

論文

# 側面が凍害劣化した鉄筋コンクリート梁のせん断耐力と断面修復効果に関する基礎的研究

及川 雄大\*<sup>1</sup>, 三好 慶大\*<sup>1</sup>, 高瀬 裕也\*<sup>2</sup>

## Fundamental Study on Shear Strength and Repair Effect for Reinforced Concrete Beam with Frost-damaged Side Surface

Yudai OIKAWA\*<sup>1</sup>, Keita MIYOSHI\*<sup>1</sup> and Yuya TAKASE\*<sup>2</sup>

**要旨:** 本研究では、鉄筋コンクリート(RC)梁を対象に、凍結融解作用による劣化程度と深度、補修の有無がせん断耐力に及ぼす影響を検証した。液体窒素により凍結融解作用を与え、段階的に RC 梁の片方の側面を劣化させ、3 点荷重試験を実施した。片側側面表層の相対動弾性係数が 60%近くまで劣化すると、せん断強度が 7.5%程度低下したが、ポリマーセメントモルタルで補修することで、せん断強度が回復した。また既往のトラス・アーチ機構に基づくせん断強度式により、劣化した梁、さらに補修した梁試験体の実験値を適切に評価できた。

**キーワード:** 凍害劣化, 液体窒素, 相対動弾性係数, ポリマーセメントモルタル, せん断耐力

### 1. はじめに

北海道をはじめとする積雪寒冷地では、鉄筋コンクリート(以下、RC)構造物は凍結融解作用を受け、柱や梁等の部材の側面から凍害劣化する懸念がある。また、ピロティや駐車場等の半外部空間においては、**図-1**の断面に青色で示した劣化部分のように、多方向から劣化が進行し、RC 部材内部まで劣化することが危惧される。コンクリートが劣化すると、圧縮強度、ヤング係数、引張強度、および曲げ強度等の力学特性が低下し<sup>(例えば1)</sup>、設計時の性能が保持されないと考えられる。長寿命化の観点から、かぶりの不足や、かぶり劣化した場合は、一般的に、**図-2**に示すように電動ハンマー等で劣化部を除去し、断面修復材を用いて補修する。

補修補強技術について、凍結融解作用による劣化メカニズムの解明<sup>(例えば2)</sup>や、耐凍害性に優れた断面修復材の開発<sup>(例えば3)</sup>等、材料的な研究は広く進んでいるが、部材レベルの検討は少なく、劣化した RC 梁の性能や補修効果に関する研究<sup>(4,5,6)</sup>は十分ではない。

土屋ら<sup>4)</sup>は、試験体全域に凍結融解作用を与え、RC 梁のせん断耐力算定式を提案した。一方、林田ら<sup>5)</sup>は、道路橋床板や壁高欄を対象として、凍結融解作用による劣化域を圧縮側と引張側に分け、あばら筋のない曲げ破壊型の RC 梁の加力実験から、凍害劣化領域の位置や大きさの違いが梁の最大荷重、変形性状、破壊形式に影響を与えることを明らかにした。

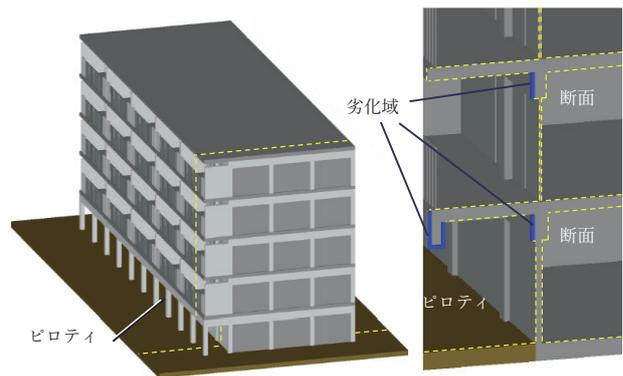


図-1 コンクリート構造物梁断面の劣化部分



(a) 劣化部除去の様子 (b) 断面補修材

図-2 補修の様子

また近ら<sup>6)</sup>は凍結融解を部分的に作用させ、劣化範囲、相対動弾性係数(以下、DM)、腹鉄筋の有無をパラメータとして、RC のせん断耐力算定式の妥当性や算定精度を検討している。

しかしながら、建築構造物において露出している

\*1 室蘭工業大学環境創生工学系専攻 博士前期課程

\*2 室蘭工業大学もの創造系領域 准教授

面は側面表層であることが多く、側面表層コンクリートが段階的に劣化した RC 部材の性能は明らかにされていない。そこで本研究では、液体窒素によって RC 単純梁を側面から劣化させ、劣化度及び劣化深度の違いや補修の有無をパラメータとして加力実験を実施し、そのせん断耐力について検証する。

