析では、試験体や載荷の対称性を考慮して 1/4 モデルを採用しており、要素種類や材料モデルは 3 章と同様としている。

3.2 解析結果

図-7 は解析で得た荷重-中央たわみ関係であり、図中の記号は耐力を表す。また、表-6 には各ケースの耐力を、角田ら¹⁰⁾および前田・松井¹¹⁾の押抜きせん断耐力式による計算値 (それぞれ P_{OK} , P_{OM}) とともにまとめる。

異形鉄筋を配置した S48 モデルの健全状態を想定した

S48-00-0.0 では、耐力 920.4kN が二つの押抜きせん断耐力式による計算値 ($P_{OK}=813.0\text{kN}$, $P_{OM}=1016.8\text{kN}$) の中間的な値になった。同様の傾向は、上面かぶり厚の減少のみを考慮した S48-20-0.0 ($P_{OK}=698.2\text{kN}$, $P_{OM}=911.0\text{kN}$) および S48-40-0.0 ($P_{OK}=584.8\text{kN}$, $P_{OM}=827.1\text{kN}$) にも見て取れる。このことから、本解析モデルにより床版の押抜きせん断耐力を概ね妥当に評価できていると判断できる。一方、丸鋼鉄筋を配置した S39 モデルでは、S39-00-0.0, S39-20-0.0, S39-40-0.0 の耐力が、角田式による計算値 $P_{OK}=649.8$, 537.1, 426.3kN をやや下回る結果となった。

層状ひび割れによる耐力への影響に着目すると、S39 モデルでは、S39-00-0.4 で 522.0kN, S39-00-1.0 で 451.2kN となり、健全状態の S39-00-0.0 から 15~30% の耐力低下が生じた。また、S48 モデルの耐力は、S48-00-0.4 で 840.8kN, S48-00-1.0 で 689.6kN であり、健全状態からの耐力低下は 10~25% となった。このことから、層状ひび割れが床版の耐力低下に及ぼす影響は床版の設計年次によらず同程度であり、最大で 30% の耐力低下をもたらすと考えられる。

次に、砂利化と床版全厚の層状ひび割れが同時に発生している場合に着目すると、S39 および S48 の両モデルとも、砂利化深さが 20mm (S39-20-1.0, S48-20-1.0) および 40mm (S39-40-1.0, S48-40-1.0) のケースでは、それぞれ健全時に対して 35% 程度および 55% 程度の耐力低下が生じた。すなわち、実橋床版において鉄筋が露出するほど上面の砂利化が進行し、かつ、層状ひび割れが床

表-6 耐力の比較

解析 ケース	耐力 (kN)			比 ^{※1}	比 ^{※2}
	角田式	前田・ 松井式	解析		
S39-00-0.0	649.8	763.2	618.0	1.00	1.00
S39-00-0.4	—	—	522.0	0.84	0.84
S39-00-1.0	—	—	451.2	0.73	0.73
S39-20-0.0	537.1	675.8	522.4	0.85	0.85
S39-20-1.0	—	—	388.6	0.63	0.63
S39-40-0.0	426.3	600.6	401.2	0.65	0.65
S39-40-1.0	—	—	263.8	0.43	0.43
S48-00-0.0	813.0	1016.8	920.4	1.00	1.49
S48-00-0.4	—	—	840.8	0.91	1.36
S48-00-1.0	—	—	689.6	0.75	1.12
S48-20-0.0	698.2	911.0	780.0	0.85	1.26
S48-20-1.0	—	—	585.6	0.64	0.95
S48-40-0.0	584.8	827.1	647.2	0.70	1.05
S48-40-1.0	—	—	439.2	0.48	0.71

