

タイトル	乾燥収縮を生じた一方向鋼板コンクリート合成版のせん断破壊挙動
著者	高橋, 良輔; Takahashi, Ryosuke
引用	工学研究: 北海学園大学大学院工学研究科紀要(22): 35-41
発行日	2022-09-30

研究論文

乾燥収縮を生じた一方向鋼板コンクリート合成版のせん断破壊挙動

高橋 良輔*

Shear failure behavior of one-way steel-concrete composite slab subjected by dry shrinkage

Ryosuke Takahashi*

要旨

鋼板を引張補強材とした鋼板コンクリート合成床版を梁状に切出した供試体に対し、道路橋床版としての使用環境を考慮して部材上面のみに乾燥収縮を生じさせた後、載荷実験を行い、乾燥収縮が鋼板コンクリート合成版のせん断破壊挙動に及ぼす影響について検討を行った。その結果、ずれ止めであるスタッドの間隔の大小に関わらず、乾燥収縮によりせん断耐力が35%~45%低下した。収縮ひび割れは目視で確認できなかったが、破壊時のひび割れ性状が乾燥収縮により変化しており、微細な収縮ひび割れがせん断抵抗機構に影響した可能性が考えられる。

1. 序論

現在、我が国では構造物の長寿命化、耐久性の向上が最大のテーマとなっている。特に、高度経済成長期に建造された構造物は更新期を迎え、塩害、凍害などによって生じた様々な材料劣化が構造物の性能に影響を及ぼしている。これら材料劣化が生じた構造物を更新するためには多大なコストと時間を要することから、現在、構造物の性能を確保しつつより効率的に維持管理を行うための研究、技術開発が盛んに行われている。

鋼板コンクリート合成版は、鋼板とコンクリートをずれ止めによって一体化し、鋼板を引張補強材として利用する構造部材である。かぶりやあきが必要となることから、同一筋材量のRC床版に比べて版厚を薄くでき、また、配筋が不要で鋼板を型枠としても用いることができるため施工性の省力化が期待できる部材であり、道路橋床版をはじめ、多く採用されている複合構造部材である。

この部材は版部材であるため、体積に対する表面積の割合が大きく乾燥収縮による影響を大きく受けると考えられるが、乾燥収縮が生じた場合、

片面が鋼板に覆われていることから、収縮差と鋼板による拘束により曲げひび割れが発生する可能性が考えられる。

乾燥収縮がコンクリート構造物に及ぼす影響については、これまで主にひび割れによる耐久性への影響に関する研究事例が多い。一方、構造性能に及ぼす影響については、部材や構造物の破壊挙動に及ぼす影響について十分には明らかとなっていない。兵頭ら¹⁾は、乾燥収縮が生じたせん断補強筋のないRCはりの曲げせん断載荷実験を行い、コンクリートの自由収縮は600 μ 程度の時にせん断耐力が平均で10~15%低下することを報告している。この時、実験供試体には、乾燥収縮を鉄筋が拘束することにより生じた微細なひび割れが確認されており、そのひび割れが耐力低下に影響したと結論づけている。また、実験結果から収縮の影響を考慮した等価引張鉄筋比を既存のせん断強度評価式に組込むことにより、実測値を高い精度で予測できるとした。

同様に合成版においても、せん断耐力が低下する可能性が考えられるが、これまでに乾燥収縮が合成版のせん断挙動に及ぼす影響については明ら

* 北海学園大学大学院工学研究科建設工学専攻（社会環境系）

Graduate School of Engineering (Civil and Environmental Eng.), Hokkai-Gakuen University

かとなっていない。そこで本研究では、特に道路橋に用いられる場合の境界条件を有する一方向合成版を対象とし、一方向合成版をモデル化したはりに乾燥収縮を与えた後、静的載荷実験を行い、乾燥収縮の有無によるせん断破壊挙動の違いについて検討を行った。

2. 実験概要

2.1 実験供試体

複合構造示方書設計編²⁾における一方向版のせん断耐力算定では、一方向版をはり部材とみなしている。そこで本研究では、一方向版をはり部材としてモデル化した供試体を作成した。

