

論文 乾燥収縮ひび割れが RC はりのせん断耐力に及ぼす影響

森戸 重光*1・半井 健一郎*2

要旨：近年、骨材の品質低下によるコンクリートの収縮ひずみの増大や高耐震化のための鉄筋量の増大などにより、構造物に収縮ひび割れが生じることが問題となっている。本研究では、乾燥収縮により初期ひび割れを導入した RC はり供試体を作製し、初期ひび割れがせん断耐力に及ぼす影響を実験的に検討した。その結果、乾燥収縮ひび割れが生じた供試体は、無収縮供試体と比較し、斜めひび割れ発生荷重および終局時のせん断耐力は低下するが、初期ひび割れによる斜めひび割れの進展の阻害により終局時のせん断耐力は計算値以上であることなどが分かった。

キーワード：乾燥収縮，初期ひび割れ，せん断耐力，ひび割れ進展，せん断補強筋

1. はじめに

コンクリート構造物中のコンクリートに発生する収縮ひずみが、部材内部の鉄筋や接合部材などによって拘束されると、コンクリートに収縮応力が発生する。この収縮応力は構造体中のコンクリートの見かけの引張強度を低下させ、耐荷力の低下や収縮ひび割れによる耐久性の低下を引き起こす原因となる。これまでにも、コンクリートの収縮がコンクリート構造物の力学性能に及ぼす研究は数多く行われてきた^{1), 2)}。最近では、高強度コンクリートの自己収縮により生じる収縮応力が、構造物の変形、曲げひび割れ幅やせん断耐力に及ぼす影響に関する実験結果の報告や、収縮・膨張の影響を考慮したせん断耐力の評価方法の提案がなされている^{3), 4)}。

また、近年の骨材事情の変化に伴うコンクリートの収縮ひずみの増大が報告されており⁵⁾、2007年版の土木学会コンクリート標準示方書でも設計上の扱いが検討されている⁵⁾。この収縮ひずみの増大の理由は、セメントペーストの収縮を拘束するはずの骨材自体の収縮が原因とされている⁶⁾。コンクリートに生じた過大な収縮による収縮ひび割れの発生は、実構造物における問題としても報告されている⁷⁾。また、収縮ひび割れの発生は、曲げ剛性を低下させるものの、曲げ耐力は変化させないとの研究報告もある¹⁾。

コンクリートの収縮ひずみや収縮ひび割れがコンクリート構造物の性能を低下させるとの報告がある一方で、初期ひび割れや人工亀裂によるせん断耐力の向上も

報告されている^{8), 9), 10)}。初期ひび割れがせん断耐力を向上させる理由としては、はりの変形が初期ひび割れ部分に集中したことにより、斜めひび割れが発生せずに破壊に至ったことが指摘されている⁸⁾。また人工亀裂の場合、RC部材がタイドアーチ的な効果を発揮させることで、部材のせん断耐荷能力が向上することが知られている^{9), 10)}。これらの研究では、外荷重や埋設物によって損傷を導入した実験を行っているが、実構造物における収縮ひび割れの影響を議論するうえでは、ひび割れの存在に加え、収縮応力の影響を含めた議論が必要になるものと考えられる。

そこで本研究では、乾燥収縮によって発生した初期ひび割れがコンクリート構造物のせん断耐力に及ぼす影響を分析することを目的とし、実験による検討を行うこととした。すなわち、コンクリートの乾燥収縮を使用材料や配合により促進させ、RCはり供試体に乾燥収縮による初期ひび割れを導入したRCはり供試体および、乾燥収縮を抑制した無収縮のRCはり供試体を作製し、載荷試験を行い、初期ひび割れの本数や、進展状況がせん断耐力に及ぼす影響を比較検討する。