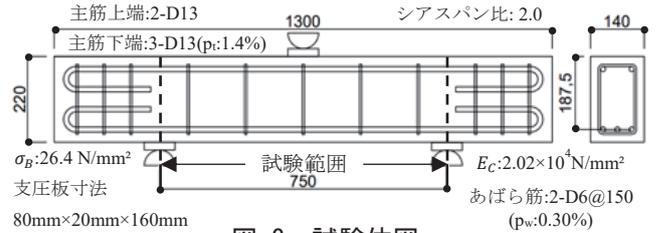


図-3 試験体図

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体概要

図-3に試験体図を、表-1に試験体パラメータを示す。本試験体は、全長1300 mm、梁せい220 mm、梁幅140mmである。本提案劣化手法は完全に確立されたものではないが、これまでの経験から劣化可能なサイズとして、およそ1/3スケールとした。加力方法は3点曲げ载荷である。本研究では、健全1体、劣化3体、劣化部を補修した3体の計7体の試験体を製作し、荒川mean式によるせん断強度<sup>7)</sup>と、曲げ強度式<sup>7)</sup>による終局曲げモーメントによるせん断余裕度が0.68となり、せん断破壊するよう設計した。

### 2.2 劣化手法

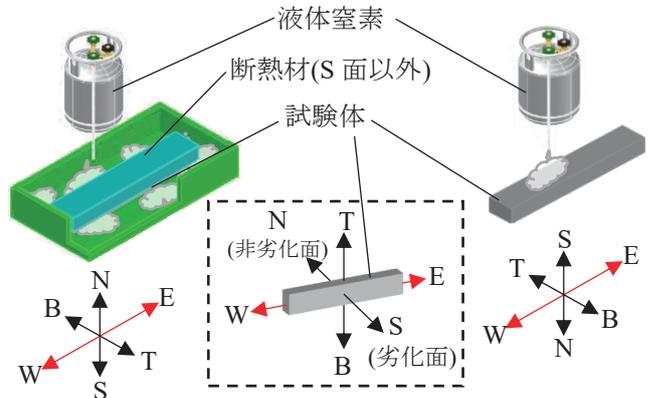
劣化の度合いをDMで示し、試験体全体のDMの平均値をDM̄とする。JIS規格<sup>8)</sup>によれば、凍結融解を300サイクル、またはDM=60%が試験終了の基準となっている。そこで本実験では、梁側面のかぶりコンクリートのDMを100%、80%、60%とする。さらにJIS規格<sup>8)</sup>に基づく凍結融解試験法では、試験体寸法や形状の制約から適用が困難であるため、既往の研究<sup>1)</sup>で確立された図-4および図-5に示す液体窒素による劣化手法を用いる。図-4に示すように、劣化方向や超音波測定の方法が分かるよう、梁の上下面をT面/B面、劣化させる側の側面方向をS面/N面、その直行方向をE面/W面と呼ぶ。なお、DM60%に関しては、凍結方法を図-4に示す2パターンに分けて劣化させた。図-4(a)に示すパターンAでは、劣化面側のかぶりコンクリート以外を断熱材で覆うことで、片側側面のみを劣化させる。図-4(b)に示すパターンBでは、液体窒素を直接、吹き付けることで、半外部空間における劣化を模擬している。S4-60s-NとS7-60s-RはパターンBを用いた。DM80%はパターンAのみを用いた。図-6に温度履歴の一例としてS3-60-N表層の温度履歴を示す。本試験体には、4隅と中心の計5点の表層から20mmの位置に熱電対を設置した。凍結後、約45℃の熱湯で、試験体表層の温度が常温となるまで融解する。試験体の水分を十分拭き取り、試験体梁せい方向(T面-B面)に試験体を挟み込むように、超音波伝播速度Vを計測する。既往の文献<sup>10)</sup>より、式(1)、(2)に計測したVを代入し、DMを算出する。

$$E_d = 4.0387V^2 - 14.438V + 20.708 \quad (1)$$

表-1 試験体パラメータ

試験体名	DM	DM̄	劣化パターン	補修の有無	$\sigma_P$	$\sigma_{wy}$
S1-100-N	100%	100%	—	—	—	—
S2-80-N	80%	94%	A	—	—	—
S3-60-N	60%	79%	A	無(N)	—	—
S4-60s-N	60%	70%	B	—	—	456
S5-80-R	80%	87%	A	—	—	—
S6-60-R	60%	73%	A	有(R)	54.9	—
S7-60s-R	60%	75%	B	—	—	—