供試体の形状寸法を図 1、諸元を表 1 に示す。供試体は全てせん断破壊するように設計した。引張補強鋼板には厚さ 6 mm の一般圧延鋼板 SS 400（実降伏強度 307 N/mm²）を使用した。有効高さは 197 mm で補強鋼材比は 0.03、せん断スパン比は 3.05 である。ずれ止めには高さ 50 mm の

頭付きスタッド（軸径 13 mm、頭部直径 25 mm、頭部厚 8.5 mm）を使用し、支間外には端部定着を確保するために高さ 110 mm の頭付きスタッドを 50 mm 間隔で配置した。頭付きスタッドの強度は実降伏強度 421 N/mm²、引張強度 491 N/mm²であった。表 1 に示すコンクリート圧縮強度は、いずれも載荷実験終了時の圧縮強度である。

実験パラメータはスタッド間隔（70 mm、260 mm）と乾燥収縮の有無とした。SD シリーズは乾燥収縮を生じた供試体、SW シリーズは乾燥収縮の無い供試体である。供試体名の数値はスタッド間隔を表す。本研究ではスタッド間隔が 260 mm で乾燥収縮が無い場合として、本研究と同一諸元を有する供試体による高橋³⁾の実験結果を用いた。それらの諸元も表 1 に合わせて示す。なお、スタッド間隔 70 mm の TW 70 の実験結果は本研究の SW-70 の結果と比較することで、TW 260 の実験結果を検討に用いる妥当性を示すために使用した。

SD シリーズの自由乾燥収縮を観測するため、100×100×400 mm の無筋供試体を、各供試体に一体ずつ作成し、各供試体と同一環境下で乾燥させた。

2.2 乾燥方法

道路橋床版における乾燥条件の違いによる収縮分布を考慮するため、側面をポリエチレンフィルムで 2 重に覆い上面だけが乾燥する状態にした。供試体上面側のフィルム端はテープによりシール

表 1 供試体諸元

No.	支間長 (mm)	鋼板厚さ (mm)	有効高さ (mm)	f_c' (N/mm ²)	スタッド間隔 (mm)	収縮
SW 70	1200	6	197	32.2	70	無
SD 70				36.7	70	有
SD 260				36.6	260	有
TW 70				42.8	70	無
TW 260				42.2	260	無

f_c' : コンクリート圧縮強度

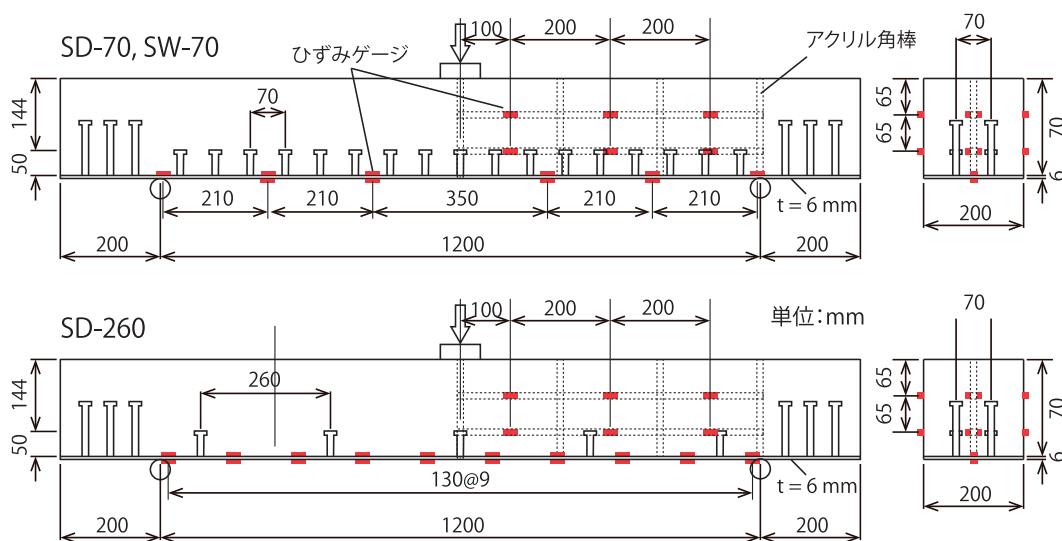


図 1 供試体形状寸法

した。乾燥期間中、供試体は垂木の上に静置したが、その際、コンクリートの収縮による供試体の変形を拘束しないようにテフロンシートを供試体と垂木の間に2枚重ねて敷設した。

