

論文 凍害劣化したスラブが偏心荷重を受けた時の破壊性状に関する検討

林田 宏*1

要旨: 凍害によって劣化した RC スラブが偏心荷重を受けた場合に、中央荷重の場合と比べて耐力や破壊性状がどのように変化するかを明らかにするため、静的載荷試験による検討を行った。その結果、凍害スラブは中央・偏心荷重ともに、凍害で発生した水平ひび割れによってスラブ厚が減少していたため、耐力が低下した。また、中央載荷した凍害スラブでは、斜めひび割れが主鉄筋に沿って進展したため、破壊時に押抜きせん断コーンが発生しなかった。一方、偏心載荷した凍害スラブでは、スラブ厚が減少したことでせん断スパン比が大きくなったため、変形性能が大きくなり、破壊時の変位が健全スラブよりも大きくなった。

キーワード: 床版、凍害、耐力、静的載荷、偏心載荷、せん断スパン比、水平ひび割れ

1. はじめに

写真-1 は、寒冷地の道路橋床版の主桁近傍で発生した床版の陥没である。このように主桁近傍で床版が陥没するのは、この事例に限ったことではなく、多くの橋梁で同様の陥没が生じている。また、寒冷地の道路橋床版では、疲労と凍害の複合劣化によって、写真-2 のような層状ひび割れや土砂化が発生している。特に、土砂化に関しては、図-1 に示すように「支間中央」よりも「主桁近傍」の方が、発生割合が高いことが報告されている。

上記のように、主桁近傍で床版に損傷が生じているのは、車輪が主桁近傍を走行しているからである。しかし、道路橋床版の設計では支間中央を走行することが想定されており、主桁近傍を走行することは想定されていない。

一方で、載荷位置が支間中央ではない場合の床版の耐力や疲労寿命に関しては、いくつかの研究^{4), 5)}が実施されており、中央載荷の時と比べて偏心載荷の方が耐力が小さくなることを指摘している。しかし、これらの研究は、「健全」もしくは「疲労のみ」の床版を対象としたものであり、冒頭で紹介したような「凍害劣化」を受けた床版を対象とした研究は行われていない。すなわち、凍害によって劣化した床版が偏心荷重を受けた場合、耐力や疲労寿命がどのように変化するかという問題に関しては、現段階では、ほとんど明らかになっていない。

そこで、本研究では、凍害によって劣化した RC スラブが偏心荷重を受けた場合に、中央荷重の場合と比べて耐力や破壊性状がどのように変化するかを明らかにするため、静的載荷試験による検討を行った。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

本実験では図-2 に示す小型のスラブ供試体を用いた。平面寸法については、偏心載荷を行うことを前提として、当研究所で所有している載荷試験装置の制約条件を考慮し、1.5m×2.0m とした。厚さについては供試体製作の際、

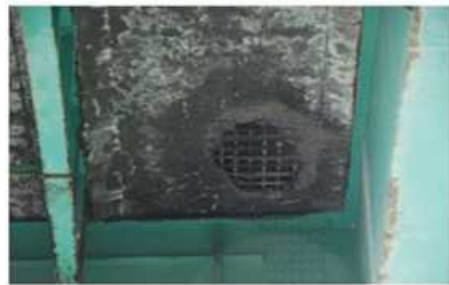


写真-1 寒冷地の道路橋床版の主桁近傍で生じた陥没¹⁾



写真-2 寒冷地の床版で生じた層状ひび割れや土砂化²⁾

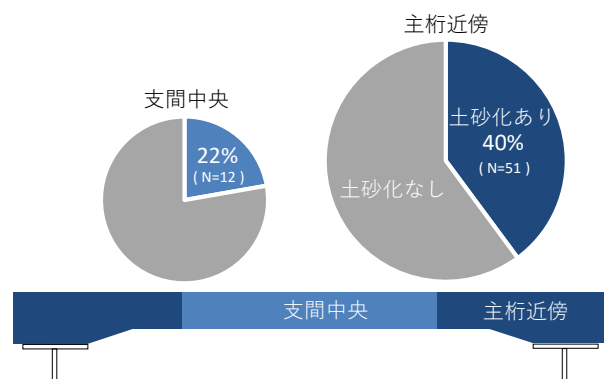


図-1 支間中央と主桁近傍の土砂化割合³⁾

既製の鋼製型枠を使用することを前提に、既往の実験⁶⁾で用いた実物大のスラブ供試体のせん断スパン比にできるだけ近づけるようにするため、厚さを10cmとした。

*1 (国研) 土木研究所 寒地土木研究所 耐寒材料チーム主任研究員 (正会員)