DM：相対動弾性係数 DM̄：試験体全体のDMの平均値



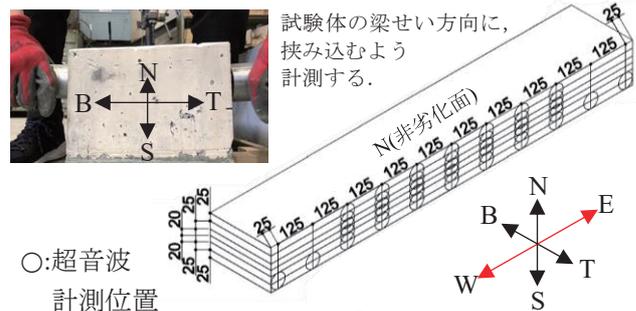
液体窒素を上から直接吹き付ける。  
液体窒素を下に貯める。

(a) パターン A (b) パターン B (2 体のみ)

図-4 劣化パターンの違い



(a) 実際の凍結の様子 (b) 実際の融解の様子



(c) 超音波計測

図-5 凍結融解試験の概要

$$DM = \frac{E_{dn}}{E_{a0}} \times 100 \quad (2)$$

ここに、 $E_d$ は動弾性係数(GPa)、 $V$ は超音波伝播速度(km/s)、 $DM$ は相対動弾性係数(%),  $E_{dn}$ は*n*サイクル経過後の $E_d$ ,  $E_{a0}$ は健全状態の $E_d$ である。 $DM$ が目標値になるまで凍結融解を繰り返す。本実験においては1~3サイクルで、全ての試験体劣化面側表層が目標の $DM$ に達した。図-7に $DM$ 分布の一例を示す。同図(a)がパターンAによる凍結であり、同図(b)がパターンBによる凍結である。(b)の方が非劣化面側まで $DM$ が小さくなっていることが分かる。ここでS-N方向の $DM$ を見ると劣化深度を把握でき、パターンAでは、中心部の $DM$ がおよそ80%, N面側では約90~100%になっている。一方、Kurihashi<sup>9)</sup>らは、JIS規格に基づいて、梁の上面もしくは下面を劣化させているが、劣化の分布としては大きな差異がないように思われる。

### 2.3 補修方法

図-8 および図-9 に表面処理の状況、およびポリマーセメントモルタル(以下、PCM)による補修の様子をそれぞれ示す。表面処理には、図-8 に示す、びしゃんを使用した。実際には、劣化部を取り除いて断面修復するが、はつり取る厚さに影響を受けないように補修効果を評価するため、はつり厚さを0mmとした。補修面にランダムに表面凹凸を設けた後、プライマーを塗布し、図-9 に示すようにPCMを用いて、左官工法により20mm増し厚した。

図-10 に加力装置を示す。図-10 に黒破線で示した支圧板の寸法は、図-3 に示すとおりで、支点での支圧破壊を防ぐ目的で設置した。既述してあるように、本実験では3点曲げ載荷形式を採用した。

### 2.4 材料特性とひずみ計測

図-11 の赤色部分に示す位置にひずみゲージを貼り付け、主筋・あばら筋のひずみを計測した。表-2 に本実験で用いたコンクリートとPCMの材料特性を、表-3 に本実験において用いた鉄筋の機械的性質を示す。表-3 より、主筋(D13)とあばら筋(D6)の降伏強度はそれぞれ、389 N/mm<sup>2</sup>と456 N/mm<sup>2</sup>であった。

## 3. 実験結果

### 3.1 ひび割れ発生状況

図-12 に加力後の試験体状況を示す。図-12 の左側が劣化面(S面)、右側が非劣化面(N面)である。図-12 (a)~(d)を観察すると、未補修試験体には顕著なせん断ひび割れが発生した。補修した試験体では、非劣化面側に複数の曲げひび割れと曲げせん断ひび割れが発生し、最大荷重の直前から、劣化面側(補修面側)に、大きな斜めひび割れが生じた。