乾燥収縮を導入する供試体は10日間養生した後、74日間乾燥状態にした。当初は、上面をポリエチレンフィルムにより密閉し、その中に不織布で梱包したシリカゲルを入れることで乾燥する方法を実施したが、密閉空間内の湿度が増加傾向を示したため、乾燥開始22日後に気中乾燥に変更した。供試体を乾燥期間中に静置した実験室は空調装置により20℃に保たれており、乾燥期間中の平均湿度は34%であった。

自由乾燥収縮を観測するための無筋供試体は、全表面を露出した状態で、同一条件乾燥条件となるように各供試体の上面に静置した。この時、収縮を拘束しないように丸棒を実験供試体と収縮観測供試体の間に複数個設置した。

自由収縮が生じている圧縮強度試験体の圧縮強度は低下していないと仮定し、乾燥させない供試体は乾燥供試体の圧縮強度を目標強度として作成し、2週間程度の材齢で載荷実験を行った。養生は湿布養生としたが、実験準備のため実験直前の1日程度は気中養生となった。

2.3 載荷方法

載荷試験方法を図1に示す。供試体は、ローラー支承による単純支持とし、石膏で接着させた幅80mm、厚さ20mmの鋼板を介して、油圧ジャッキによって支間中央に静的片押し載荷を行った。

2.4 計測項目

ひずみゲージにより、乾燥時および載荷時のひずみを計測した。各供試体のひずみゲージ設置位置を図1に示す。図中の赤い四角形がひずみゲージを表す。コンクリートひずみは乾燥時にのみ計測を行い、載荷実験時および乾燥させない供試体ではコンクリートひずみを計測していない。コンクリートひずみは、コンクリート用のポリエステルゲージを側面に貼付けて計測した他、一般箔ひずみゲージをアクリル角棒に貼付けてコンクリート中に埋込んで計測した。アクリル角棒には溝を切り、コンクリートとアクリル角棒との十分な付着を確保した。

鋼板ひずみは、軸ひずみを計測するため1箇所につきコンクリート面と外側（下面）にゲージを

設置した。

自由収縮の計測のため、無筋の角柱供試体には、100mm×200mmの面の中央位置にひずみゲージを貼付け、長手方向の軸ひずみを計測した。なおこの場合も、両側面の同じ位置にゲージを設置して、計測ひずみを平均して軸ひずみを得ている。

この他、載荷実験時には、変位計により支間中央変位と支点沈下を計測した。

3. 実験結果および考察

3.1 乾燥収縮ひずみ

図2に各乾燥供試体の自由収縮計測用の無筋角柱供試体のひずみ履歴、および図3、図4に乾燥させた各供試体の乾燥期間中のひずみ履歴を示す。図3は支間中央から100mmの位置、図4は500mmの位置の履歴である。また各図中には、供試体底面から70mmおよび135mmの位置の、供試体側面と内部のひずみ履歴を示した。図3および図4でSD70の高さ70mm・幅中央における収縮ひずみは途中からひずみの変動が極めて激しくなり、ひずみゲージまたはアクリル棒の破損が考えられたため、変動が激しくなる直前までの履歴を示した。

図2より、無筋角柱供試体は時間経過に伴って圧縮ひずみが増加しており、今回の乾燥条件によって乾燥収縮が生じていることが確認できる。2体ともほぼ同様の履歴となり、載荷実験直前の収縮ひずみは480~600 μ 程度であった。