次に、供試体の配筋については、上記のようにして決定した形状寸法に基づき、実物大のスラブ供試体⁶⁾の鉄筋比にできるだけ近づくように配筋量を決定した。

使用したコンクリートに関しては、早期に凍害劣化を顕在化させるため、コンクリートに AE 剤を使用せず、水セメント比を 65% に設定した。なお、セメントには普通ポルトランドセメントを、骨材には粗骨材最大寸法 20mm の碎石を用いた。配合表を表-1 に示す。また、コンクリートと鉄筋の材料特性を表-2 に示す。なお、コンクリートの圧縮強度は、28 日標準水中養生後に実施した圧縮試験結果によるものである。また、鉄筋の降伏強度はミルシートの値である。

実験変数は荷重位置（中央，偏心）と凍結融解の有無である。表-3 に実験変数と供試体名を示す。

なお、今回の供試体には、鉄筋ひずみゲージやコンクリートゲージは設置していない。

2.2 凍結融解試験

コンクリート打設後、4 週目まで水中養生を行った後、凍結融解試験を開始した。劣化深さは、既往の実験⁶⁾と同じ、スラブ厚の 1/2 (50mm) に設定した。劣化深さを制御するため、図-3 のように、スラブ厚の 1/2 の位置である深さ 50mm の位置に温度センサーを設置し、このセンサーの測定温度が、-18~0℃になるように温度を制御した。また、劣化程度を把握するため、温度センサーにあわせてモールドひずみゲージ（基長：50mm、適用温度範囲：-20~+60℃）を鉛直方向に設置した。

また、凍結融解試験に当たっては、上面以外の面には断熱材を設置し、供試体の冷却・加熱は供試体上面からのみ行って、設定した劣化深さの範囲のみに凍結融解作用を与えることとし、設定した劣化深さよりも下側の範囲では凍結を持続させた。

上記のような、凍結融解試験を 447 回行った。この回数、劣化が既往の実験⁶⁾と同じ程度、具体的には、モールドひずみゲージの値が 8000 μ 以上となるまでに要した回数である。以上のように、当初の計画では劣化深さを 5cm にする予定であったが、凍結融解試験終了後の水平ひび割れが発生した位置などから推測すると、各供試体の実際の劣化深さについては、供試体 CF は 4cm、供試体 SF は 3cm 程度であると考えられる。

2.3 静的荷重試験

支持条件は 2 辺単純支持で、支間は 1300mm とした。荷重版には 100×100mm の鋼板を使用し、各荷重位置で一点集中荷重した。荷重速度は、既往の実験⁷⁾と同じ 0.01mm/s とした。荷重位置については、供試体中央と中央から橋軸直角方向に 30cm 離れた位置に設定した（図-4）。この偏心量に関しては、既往研究⁴⁾の知見を基に、耐力が低下すると考えられる量を設定したものである。