2. 実験概要

2.1 コンクリートの配合

RCはり供試体に乾燥収縮による初期ひび割れを発生させるため、配合および使用材料によって乾燥収縮の大きなコンクリートを製造した。単位水量 315kg/m³と大き

表-1 コンクリートの配合

配合名	W/B (%)	単位量 (kg/m ³)										
		水 W	セメント C	膨張材 Ex	石灰石微粉末 L	細骨材 S	粗骨材 GA	粗骨材 GB	粗骨材 GC	収縮低減剤 SRA	分離低減剤 V	AE剤
A	60	315	525	—	200	350	682	—	—	—	2	0.16
B				—			692	—				
C		299	505	20	—	—	735	16	0.26			

*1 群馬大学大学院 工学研究科社会環境デザイン工学専攻 (正会員)

*2 群馬大学大学院 工学研究科社会環境デザイン工学専攻准教授 博士(工学) (正会員)

表-2 RCはり供試体の諸元

供試体 シリーズ	軸方向鉄筋			せん断補強筋			設計荷重			
	降伏 強度 (N/mm ²)	ヤング 係数 (kN/mm ²)	引張 鉄筋比 (%)	降伏 強度 (N/mm ²)	ヤング 係数 (kN/mm ²)	せん断 補強筋比 (%)	曲げひび割れ 発生荷重 (kN)	斜めひび割れ 発生荷重 (kN)	せん断補強筋 降伏荷重 (kN)	曲げ破壊 荷重 (kN)
N	1039	175	4.18	357	190	—	29	134	—	340
S						0.29			217	

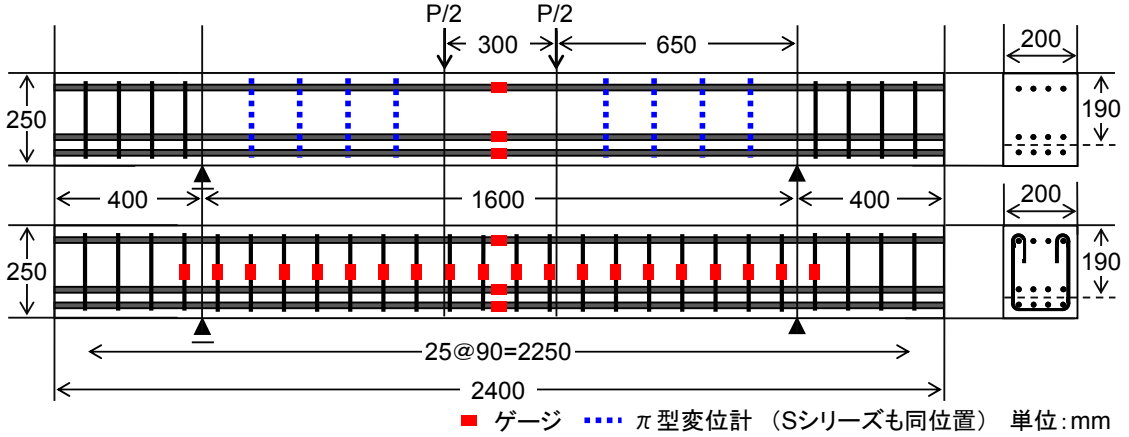


図-1 RCはり供試体の形状寸法

くし、圧縮強度を約 30N/mm²とした。単位水量の増大に伴うブリーディングの発生を、石灰石微粉末 200kg/m³を細骨材に置換するとともに分離低減剤を 2kg/m³混入することによって抑制させた。また、2種類の収縮量が比較的大きいとされる粗骨材を使用し、それぞれ、配合 A, B とした。配合 C では、同一配合に対して膨張材 20kg/m³をセメントに置換し、収縮低減剤をセメントの 3%分である 16kg/m³を水に置換することにより、乾燥収縮を抑制させた。また、粗骨材には一般的に使用されているものを用いた。それぞれの配合を表-1 に示す。