図3、図4に示す各はり供試体のひずみ履歴も時間の経過とともに圧縮ひずみが増加し、乾燥収縮が生じている。計測位置でひずみの大きさは異

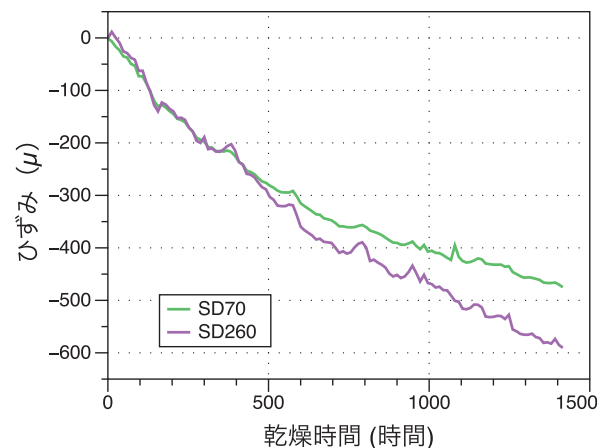


図2 無筋角柱供試体ひずみ履歴

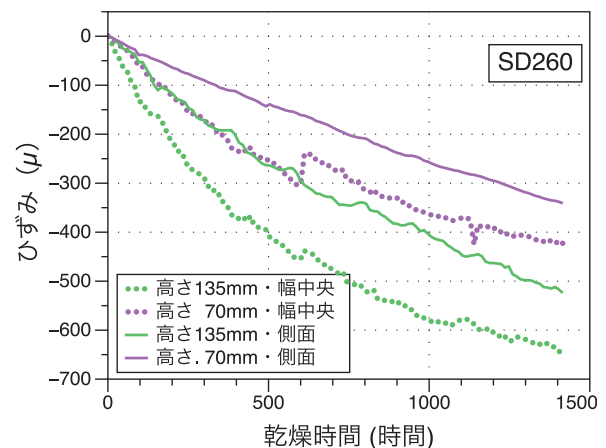
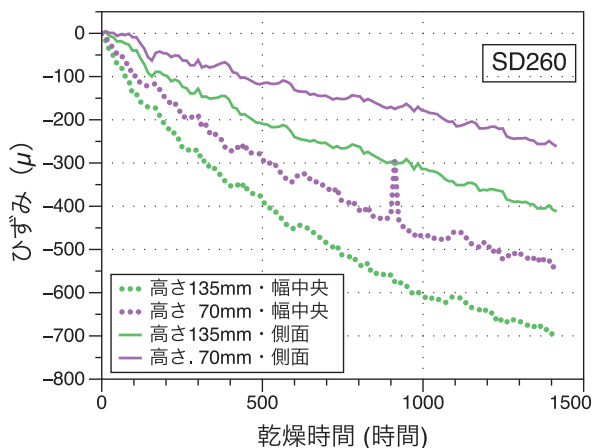
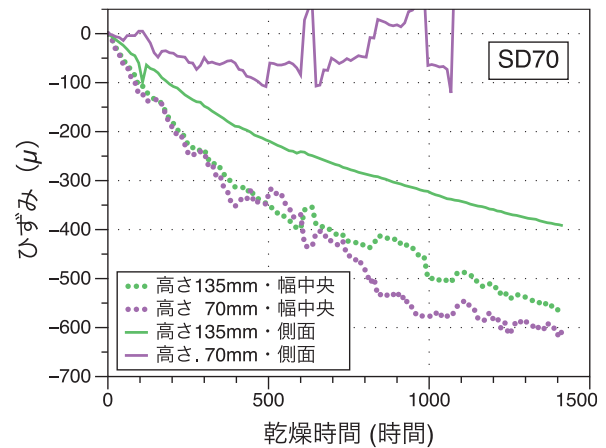
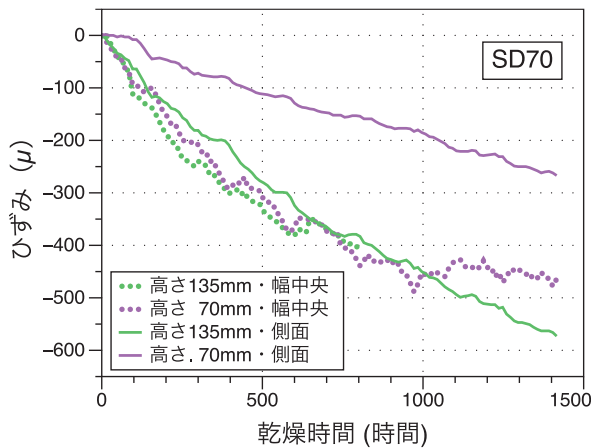