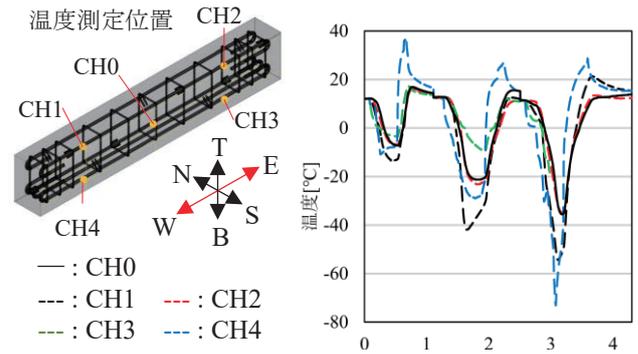
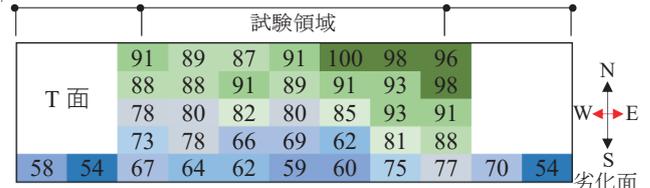
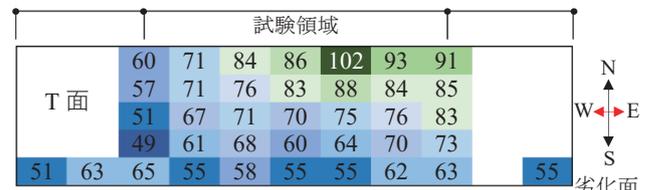


図-6 温度履歴の一例



(a) パターンA: S4-60s-N の DM [%] 分布



(b) パターンB: S6-60-R の DM [%] 分布

図-7 DM 分布の一例



図-8 表面処理の様子

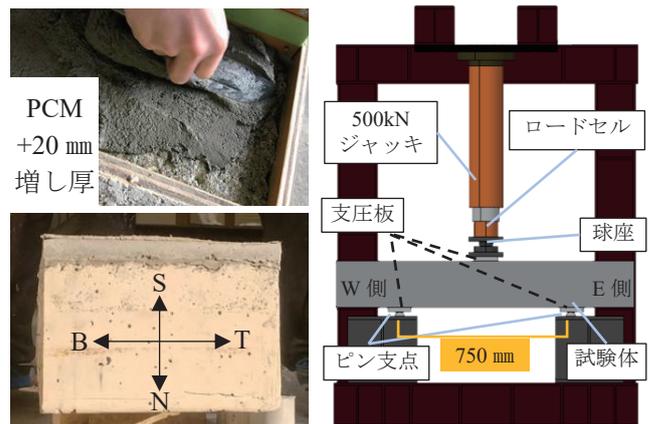


図-9 PCM 補修の様子

図-10 加力装置の概要

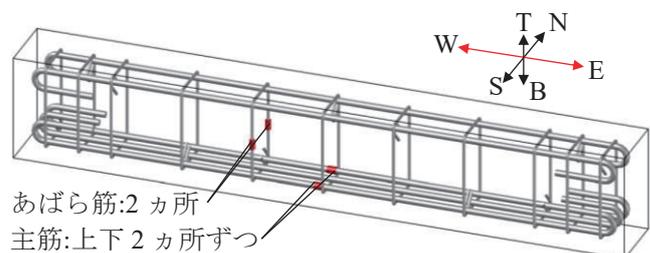


図-11 ひずみゲージ貼り付け位置

表-2 コンクリートと PCM の材料特性

	$c\sigma_B$ or $p\sigma_B$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$cE_c$ or $pE_c$ [kN/mm <sup>2</sup> ]	$c\sigma_t$ or $p\sigma_t$ [N/mm <sup>2</sup> ]
コンクリート	26.4	20.2	2.22
PCM	54.9	21.8	4.05

※ $\sigma_B$ は圧縮強度、 $E_c$ はヤング係数、 $\sigma_t$ は割裂強度、添え字のcはコンクリート、pはPCM

表-3 鉄筋の機械的性質

鉄筋	$\sigma_y$ or $\sigma_{wy}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	ヤング係数 [kN/mm <sup>2</sup> ]	$\epsilon_y$ or $\epsilon_{wy}$ [ $\times 10^{-6}$ ]	終局強度 [kN]	伸び [%]
D13	389	170	2284	66.0	16.9
D6	456	195	2338	18.4	15.5

※ $\sigma_y$ は主筋の降伏強度、 $\sigma_{wy}$ はあばら筋の降伏強度、 $\epsilon_y$ は主筋降伏強度時ひずみ、 $\epsilon_{wy}$ はあばら筋降伏強度時ひずみ