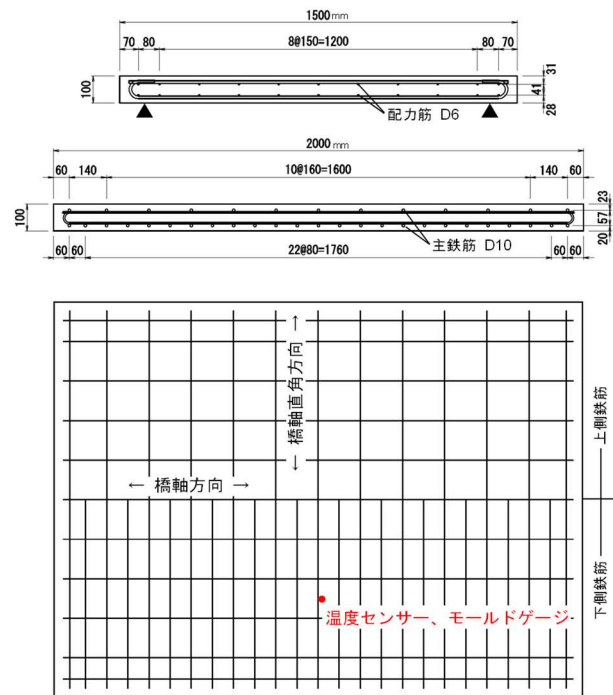


図-2 スラブ供試体の形状寸法、配筋
(上:橋軸直角方向断面 中:橋軸方向断面 下:平面図)

表-1 配合表

W/C (%)	Air (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)			
			W	C	S	G
65	2.0	48.6	171	263	939	1007

表-2 材料特性

コンクリート 圧縮強度 (N/mm ²)	鉄筋 降伏強度 (N/mm ²)
23.9	380

表-3 実験変数と供試体名

	健全	凍害
中央荷重	C	CF
偏心荷重	S	SF

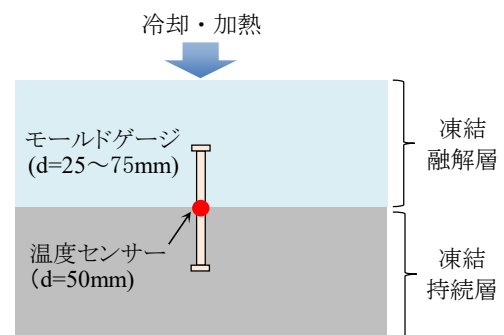


図-3 温度センサーとモールドゲージの設置位置

3. 静的荷重試験結果

各荷重点直下の変位を用いて作成した各供試体の荷重－変位曲線を図-5 に示す。図中の○印は最大荷重時を示す。なお、表-2 の材料特性を用いて、コンクリート標準示方書⁸⁾に準拠して算出した供試体 C の押し抜きせん断耐力は 82kN であった。また、供試体下面のひび割れ状況を写真-3, 4, 7, 8 に、荷重終了後の供試体切断面を写真-5, 6, 9, 10 に示す。

3.1 供試体 C

図-5 に灰色で示す供試体 C に関しては、変位 20.7mm で最大荷重 134kN に達した。最大荷重に達した直後、荷重が急落して破壊に至った。その際、供試体下面では、写真-3 に黒線で示す押し抜きせん断コーンが急激に発生した。また、写真-5 に示すように、この押し抜きせん断コーンのひび割れに連続する斜め引張りひび割れ（以下、「斜めひび割れ」）が橋軸直角方向と橋軸方向の両方の切断面で確認できた。