※1：各モデルの健全時(S39-00-0.0, S48-00-0.0)に対する比

※2：S39 モデルの健全時(S39-00-0.0)に対する比

版全厚に分布している場合には、健全時に対して 50%以下の耐力しか保持していないことを想定する必要があるようである。

最後に、二つのモデル間で耐力を比較すると、S39 モデルと比較して床版厚や鉄筋量が多い S48 モデルでは元来有する耐力が大きく、層状ひび割れが発生していたとしても砂利化を伴っていなければ、S39 の健全時を上回る耐力を有する結果となった。また、本解析の範囲において、S48 モデルで S39-00-0.0 の耐力を下回るのは、S48-20-1.0 (耐力比 0.95) および S48-40-1.0 (耐力比 0.71) であり、砂利化と床版全厚の層状ひび割れが併発してはじめて耐力が S39 モデルの健全時と同程度以下になると考えられる。

なお、図-7では、解析ケースによって荷重 100~150kN 時点でのたわみが大きく異なることがわかる。すなわち、本研究では静的耐力に着目して層状ひび割れが床版に与える影響を評価したが、たわみの大小が将来的な損傷進行に影響を及ぼす可能性があることには留意しなければならない。この層状ひび割れと損傷進行特性の関係性については、今後の検討事項としたい。

4. まとめ

本研究では、寒冷地の RC 床版を対象に、凍害に起因するコンクリートの層状ひび割れが静的耐力に及ぼす影響を数値解析的に評価した。これにより得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 載荷試験と数値解析との比較を通して、層状ひび割れが発生した RC 部材の耐力評価に用いる解析モデルの妥当性を確認した。

- (2) 層状ひび割れが床版の耐力低下に及ぼす影響は床版の設計年次によらず同程度であり、健全時に対して最大で 30%程度の耐力低下をもたらす。
- (3) 昭和 48 年の示方書に準ずる床版では、床版全厚に層状ひび割れが発生していたとしても、砂利化を伴っていなければ、昭和 39 年の示方書に準ずる床版の健全時を上回る耐力が確保されと考えられる。

参考文献

- 1) 三田村浩, 澤松俊寿, 岡田慎哉, 角間恒, 松井繁之: 46年間供用した積雪寒冷地における道路橋 RC 床版の損傷状況の調査, 平成 24 年度土木学会北海道支部年次技術研究発表会, A-11, 2013.
- 2) 角間恒, 西弘明, 渡邊晋也, 小野秀一, 榎谷浩, 久保善司: 凍害・ASR が複合的に生じる環境下で 49 年間供用された実橋 RC 床版の構造性能評価, 土木学会論文集 E2, Vol.76, No.1, pp.21-40, 2020.
- 3) 角間恒, 仁平陽一郎, 畠山乃: 模擬損傷部材による寒冷地特有の損傷が進行した実橋床版の損傷性状に関する再現実験, 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 23 巻, pp.479-484, 2023.
- 4) 角間恒, 仁平陽一郎, 畠山乃: 層状ひび割れが発生した RC 部材の力学挙動に及ぼす鉄筋種類の影響, 令和 5 年度土木学会北海道支部年次技術研究発表会, A-28, 2024.
- 5) Hordijk, D.: Approach to Fatigue of Concrete, Delft University of Technology, 1991.
- 6) 李宝禄, 前川宏一: 接触密度関数に基づくコンクリートひび割れ面の応力伝達構成式, コンクリート工学, Vol.26, No.1, pp.123-137, 1988.
- 7) Nakamura, H. and Higai, T.: Compressive Fracture Energy and Fracture Zone Length of Concrete, Modeling of Inelastic Behavior of RC Structures under Seismic Loads, ASCE, pp.471-487, 2001.
- 8) 土木学会: 2022 年制定 コンクリート標準示方書 設計編, 2023.
- 9) 島弘, 周礼良, 岡村甫: マッシュなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着応力-すべり関係, 土木学会論文集, 第 378 号/V-6, pp.165-174, 1987.
- 10) 角田与史雄, 井藤昭夫, 藤田嘉夫: 鉄筋コンクリートスラブの押抜きせん断耐力に関する実験的研究, 土木学会論文報告集, 第 229 号, pp.105-115, 1974.
- 11) 前田幸雄, 松井繁之: 鉄筋コンクリート床版の押抜きせん断耐荷力の評価式, 土木学会論文集, 第 348 号/V-1, pp.133-141, 1984.

(2024 年 7 月 12 日受付)