図3 乾燥期間ひずみ履歴
(支間中央から100 mm)

図4 乾燥期間ひずみ履歴
(支間中央から500 mm)

なるが、ひずみが大きい位置の値は自由収縮と同程度であった。

支間方向と幅方向で同じ位置のひずみを比較すると、乾燥面である部材上面に近い、高さ135 mm位置の収縮ひずみが、部材下面の鋼板に近い、高さ70 mm位置の収縮ひずみよりも大きい傾向が見られる。これは乾燥面側の方が、収縮が大きい影響が現れていると言える。幅方向については、はり内部の収縮ひずみがはり側面の収縮ひずみよりも大きくなる傾向となった。側面を覆うポリエチレンフィルムが効果がなく、側面が乾燥する場合にはこの傾向と逆になるため、この傾向は他の原因によるものと考えられる。ずれ止めであるスタッドによる拘束の影響が幅方向で変わるためとも考えられるが、本研究の範囲ではその原因を明らかにすることはできなかった。

兵頭らの実験¹⁾では乾燥収縮が拘束されることにより、コンクリート表面に微細なひび割れが生じていたことが報告されているが、本実験供試体においては目視ではひび割れを観測することはでき

なかった。

3.2 正規化荷重-支間中央変位関係

図5および図6には、圧縮強度の影響を除くために正規化した荷重と支間中央変位の関係を示す。また、表2には最大荷重と正規化した最大荷重、破壊形態を示す。全ての供試体では、後に示すように斜めのひび割れが貫通して急激な荷重低下を生じたことから、せん断破壊のうち斜め引張破壊であると断定した。複合構造標準示方書設計編²⁾に示される一方向鋼コンクリート合成版のせん断耐力算定式では、コンクリート圧縮強度 f'_c の影響は $\sqrt[3]{f'_c}$ として考慮されている。そこで、荷重を $\sqrt[3]{f'_c}$ で除して正規化を行なった。

図5より、スタッド間隔が70 mmで乾燥収縮を生じていないTW70とSW70は、概ね同じ正規化荷重-支間中央変位関係となり、特に正規化最大荷重はほぼ等しくなった。このことから、本実験は高橋の実験³⁾をほぼ再現できており、高橋の実験結果と本実験結果を比較することは妥当で

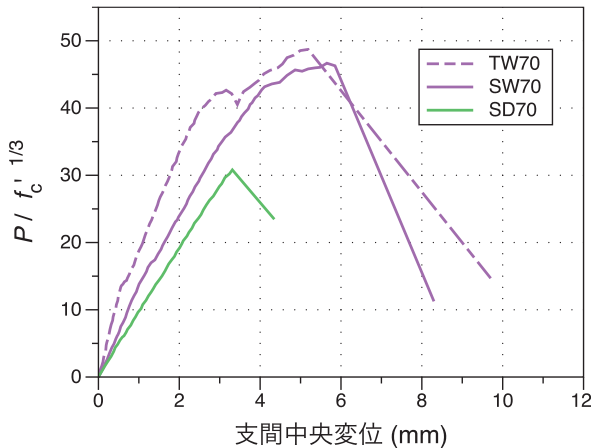


図5 正規化荷重-支間中央変位関係
(スタッド間隔 70 mm)