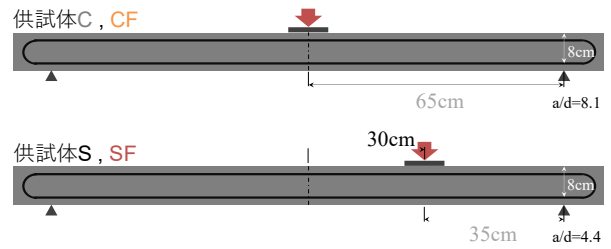


図-4 荷重位置は「中央」と「30cm 離れた位置」に設定

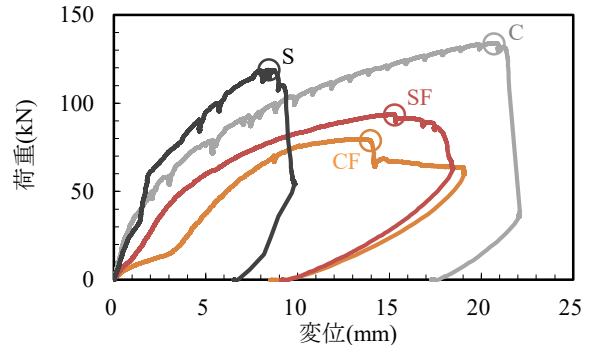


図-5 荷重－変位曲線

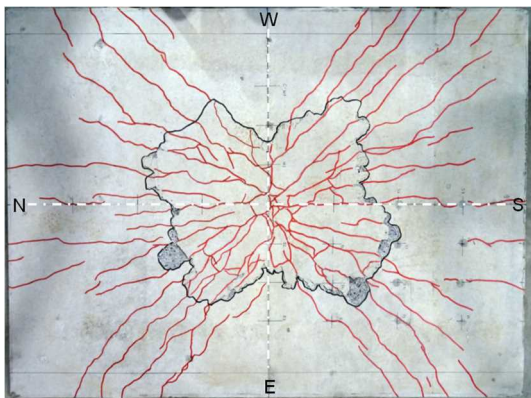


写真-3 下面のひび割れ状況（供試体 C）

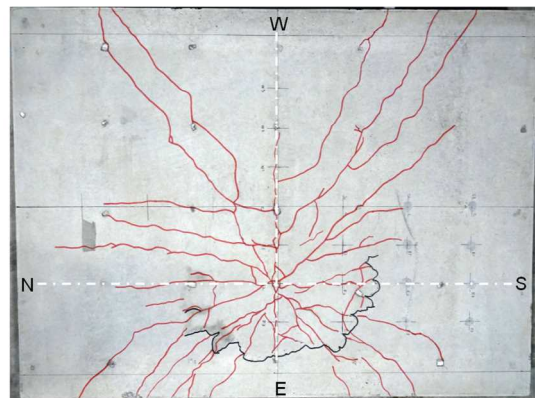


写真-4 下面のひび割れ状況（供試体 S）

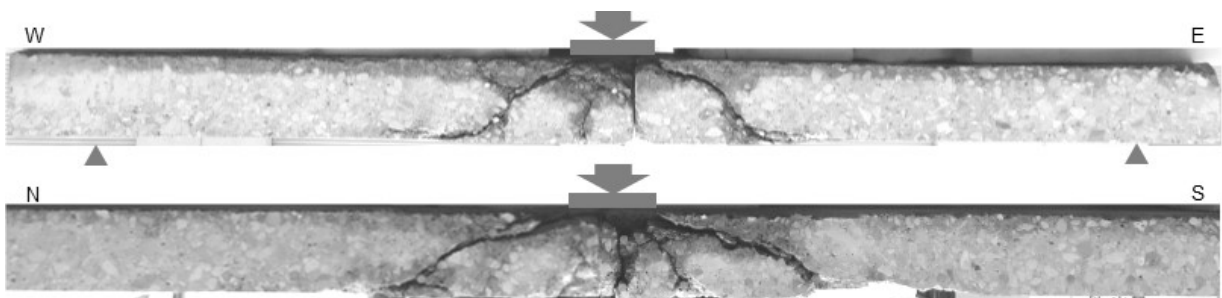


写真-5 供試体 C の切断面（上：橋軸直角 下：橋軸方向）

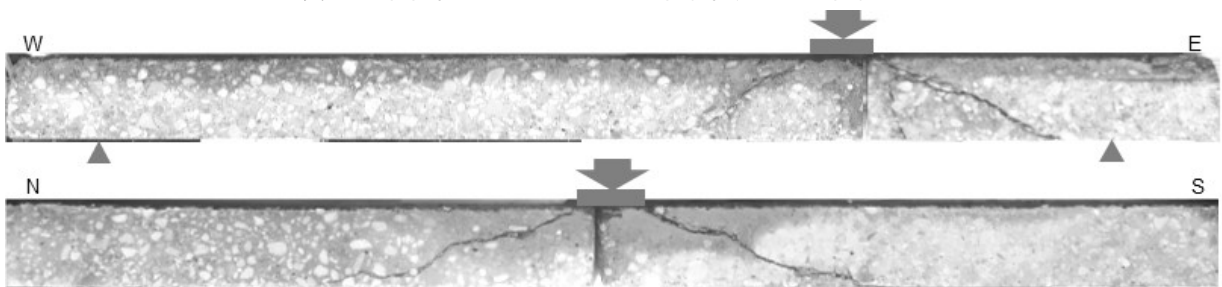


写真-6 供試体 S の切断面（上：橋軸直角 下：橋軸方向）

3.2 供試体 S

図-5 に黒色で示す供試体 S に関しては、荷重が 30kN 以上の領域において、供試体 C よりも剛性が大きくなった。このため、破壊時の変位は、供試体 C に比べて大幅に小さくなった (8.4mm, C の 40%)。また、その際の最大荷重は、供試体 C よりも小さかった (119kN, C の 89%)。破壊後、荷重が急落したことは供試体 C と同じだったが、押し抜きせん断コーンの出方は異なっていた。具体的には、写真-4 に示すように、押し抜きせん断コーンは支点側の半分にしかならず、コーンに連続する斜めひび割れは支点側にしか生じていなかった (写真-6 上)。