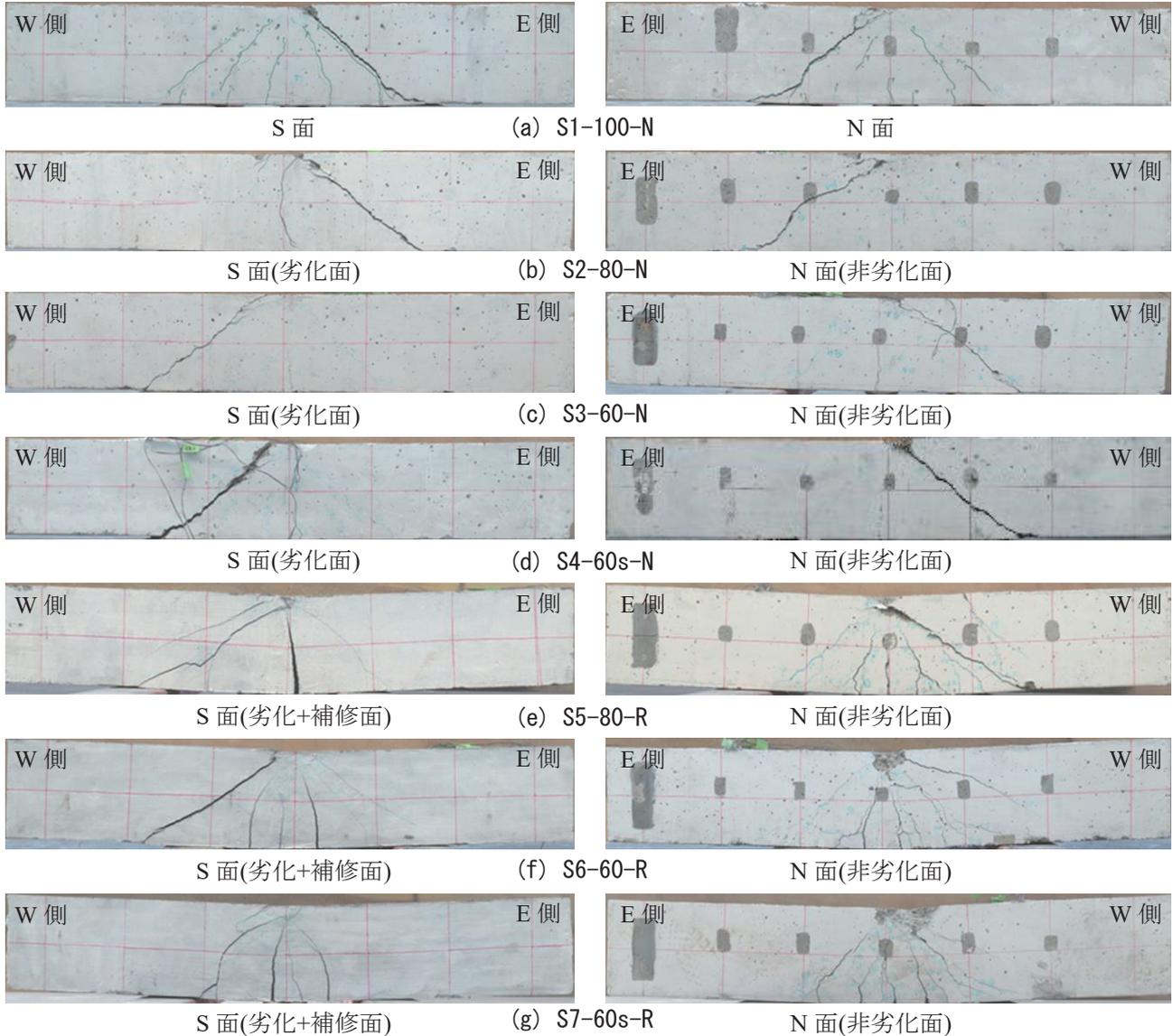


図-12 加力後の試験体状況

続いて、S2-80-N，S3-60-N，S4-60s-N の非劣化面に着目すると、わずかに曲げひび割れも確認されるが、補修試験体と比べるとかなり少ない。また、S5-80-R，S6-60-R，S7-60s-R については補修したため、劣化面が PCM であるが、非劣化面に比べひび割れが少ない。PCM と母材コンクリートの一体性について、目視では明白な剥離は見られず、また PCM と母材コンクリート界面にひび割れも確認できなかった。

### 3.2 荷重変位関係

図-13に各試験体の荷重変位関係を示す。基準となるDM100%の試験体の最大荷重 $P_{max}$ は187kNであった。最も $P_{max}$ が小さいのはS4-60s-Nの173kNであり、