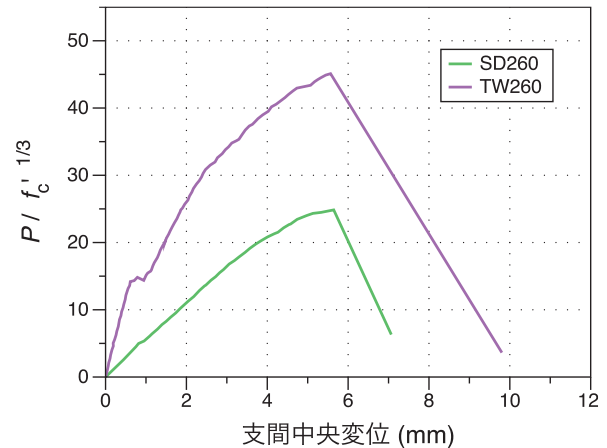


図6 正規化荷重-支間中央変位関係
(スタッド間隔 260 mm)

あると言える。乾燥収縮を生じた SD 70 の正規化最大荷重は、SW 70 の 66% となり大幅に低下した。一方、正規化荷重-支間中央変位関係の傾きは、SD 70 が SW 70 に比べて小さいように見えるが、同一諸元である TW 70 と SW 70 でも同程度の差があることから、その差が乾燥収縮の影響によるものとは断定できなかった。

図 6 はスタッド間隔がより大きい SW 260 と SD 260 との比較である。こちらも乾燥収縮を生じた SD 260 の正規化最大荷重が、収縮を生じていない SW 260 の 55% と大幅に低下している。このこととスタッド間隔 70 mm の結果から、一方向鋼板コンクリート合成版のせん断耐力は、スタッド間隔によらず乾燥収縮によって減少することがわかる。今回の実験では、スタッド間隔が大きい方が最大荷重の低下率が大きくなった。低下率の差は 10% 程度であるため断定はできないが、スタッド間隔が大きい方が乾燥収縮によるせん断耐力の低下が大きい可能性が考えられる。

正規化荷重-支間中央変位関係の傾きについても乾燥収縮を生じると大幅に低下していることがわかる。70 mm の結果でも乾燥収縮を生じる場合の傾きが最も小さかったことから、断定はできないものの乾燥収縮を生じると正規化荷重-支間中央変位関係の傾きも減少する可能性が考えられる。これについては今後、さらに複数の荷重実験を行い調査する必要がある。

兵頭らの RC はりの実験²⁾では自由収縮ひずみが $300 \mu \sim 600 \mu$ 程度の場合に 8~20% のせん断耐力低下が確認されている。一方、本実験では自由収縮ひずみが $500 \sim 600 \mu$ と兵頭らの実験と同程度で、乾燥収縮を生じた場合の最大荷重の低下

表 2 せん断耐力

供試体	圧縮強度 (N/mm^2)	最大荷重 (kN)	正規化 最大荷重	破壊形態
SD 70	36.7	102.4	30.8	斜め引張 破壊
SW 70	32.6	147.2	46.7	
SD 260	36.6	82.5	24.9	
TW 260	42.2	157.4	45.1	

は 35%、45% と兵頭らの実験よりも低下量が大きい。補強筋量等の諸条件が異なるために直接的な比較はできないが、乾燥収縮によるせん断耐力低下は合成版の方が RC より大きい可能性が考えられる。

3.3 ひび割れ性状

図 7 に各供試体の荷重試験によるひび割れ性状を示す。赤線で示したひび割れは荷重低下直前に発生したものであり、全ての供試体において斜めひび割れが載荷板周辺の部材上面に貫通して荷重低下に至ったことがわかる。乾燥収縮を生じた供試体 SD 70 と SD 260 は、生じていない供試体 SW 70 と SW 260 に比べて曲げひび割れが多いように見える。曲げひび割れはスタッドによりコンクリート断面の小さくなる位置、すなわちスタッドに沿って発生すると考えられるため、特にスタッド間隔が小さい供試体においてその傾向は顕著であった。今回、目視では収縮によるひび割れを観測できなかったが、目視では確認できない微細ひび割れが載荷前に収縮によって生じておりそれが載荷によって開いた可能性が考えられる。