3.3 供試体 CF

供試体 CF (凍害) に関しては、図-5 に橙色で示すように荷重初期の段階から、供試体 C (健全) に比べて剛性が低下した。その後、変位・荷重ともに供試体 C よりも小さな値で破壊に至った。具体的には、破壊時の変位は 13.5mm (C の 65%)、最大荷重は 80kN (C の 60%) で

あった。一方、破壊後の挙動に関しては、供試体 C や S とは異なる傾向を示した。具体的には、以下のとおりである。最大荷重に達した直後、一旦は荷重が低下したものの、供試体 C のように急落はしなかった。また、写真-7 に示すように、供試体下面には押し抜きせん断コーンは発生しなかった。

しかし、写真-9 上に示すように、供試体内部では、斜めひび割れが発生しており、支点付近では斜めひび割れが主鉄筋に沿って進展し、付着割裂ひび割れのようになっていた。供試体下面に押し抜きせん断コーンが発生しなかったのは、このためである。また、写真-9 下に示すように、供試体内部には凍結融解作用による水平ひび割れが発生していた。

3.4 供試体 SF

供試体 SF (凍害) に関しても、図-5 に赤色で示すように荷重初期の段階から、供試体 S (健全) に比べて剛性が低下した。その後、供試体 S に比べて最大荷重が小

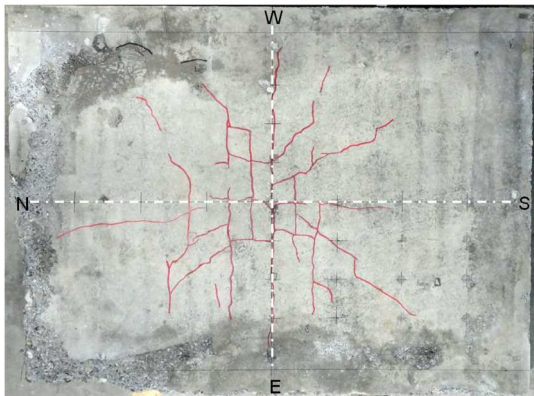


写真-7 下面のひび割れ状況 (供試体 CF)

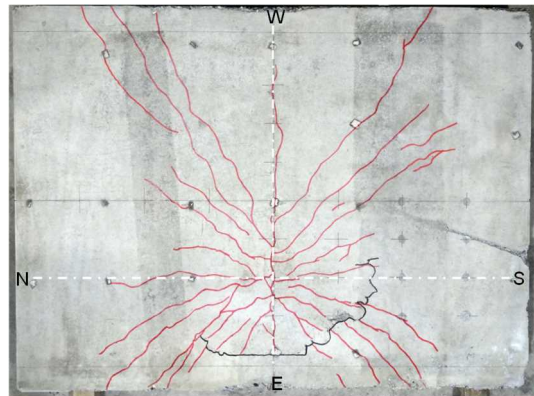


写真-8 下面のひび割れ状況 (供試体 SF)