2.2 供試体概要

(1) RCはり供試体

RC はりの供試体諸元を表-2 に、供試体の形状寸法を図-1 に示す。供試体は、せん断補強筋のない RC はり供試体 (N) と、同一寸法でせん断補強筋を有する供試体 (S) の 2 種類を作製した。複鉄筋はり供試体とし、鉄筋によるコンクリートの乾燥収縮に対する拘束を大きくするため、鉄筋量を大きくした。また、せん断補強筋は、せん断スパン外も含めた供試体全長に均一に配筋した。これは、せん断補強筋による鉛直方向の拘束を一定にするためである。軸方向鉄筋には高強度の KSS785D16 を、せん断補強筋には SD295D6 を用い、いずれの供試体においてもせん断破壊が先行するように設計した。

載荷前の供試体に及ぼす収縮の影響を把握するため、コンクリートの打込み直後から載荷試験までの軸方向鉄筋およびせん断補強筋のひずみの経時変化を、図-1 に示す位置において測定した。

作製した RC はりは、せん断補強筋の有無の供試体それぞれについて、配合 A では 2 体、配合 B, C では 1 体ずつ、合計 8 体を作製した。供試体名は、せん断補強筋

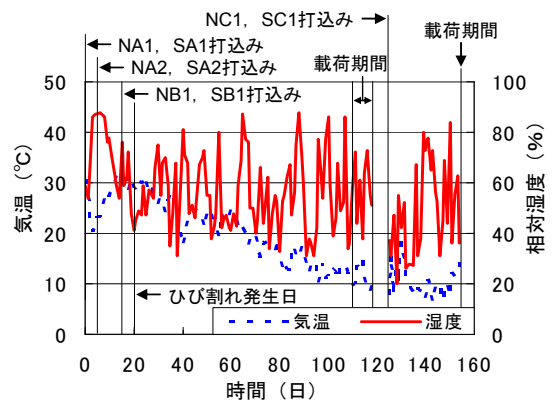


図-2 養生期間中の温湿度変化

の有無 (N, S), 配合 (A, B, C), 同一条件供試体の分類 (1, 2) を順に示している。なお供試体の作製では、まず NA1 および SA1 のコンクリートの打込みを行い、5 日後に NA2 および SA2 を、さらにその 11 日後に NB1 および SB1 の打込みを行った。また、NC1 および SC1 は、A および B シリーズ供試体の載荷試験終了後に打込みを行った。

作製した RC はり供試体は、打込み終了後、直ちに打込み面をラップで覆って封緘状態とした。そして、24 時間後に全面を脱型し、載荷試験まで実験室内において気乾養生とした。また、養生中の自重による拘束の影響を緩和するため、供試体の下面にコロを設置し、床との摩擦を低減させた。養生期間中の気温と相対湿度の経時変化を図-2 に示す。

(2) 無拘束角柱供試体

コンクリートの自由収縮ひずみを測定するため、100×100×400mm の無拘束角柱供試体を、各 RC はり供試体の作製に合わせて 3 体ずつ作製した。それぞれを RC

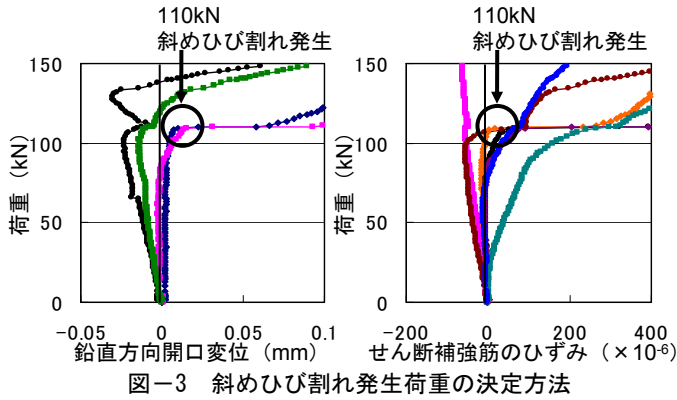


図-3 斜めひび割れ発生荷重の決定方法

はり供試体と同じ養生を行い、コンタクトゲージ法 (JIS A 1129-2) により自由収縮ひずみを測定した。計測は、脱型を行った材齢 24 時間後から開始した。無拘束角柱供試体は、RC はり供試体とはコンクリートの体積および表面積などが異なるために、両者の乾燥収縮量の直接的な比較はできないが、コンクリート自体の材料特性の把握を目的として計測した。