また、図 8 に写真で示した破壊後の斜めひび割れ状況からわかるように、斜めひび割れは収縮が

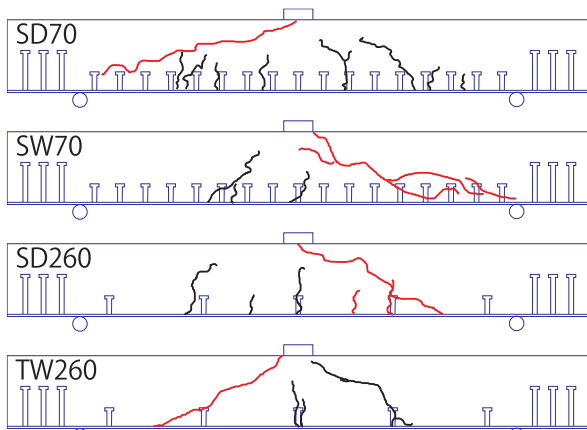


図 7 正規化荷重-支間中央変位関係 (スタッド間隔 260 mm)

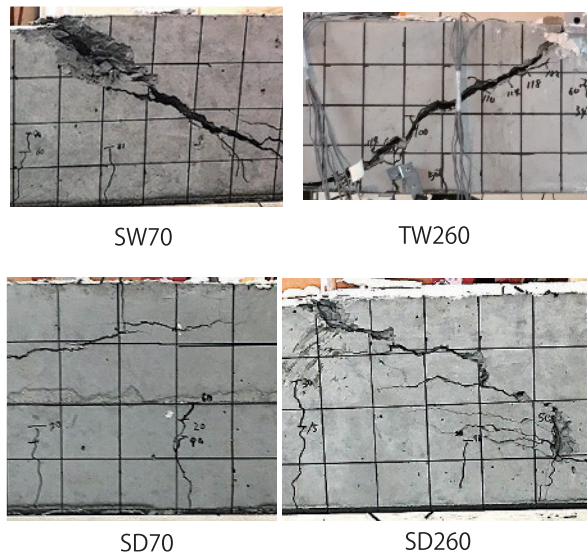


図 8 部材上面貫通部の斜めひび割れ性状

ない場合、急激に大きく開口、貫通して荷重低下したが、収縮を生じている場合には、荷重低下時のひび割れ開口は小さく、部材上部への貫通も収縮がない場合のように明瞭ではなかった。

以上のように、乾燥収縮の有無によって破壊ひび割れ性状が変化することがわかった。本実験における破壊形態は斜め引張破壊であり、このひび割れ性状の違いにより最大荷重の違いが生じたと考えられるが、具体的に最大荷重の低下に影響を及ぼすひび割れ性状については明確ではなく、その説明は今後の課題である。