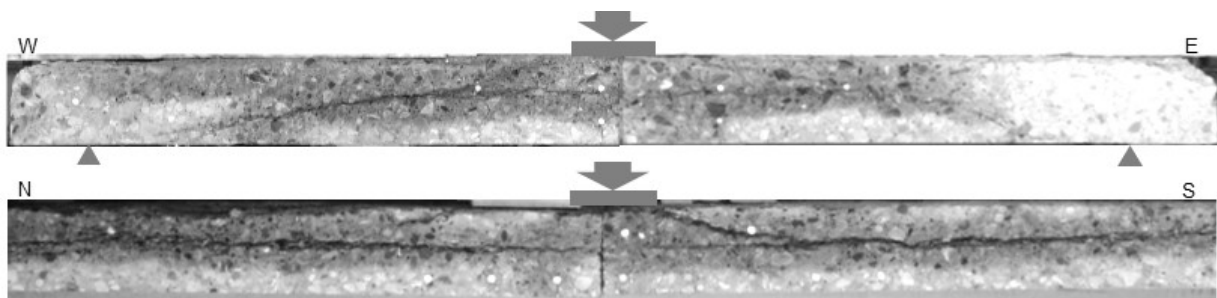


写真-9 供試体 CF の切断面 (上：橋軸直角 下：橋軸方向)

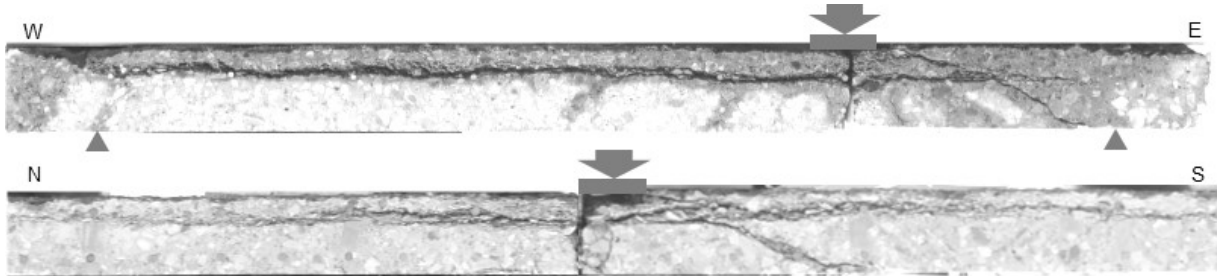


写真-10 供試体 SF の切断面 (上：橋軸直角 下：橋軸方向)

さくなる傾向は、供試体 CF と同様であった (93kN, S の 78%)。しかし、破壊時の変位に関しては、供試体 CF とは傾向が異なり、供試体 S よりも破壊時の変位は大きくなった (15.3mm, S の 182%)。

また、破壊後の挙動に関しても、供試体 CF とは傾向が異なり、むしろ供試体 S と同様であった。具体的には、斜めひび割れが支点側にのみ発生し、押し抜きせん断コーンが支点側の半分にしかならなかったことは、供試体 S と同様であった (写真-10 上, 写真-8)。なお、供試体内部に凍結融解作用による水平ひび割れが発生していたことは、供試体 CF と同様であった (写真-10)。

3.5 静的載荷試験結果のまとめ

以上の結果をまとめると以下ようになる。次章以降ではこれらの違いが生じた理由について考えていきたい。

- (1) 供試体 C に比べて、供試体 S では耐力や破壊時の変位が小さくなった。
- (2) 健全供試体 C と S に比べて、凍害劣化を受けた供試体 CF と SF の耐力は小さくなった。
- (3) また、破壊時の変位に関して、供試体 CF では供試体 C よりも小さくなったが、供試体 SF では供試体 S よりも大きくなった。
- (4) 供試体 CF では、押し抜きせん断コーンは発生しなかった。

4. 供試体 S の耐力が小さくなった理由

既往の研究⁴⁾では、中央載荷の時と比べて偏心載荷の方が耐力は小さくなることを指摘している。今回の小型供試体においても、このことが再現されたと言える。ただし、既往の研究⁴⁾では、ある偏心量までは耐力が低下するが、偏心量がさらに大きくなると、再び耐力が増加することも指摘している。また、偏心載荷を受けるスラブの耐力が低下する理由として、別の既往研究⁵⁾では、偏心載荷させた場合に、スラブに作用するせん断力が大きくなることが要因であることを指摘している。

5. 凍害スラブの破壊性状の変化に関する考察

5.1 供試体 CF の破壊性状の変化に関する考察

供試体 CF の破壊性状については、静的載荷と疲労載荷という違いはあるものの、前回⁶⁾行った大型のスラブ供試体とほぼ同じだった。具体的には、押し抜きせん断コーンが発生しなかったことや破壊時の変位が小さくなったことなどである。このことは、凍害劣化によるスラブの破壊性状の変化に関して、小型供試体においても、その再現性が担保されていることを意味している。また、前回の実験⁶⁾から、破壊性状を変化させる要因として、以下のことが関係していることが分かっている。