(3) 強度試験用供試体

載荷時のコンクリートの圧縮強度および割裂引張強度を測定するため、直径 100mm、高さ 200mm の円柱供試体を、圧縮試験用に 3 体、割裂引張試験用に 3 体、合計 6 体を、それぞれ各 RC はり供試体とともに作製した。強度試験用の円柱供試体についても、RC はり供試体と同じ養生を行った。

2.3 載荷試験方法

RC はり供試体の載荷試験の方法を図-1 に示す。スパン 1600mm、等曲げモーメント区間 300mm、2 点集中荷重による静的載荷とした。載荷試験中は、荷重、スパン中央部のたわみ、各種鉄筋ひずみを計測するとともに、ひび割れ進展状況についても目視で観察した。

本研究での斜めひび割れの発生荷重の判定は、 π 型変位計 (測定長 200mm) にて計測した、せん断スパン内の鉛直方向の変位により判断した。これは、斜めひび割れの発生に伴う鉛直方向への開口変位の増加を測定するものであり、変位が増加した点を斜めひび割れ発生荷重とした。なお、S シリーズでは、せん断補強筋のひずみと鉛直方向開口変位の両方から判断した。測定は図-1 に示す位置において測定した。なお、S シリーズの計測位置は N シリーズと同様の位置である。図-3 に斜めひび割れ発生荷重の決定の一例として、SA1 の荷重と鉛直方向開口変位、荷重とせん断補強筋のひずみの関係を示す。なお、ここで用いた値は、先に斜めひび割れが発生したせん断スパン側の変位計およびせん断補強筋である。図中に示した荷重 110kN 時から、明らかに鉛直方向開口変位やせん断補強筋ひずみが増加している。したがって、この値を斜めひび割れ発生荷重として採用した。

表-3 コンクリートの強度特性

供試体名	材齢 (日)	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	割裂引張強度 (N/mm ²)
NA1	110	30.2	19.0	2.58
NA2	109	30.8	18.8	2.60
NB1	101	29.7	17.5	2.59
NC1	28	26.8	19.7	2.41
SA1	111	29.5	19.0	2.47
SA2	108	29.8	18.6	2.69
SB1	102	29.1	18.6	2.52
SC1	29	27.1	18.4	2.27

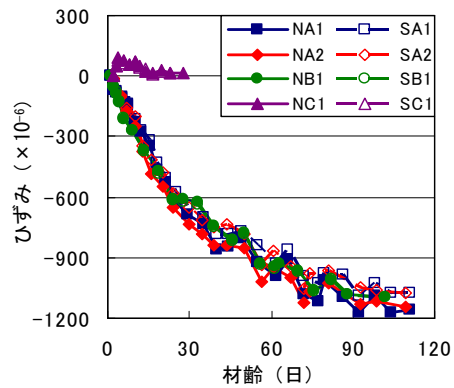


図-4 無拘束供試体における自由収縮ひずみ

以上のように本研究では、N シリーズでは鉛直方向開口変位、S シリーズでは鉛直方向開口変位およびせん断補強筋ひずみの両方の値が増加した時の荷重を斜めひび割れ発生荷重とした。

3. 実験結果および考察

3.1 コンクリートの強度特性

RC はり供試体の載荷試験材齢におけるコンクリートの圧縮強度、ヤング係数、割裂引張強度を表-3 に示す。これらの値は、配合や打込み時期によらず同程度であり、供試体間のばらつきは小さい。したがって、以下の RC はり供試体の載荷試験の議論では、コンクリートの強度特性の違いが与える影響は無視できると考えられる。