S1-100-Nに対し7.5%程度耐力が低下した。図-13(a)に健全状態の試験体図-13(b)に未補修の試験体、図-13(c)に劣化面を補修した試験体の荷重-変位関係を示す。図-13(b)(c)から、対応する試験体毎に補修の効果を見ると、各試験体において $P_{max}$ が25kN程度上昇した。また、未補修試験体では、最大荷重後に荷重低下するのに対し、補修試験体では、荷重が一度横ばいになって微増し、変位15mm近傍で急激に荷重低下した。その際の荷重を $P_S$ とする。

### 3.3 鉄筋のひずみ

前掲の図-13には、降伏ひずみに達した点をプロットしており、本節では鉄筋のひずみについて考察

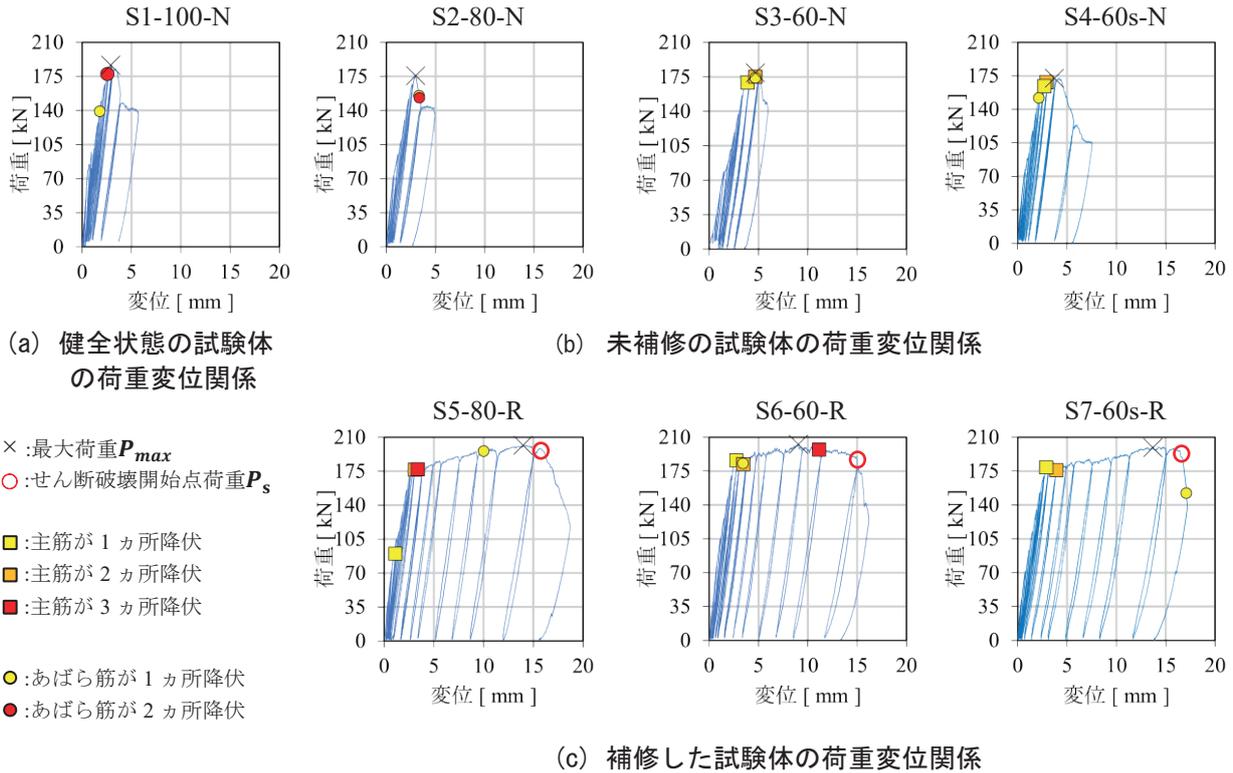


図-13 各試験体の荷重変位関係

する。図-13 の×印が最大荷重を示しているが、S1-100-N, S2-80-N では最大荷重の近傍であばら筋が降伏している。また、S3-60-N, S4-60s-N でも、最大荷重近傍であばら筋が降伏しているが、主筋も降伏している。したがって、3.1 節のひび割れ状況や、3.2 節の荷重変形挙動と併せて考えると、これらの試験体はせん断破壊したと判断される。