- (1) 凍害劣化に伴う引張強度の低下に起因して、上面側

の劣化部分に斜めひび割れが発生したこと

- (2) 凍結融解作用による水平ひび割れによって、荷重を支えるスラブの厚さが減少したこと

今回の実験でも、劣化部の斜めひび割れと水平ひび割れが発生していたことから、同様のメカニズムで破壊性状が変化したものと考えられる。以下、その内容について述べる。

(1) 押し抜きせん断コーンが発生しなかった理由

まず、押し抜きせん断コーンが発生しなかった理由について考えてみたい。写真-9 に示すように、供試体 CF は、斜めひび割れと水平ひび割れによって、上の部分(上版)と下の部分(下版)に分離している。そのため、スラブに作用する荷重は、せん断コーンを介して、厚さが薄くなった下版のみで支えることになる。しかし、下版は厚さが薄くなっているため、供試体 C よりも小さな荷重で破壊する。以下は、その破壊プロセスである。

- (1) 下版の「載荷点側」には、直接、荷重が載っているため、下方向に下がろうとする。
- (2) 一方、「支点側」は、支点によって支えられているため、あまり下がらない。
- (3) このため、下版にせん断変形が生じる。
- (4) このせん断変形が一定程度に達すると、斜めひび割れが発生し、破壊に至る。

なお、斜めひび割れが発生して、せん断破壊に至るような RC 梁では、斜めひび割れが主鉄筋に沿って進展し、付着割裂ひび割れが発生する場合があるとされている⁹⁾。今回の供試体 CF でも同様のことが起こったため、押し抜きせん断コーンが発生しなかったと考えられる。すなわち、斜めひび割れが主鉄筋に沿って進展し、スラブ下面に到達しなかったため、結果として押し抜きせん断コーンが発生しなかったということである。なお、上版と下版とが重ね梁のようになったことで、下版が点載荷ではなく面載荷のような状態になったことも影響していると考えられる。

(2) 破壊時の変位が小さくなった理由

次に、破壊時の変位が小さくなった理由について考えてみたい。前述したように、供試体 CF では、荷重を支えている下版の厚さが薄くなっている。このことに起因し、供試体 CF では、供試体 C に比べて荷重とたわみが小さな段階で、破壊に至るような斜めひび割れが発生する。すなわち、スラブ厚が薄くなったことが、供試体 CF の破壊時の変位が小さくなった原因であると考えられる。

5.2 供試体 SF の破壊時の変位が大きくなった理由

次に、供試体 S に比べて供試体 SF の破壊時の変位が大きくなった理由について考えてみたい。

供試体 SF が供試体 S と大きく異なる点は、2点ある。1点目は、凍結融解作用による水平ひび割れが発生して

いるため、荷重を支えている下版の厚さが薄くなっていることである。2点目は、見かけ上のせん断スパン比が供試体 S に比べて大きくなっていることである。図-6は、説明のための概念図である。図のように、载荷点から支点までのスパン長は両者とも同じである。一方、荷重を支えるスラブ厚に関しては、供試体 S に比べ供試体 SFの方が薄くなっている。そのため、両者の見かけ上のせん断スパン比を比較すると、供試体 S に比べ供試体 SFの方が大きくなる。このことが、供試体 SFの破壊時の変位が大きくなった理由に関係していると考えられる。それは、前章で述べた供試体 C と供試体 S の関係と似ているからである。具体的には、以下のとおりである。