3.2 養生期間中に生じたひずみ

無拘束角柱供試体に生じた自由収縮ひずみの経時変化を図-4 に、載荷試験開始直前の各種ひずみの値を表-4 に示す。

無拘束供試体で計測したコンクリートの自由収縮ひずみの最終値は、ひび割れ発生を目指した供試体では、いずれにおいても 1000×10^{-6} 以上と、大きな収縮ひずみとなった。材齢初期において乾燥収縮が大きく進行し、材齢約 85 日でほぼ一定の値に収束した。一方で、乾燥収縮を低減させた C シリーズでは、約 15×10^{-6} となり、材齢約 20 日でほぼ一定の値に収束した。また、RC はり供試体において計測した各鉄筋のひずみについても配

合および打込み時期の影響は小さく、養生終了時（載荷直前）の値は、表-4 に示すように、各計測鉄筋に対して A, B シリーズではほぼ一定の圧縮ひずみが生じている。それに対し、C シリーズでは、自由収縮と同様に乾燥収縮が低減され、ほとんど鉄筋ひずみが生じていない。

3.3 初期ひび割れの発生と進展

養生期間中に RC はり供試体に生じた初期ひび割れを、図-5 に示す。ひび割れの発生は、NA1 および SA1 では材齢 20 日、NA2 および SA2 では材齢 15 日、NB1 および SB1 では材齢 5 日に目視確認された。いずれの供試体においても、図-2 中に示したひび割れ発生日で観察された相対湿度が急激に低下した同じ時期（NA1 および SA1 の打込みから 20 日経過時）にひび割れが生じた。同時期に、無拘束供試体の自由収縮ひずみの急増も確認されている（図-4）。なお、各供試体の最大のひび割れ幅は、クラックスケールを用い、目視により計測した所、いずれも約 0.04mm であった。

ひび割れの進展状況については、供試体間で大きな差が見られた。NA2, NB1, SA2 および SB1 ではせん断補強筋の有無によらず、鉛直方向のひび割れのみならず、横方向や斜め方向へのひび割れの進展が観察された。作製時期が遅かったこれらの供試体では、材齢初期において相対湿度が低かったために水分逸散が急激に進行し、表層の乾燥収縮が大きくなり、鉄筋による拘束のみならずコンクリートの内部拘束によって、表面部分にひび割れが発生したものと思われる。一方、NA1 および SA1 では鉛直方向のひび割れの進展のみが観察された。これは、NA1, SA1 の養生初期における相対湿度が高かったため、緩やかに乾燥収縮が進行し、ひび割れ進展の抑制につながったと考えられる。なお、S シリーズにおいて、

せん断補強筋に 300×10^6 と軸方向鉄筋の 2 倍程度の大きな圧縮ひずみが生じているが、N シリーズと比較し、せん断補強筋の存在によるひび割れの進展に違いは見られなかった。これは、せん断補強筋の鉄筋比が小さく、拘束応力が小さくなったためと思われる。ここで、鉛直方向に伸びるひび割れは供試体の周面につながっているため、鉄筋の拘束による貫通ひび割れであると考えられた。一方、横方向や斜め方向に生じたひび割れは、発生位置が裏面と対応していないため、コンクリート自体の内部拘束による表層部分のみのひび割れと思われる。

3.4 RC はり供試体の載荷試験結果

(1) 荷重とたわみの関係

荷重とスパン中央におけるたわみの関係を図-6 に、各 RC はり供試体の載荷試験結果を表-5 に示す。図中には、斜めひび割れ発生荷重および S シリーズにおける最大荷重の計算値をあわせて示した。ここで、計算には、斜めひび割れ発生荷重では二羽式を、最大荷重では修正トラス理論を用いた。