3.4 鋼板ひずみ分布

図 9 に各荷重時の鋼板ひずみ分布を示す。SD

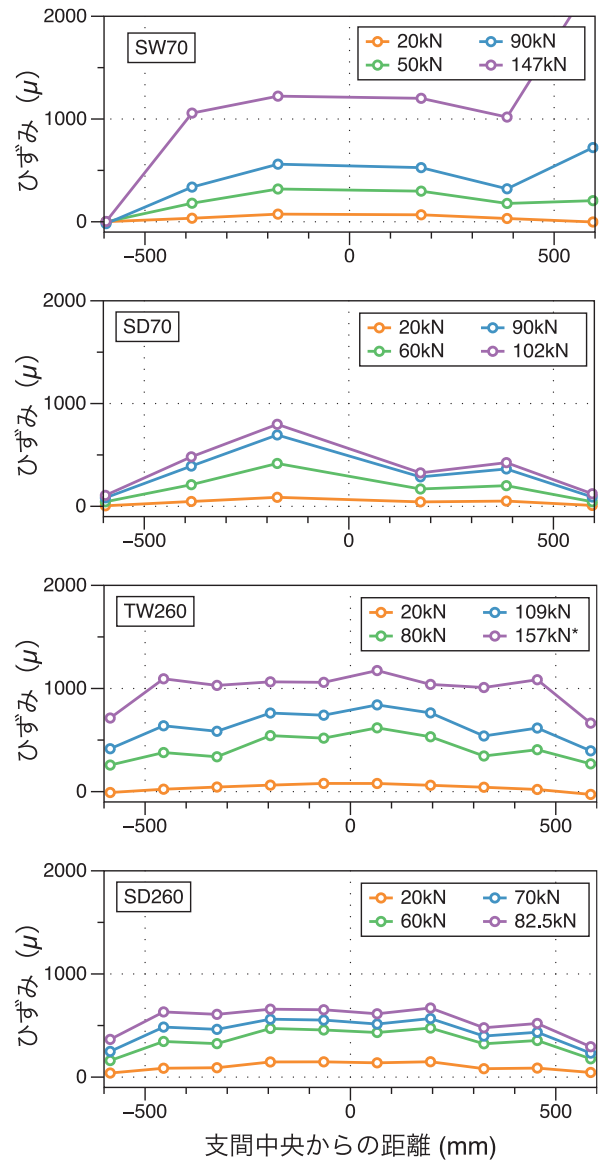


図 9 鋼板ひずみ分布

70 はひずみゲージの損傷によるためか、支間中央から +175 mm の位置のひずみがほとんど増加しなかった。従って、スタッド間隔が 70 mm の SW 70 と SD 70 の違いについては、-175 mm と -500 mm の 2 点のひずみから判断すると、ひずみ分布の形状（傾き）や、荷重の増加に対するひずみの増加割合に顕著な違いは見られなかった。スタッド間隔が 260 mm の TW 260 と SD 260 の違いについては、80 kN 付近でのひずみ分布が、乾燥収縮が無い TW 260 の方が凸形状に見えるが、顕著な違いは見られなかった。なお、スタッド間隔 70 mm の分布形状が上に凸であるのに比べて、スタッド間隔 260 mm の分布形状が平らであるのは、スタッド本数が少ないため鋼板とコン

クリート間での力の伝達が少ないことによるものである。これは一般的に考えられるスタッド間隔の影響に一致する。

以上から、単純に、微細な収縮ひび割れによる載荷時のひび割れ性状の変化がせん断耐力の低下の原因である可能性が考えられる。

4. 結論

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) スタッド間隔によらず、乾燥収縮により一方鋼板コンクリート合成版のせん断耐力が低下することが確認された。また、スタッド間隔が大きくなるにつれて耐力の低下割合が大きくなる可能性が示された。
- (2) 既往の実験との比較から、乾燥収縮が及ぼすせん断耐力への影響はRCはりよりも一方鋼板合成版の方が大きい可能性がある。
- (3) 載荷時のひび割れ性状は乾燥収縮により変化することがわかった。乾燥収縮により曲げひび割れが増加し、乾燥収縮が無い場合に比べて急激かつ大きな斜めひび割れ開口とはならない。このひび割れ性状の違いは、今回は観測されなかったが微細な収縮ひび割れによるもので

ある可能性が考えられる。

- (4) 載荷時の鋼板のひずみ分布には、収縮の有無で顕著な違いは見られなかった。このことから、収縮により生じた初期ひび割れによるひび割れ性状の変化がせん断耐力の低下の原因である可能性が考えられる。

謝辞：本研究は秋田大学工学部（当時）の杉原雄斗氏に多大なる協力をいただきました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 兵頭彦次, 佐藤良一, 河合研至, 半井健一郎: せん断補強筋のないRCはりのせん断耐荷挙動に及ぼすコンクリートの収縮の影響, 土木学会論文集 E2, Vol.73, No. 1, 50-69, 2017.
- 2) 土木学会複合構造委員会: 2014年制定 複合構造標準示方書 原則編・設計編, 土木学会, 2015.
- 3) 高橋逸陸, 高橋良輔, 古内 仁: スタッド間隔が鋼コンクリート合成版のせん断挙動に与える影響, 土木学会東北支部技術研究発表会講演概要集, Vol.53, No.4, CD-ROM, 2017.