続いて、3 体の補修試験体に着目すると、荷重が横ばいになる時点で、どの試験体も主筋が降伏していることから、曲げ降伏が生じたと判断される。さらに、3.1 節のひび割れ発生状況より、曲げ降伏後に、大きな斜めひび割れを伴って荷重低下していることから、最終的にはせん断破壊したと考えられる。

なお、S7-60s-R は、他の補修試験体と比べるとPCM 側は、曲げせん断ひび割れに近いが、本論文では、せん断破壊として評価する。

#### 4. セン断耐力評価

前3章で述べた通り、補修した試験体では曲げ降伏後、変形角が大きくなることにより、せん断耐力が徐々に低下し、曲げ降伏強度と交差する点でせん断破壊したと考えられる。これを評価可能なせん断耐力式として、市之瀬が提案したトラス・アーチ理論に基づく耐力式<sup>12)</sup>がある。図-14 にトラス・アーチ機構の概要を示す。トラス機構は、主筋とあばら筋の引張力、コンクリートの圧縮力によりせん断応力を伝達する機構であり、アーチ機構は加力点と支

点との間に生じる圧縮ストラッドにより、せん断力を伝達する機構である。さらに倉本・南<sup>13)</sup>は機構毎に梁幅を分け、これらを累加するせん断耐力式を提案した。これらを踏まえ、せん断耐力式を以下のように表す<sup>12),13)</sup>。

$$Q_s = B_b \cdot j_t \cdot p_w \cdot \sigma_{wy} \cdot \cot \theta + B_a \cdot \frac{D}{2} \cdot (1 - \beta) \cdot v \cdot \sigma_B \cdot \tan \theta \quad (3)$$

$$B_a = B - B_b = B - \frac{2 \cdot bQ}{d \cdot \sigma_B} \quad (4)$$

ここに、 $Q_s$ はせん断強度(kg)、 $j_t$ は主筋中心間距離(cm)、 $p_w$ はあばら筋比、 $\sigma_{wy}$ はせん断補強筋の引張強度(kg/cm<sup>2</sup>)、 $\theta$ はトラス機構が作用する角度、 $\theta$ はアーチ機構が作用する角度、 $B_b$ はトラス機構が作用する幅(cm)、 $B_a$ はアーチ機構が作用する幅(cm)、 $B$ は梁幅(cm)、 $D$ は梁せい(cm)、 $\beta$ は論文12)で算出される係数、 $v$ はヒンジ領域内での有効強度係数、 $\sigma_B$ はコンクリートの圧縮強度(kg/cm<sup>2</sup>)、 $bQ$ は静適応力場を満足するトラス機構によるせん断力、 $d$ は上端と下端の主筋間隔(cm)である。表層が劣化した試験体に対しては、既往の文献<sup>1)</sup>を参考に $\sigma_B$ のかわりに式(5)で表される等価圧縮強度を適用する。

$$\sigma_{BDM} = \{0.0074(\overline{DM} - 100) + 1\} \cdot \sigma_B \quad (5)$$

ここで、式(3)のアーチ機構に着目すると、 $\sigma_B$ がせん断耐力に比例していることから、 $DM$ もせん断耐力と比例関係になる。このため、 $\overline{DM}$ を用いて耐力式を構築している。補修した梁のせん断耐力式について

ては、式(3)にPCMによる補修効果の項 $Q_P$ を加える。即ち、補修断面は無筋であるため、アーチ機構で表されると考える。

$$Q_{SR} = Q_S + Q_P \quad (6)$$

$$Q_P = B_P \cdot \frac{D}{2} \cdot (1 - \beta) \cdot v \cdot \sigma_P \cdot \tan \theta \quad (7)$$

以上の式(3)~(7)を補修の有無、さらにDMを考慮したせん断耐力式とし、表-4に実験値と計算値の一覧を示す。なお、計算値は式(3)の単位系で計算したあとに、SI単位系に変換している。

同表より安全率は1.07から1.18となり、全試験体で安全側に評価できている。また、表-4に示した $\overline{DM}$ に着目すると、S5-80-Rは-7%、S7-60s-Rは+5%と、比較対象の試験体と $\overline{DM}$ に差異が生じているが、両者の $Q_S$ の増加はそれぞれ10 kNと8 kNであり、 $\overline{DM}$ の差異による影響は少ないと考えられる。以上から、本実験の結果、補修することで $Q_S$ が3~10kN(平均値で7.0kN)上昇し、式(7)による計算結果は7.5kNであり、アーチ機構によって適切に評価できている。