斜めひび割れ発生荷重に関しては、NC1, SC1 が二羽式による計算値とほぼ一致したのに対し、NA1, SA1 で

表-4 載荷試験直前の各種ひずみの値

供試体名	せん断補強筋			せん断補強筋 ひずみ ($\times 10^{-6}$)
	圧縮鉄筋 上段 ($\times 10^{-6}$)	引張鉄筋 中段 ($\times 10^{-6}$)	引張鉄筋 下段 ($\times 10^{-6}$)	
NA1	-199	-128	-101	—
NA2	-183	-132	-131	—
NB1	-203	-130	-118	—
NC1	9	21	27	—
SA1	-181	-133	-134	-284
SA2	-204	-141	-96	-326
SB1	-187	-127	-103	-283
SC1	16	21	16	101

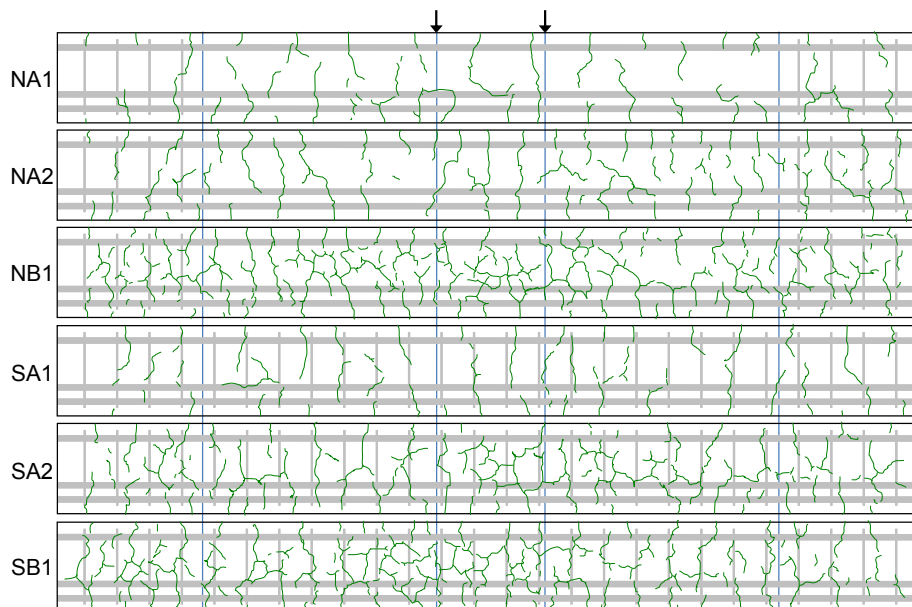


図-5 初期ひび割れの進展状況

は約 17%, NA2, NB1, SA2, SB1 では約 26%程度の荷重の低下が確認された。乾燥収縮の鉄筋による拘束によって生じた収縮応力および収縮ひび割れの存在によって荷重が低下したものと考えられる。

最大荷重は、せん断補強筋の無い N シリーズにおいては、斜めひび割れ発生後に数回の荷重の増減を経た後に計測され、その後せん断破壊に至った。特に無収縮供試体である NC1 では最大荷重が大幅に増加したが、次項で述べるように、発生した斜めひび割れが圧縮鉄筋に沿って載荷点下に進展し、耐荷機構がタイドアーチとなったためであると考えられた。これに対し、乾燥収縮ひび割れを生じていた供試体では、斜め引張破壊となったが、初期ひび割れが斜めひび割れの進展を阻害することで、最大耐力の増加に至ったと考えられた。斜めひび割れ発生荷重から最大荷重までの増加の割合は35%から74%で、初期ひび割れの進展状況によって大きく異なった。ただし今回の実験では、ひび割れを生じたいずれの供試体も二羽式によって算定されたせん断耐力を上回り、最大で二羽式の算定値の1.2倍となった。