中央载荷を行った供試体 C は、十分な曲げ変形性能を發揮したため、破壊時の変位も比較的大きかった。一方、偏心载荷を行った供試体 S は、供試体 C に比べてせん断スパン比が小さかったため、変位が比較的小さな段階で破壊に至った。いわば RC 梁の「せん断破壊」のような破壊形式となった。同様のことが供試体 S と供試体 SFにも言えると考えられる。すなわち、供試体 SF では、せん断スパン比が大きくなったため、供試体 C のように曲げ変形性能が大きくなり、破壊時の変位が大きくなったと考えられる。ただし、供試体 SF では、荷重を支えている下版の厚さが薄くなっているため、剛性や破壊時の変位が供試体 C に比べて小さくなるのは、前節で述べた供試体 CF の場合と同様である。なお、供試体 CF は、前述したように、凍害劣化によって見かけのせん断スパン比が大きくなったにも関わらず、供試体 SF とは逆に破壊時の変位は小さくなった。これは、中央载荷の場合、劣化深さが小さいうちは破壊時の変位は大きくなるが、劣化深さが大きくなりすぎると、荷重を支える下版が薄くなり、斜めひび割れが発生しやすくなるためである⁶⁾。

6. まとめ

凍害によって劣化した RC スラブが偏心载荷を受けた場合に、中央载荷の場合と比べて耐力や破壊性状がどのように変化するのかを明らかにするため、静的载荷試験による検討を行った。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) 偏心载荷した健全スラブは、中央载荷した健全スラブに比べて耐力が小さくなった。
- (2) 凍害スラブは、中央载荷、偏心载荷ともに、健全スラブに比べて耐力が低下した。これは凍結融解作用による水平ひび割れによって、荷重を支えるスラブの厚さが減少したからだと考えられる。
- (3) 中央载荷した凍害スラブは、破壊時に押し抜きせん断コーンが発生しなかった。これは斜めひび割れが主鉄筋に沿って進展し、スラブ下面に到達しなかったからだと考えられる。

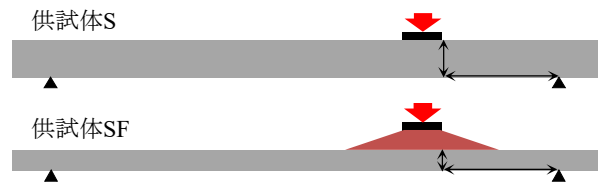


図-6 見かけ上のせん断スパン比の違い(概念図)

- (4) 偏心载荷した凍害スラブは破壊時の変位が偏心载荷した健全スラブよりも大きくなった。これはスラブ厚が減少したことでせん断スパン比が大きくなり、変形性能が高まったからだと考えられる。

今回の実験は、(1) 供試体が小型であること、(2) 境界条件が2辺単純支持であること、(3) スラブ供試体の支持部にハンチがないことなど、実橋床版とは条件が異なる。したがって、今回の知見が実橋床版で成り立つかどうかについては、更に検証を行っていく必要がある。

参考文献

- 1) 土木研究所：道路橋コンクリート床版の土砂化対策に関する調査研究，土木研究所資料，第 4398 号，2020。
- 2) 澤松俊寿，岡田慎哉，西弘明，三田村浩，松井繁之：46 年間供用した寒冷地における道路橋 RC 床版の劣化損傷状況，土木学会第 68 回年次学術講演会講演概要集，I-414，pp.827-828，2013。
- 3) 中村拓郎，角間恒，西弘明：北海道における道路橋 RC 床版の土砂化に関する傾向分析，コンクリート工学年次論文集，Vol.41，No.2，pp.1327-1332，2019。
- 4) 東山浩士，松井繁之，伊藤定之：偏心载荷した RC 床版の押し抜きせん断耐荷力，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.3，pp.517-522，2001.7
- 5) 加藤貴久，細川真利，西弘明，渡辺忠朋：輪荷重試験機を用いた中央载荷・偏心载荷による CFRP プレート補強 RC 床版の疲労耐久性に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.2，pp.427-432，2013.7
- 6) 林田宏：水平ひび割れの位置や凍害劣化深さの違いが床版の疲労寿命低下に与える影響，寒地土木研究所月報，No.843，pp.19-26，2023.4
- 7) 林田宏：凍結融解作用で上筋付近に水平ひび割れが発生し，上半分が凍害劣化を受けた RC スラブの静的载荷試験，コンクリート工学年次論文集，Vol.44，No.1，pp.520-525，2022.7
- 8) 2012 年制定 コンクリート標準示方書 [設計編]，土木学会，2013
- 9) コンクリート診断技術 [応用編]，日本コンクリート工学会，2022