## 5. おわりに

本実験では、梁側面のDMが60%になるよう劣化させたが、せん断耐力の低下は最大で7.5%程度であり、式(3)で示した耐力式に、式(5)で示した劣化時のコンクリート強度を代入することで安全側に評価できた。また、PCMによる断面補修を施すことでせん断強度 $Q_S$ が3~10kN程度上昇し、式(7)で示したアーチ機構によって適切に耐力評価できた。全ての試験体において、安全率は1.07~1.18の間の値であり、安全側に評価できた。

## 参考文献

- 1) 周藤将司ほか：凍害劣化の生じたコンクリートの力学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，農業農村工学会論文集，No.303，pp.291-299，2016.12.
- 2) 洪悦郎ほか：コンクリートの凍害と初期凍害，コンクリート工学，Vol.16，No.5，pp.1-11，1978.5.
- 3) 乙茂内郁美，濱幸雄：初期材齢時の凍結および施工時条件が繊維補強ポリマーセメントモルタルの強度性状に及ぼす影響，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，Vol.19，pp.413-416，2019.10.
- 4) 土屋祐貴，八嶋宏幸，内藤英樹，Bei Wang，山洞晃一，古賀秀幸，鈴木基行：凍結融解によって劣化したRCはりのせん断耐力，構造工学論文集，Vol. 60A，pp.751-760，2014.
- 5) 林田宏，佐藤靖彦：凍害劣化域の大きさと位置

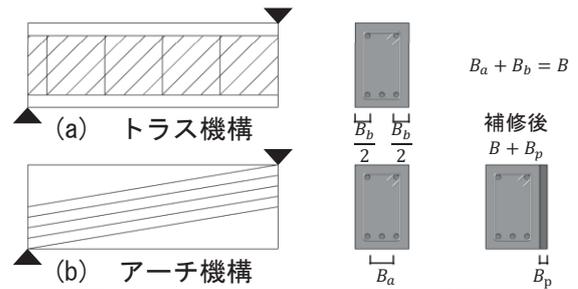


図-14 トラス・アーチ理論の概要

表 4 せん断破壊時の荷重，計算値による安全率

試験体名	$P_{max}$ (kN)	$Q_S$ (kN)	$\overline{DM}$	$Q_P$ (kN)	$Q_{SR}$ (kN)	安全率
S1-100-N	187	94	100%		84	1.12
S2-80-N	176	88	94%		82	1.07
S3-60-N	179	90	79%		76	1.18
S4-60s-N	173	86	70%		73	1.18
S5-80-R	202	98(+10)	87(-7)%	7.5	87	1.13
S6-60-R	203	93(+3)	73(-6)%	7.5	81	1.15
S7-60s-R	200	94(+8)	75(+5)%	7.5	81	1.16

※ $Q_S$ は $P_S$ 時に断面に作用するせん断力である。また、()内の数値は補修による $Q_S$ の増加分と $\overline{DM}$ の変化量である。安全率は、 $Q_S/Q_{SR}$ である。

に着目したRCはり部材の破壊性状，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.1，pp.922-927，2012.

- 6) 近栄一郎，八嶋宏幸，内藤英樹，松崎裕，山洞晃一，鈴木基行：凍結融解を受けたRCはりの安全性評価に関する基礎的研究，構造工学論文集，Vol.63A，pp.784-794，2017.
- 7) 日本建築防災協会：2001年改訂版 既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準 同解説(6刷)，p.245，p.248，2005.
- 8) 日本産業規格：コンクリートの凍結融解試験方法，JISA1148，2010.
- 9) Kurihashi Y., Konno H. and Hama Y.: Effects of frost-damaged reinforced concrete beams on their impact resistance behavior, Construction and Building Materials, Vol. 274, 122089, 2021.
- 10) 緒方英彦，服部九二雄，高田龍一，野中資博：超音波法によるコンクリートの耐凍結融解特性の評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp.1563-1568，2002.6.
- 11) 三好慶大ほか：液体窒素を用いた凍結融解作用によるRC構造実験用試験体の劣化手法とその劣化程度の評価，日本建築学会北海道支部研究報告集，Vol.93，pp.107-110，2020.6.
- 12) 市之瀬敏勝：変形能力を考慮したRC部材のせん断設計法，日本建築学会構造系論文報告集，Vol.415，pp.53-62，1990.9.
- 13) 倉本洋，南宏一：塑性理論を応用した鉄筋コンクリート部材の実用せん断設計式日本建築学会構造系論文報告集，Vol.417，pp.31-45，1990.11.