S シリーズにおいては、無収縮供試体である SC1 と比較し、同様の破壊形態であったが、収縮供試体では最大荷重が低下する結果となった。低下荷重は供試体間によるばらつきはほとんど無く、斜めひび割れ発生荷重の低下荷重分とはほぼ同程度であった。これはせん断補強筋が受け持つ荷重の負担分が、斜めひび割れ発生荷重後は同等であるためと思われる。

以上より、乾燥収縮によって RC はり部材に初期ひび割れが生じた場合には、無収縮供試体と比較して斜めひび割れ発生荷重や最大荷重は低下するものの、最終的なせん断耐力は計算値以上になる事が確認された。なお、無収縮供試体は試験体数が各1体となっているため、再現性については確認をする必要がある。また、本研究で用いた RC はり供試体は、有効高さが 190mm の小型供試体であったが、既往の研究⁴⁾によると、自己収縮によるせん断耐力の低下には寸法効果があり、寸法が大きくなるほど低下が顕著になることが報告されている。本研究で対象とした乾燥収縮によるせん断耐力の変化においても、寸法の影響を検討する必要がある。

(2) 斜めひび割れの発生と進展

載荷終局時におけるひび割れ進展状況を図-7 に示す。初期ひび割れを生じた供試体間における斜めひび割れ発生荷重の低下とばらつき(表-5)は、初期ひび割れと斜めひび割れの関係によるものと考えられる。NA2, NB1, SA2, SB1 では、NA1, SA1 と比べて斜めひび割れ発生荷重が低下したが、これは、初期ひび割れが横方向や斜め方向へ進展していたためであるといえる。すなわち、初期ひび割れが斜めひび割れの発生を誘発したと

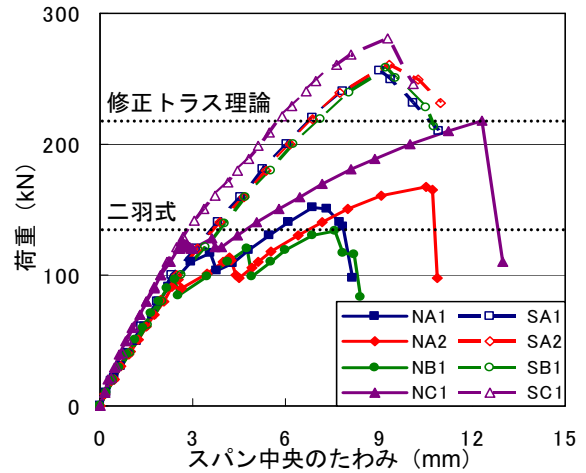


図-6 荷重とたわみの関係

表-5 RC はり供試体の載荷試験結果

供試体名	斜めひび割れ発生荷重		最大荷重	
	実験値 (kN)	計算値 (kN)	実験値 (kN)	計算値 (kN)
NA1	112	134	151	—
NA2	96	135	167	—
NB1	97	133	134	—
NC1	124	129	218	—
SA1	110	133	255	216
SA2	100	133	260	217
SB1	102	132	258	216
SC1	129	129	281	213

考えられる。これは、図-7 の斜めひび割れが初期ひび割れに沿って発生していることから分かる。

斜めひび割れ発生後、NC1 の斜めひび割れは、載荷点に向かい進展したが、圧縮鉄筋位置まで進展すると、圧縮鉄筋に沿うように進展し、載荷点下に潜り込んだ。そして、タイドアーチ効果により、せん断力に抵抗する圧縮部のコンクリートの面積が大きくなったことが、最大荷重の大幅な増加につながったと考えられる。

初期ひび割れを生じた供試体の斜めひび割れは初期ひび割れに沿って進展していく傾向が見られた。そして、斜めひび割れが鉛直方向に導入された初期ひび割れ位置まで進展すると、斜めひび割れの進展が阻害され、進展が遅くなる。その結果、斜めひび割れの分散につながり、明確なタイドアーチ機構が形成された NC1 供試体程では無いが、最大荷重の増加につながったと思われる。このような初期ひび割れの方法によるせん断耐力の変化は、人工亀裂に関する既往の研究^{9), 10)}でも確認されている。ただし、初期ひび割れの進展状況により、せん断耐力の増加にはばらつきが見られた。このばらつきは、斜めひび割れの進展を阻害する鉛直方向に伸びた初期ひび割れの本数の違いによるものであると思われる。

4. まとめ

本研究では、乾燥収縮による初期ひび割れを導入した

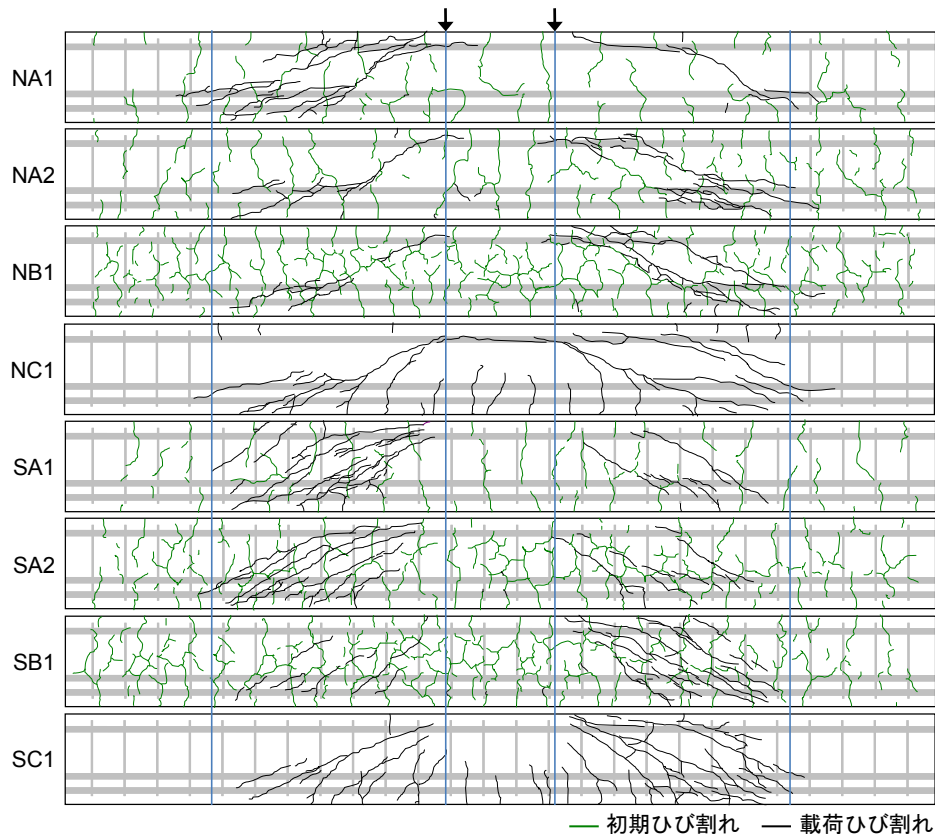


図-7 終局時のひび割れ進展状況

RC 通りの載荷試験を行い、初期ひび割れがせん断耐力に及ぼす影響を検討した。本実験の範囲内において得られた知見を以下に示す。

- 1) 乾燥収縮による初期ひび割れの生じた供試体は、無収縮の供試体と比較し、斜めひび割れ発生荷重および最大荷重が低下する。
- 2) 斜めひび割れは、初期ひび割れに沿って進展する傾向が見られ、初期ひび割れの進展状況によっては、斜めひび割れの発生を誘発させる。
- 3) 初期ひび割れの生じた供試体の斜めひび割れは、鉛直方向に伸びた初期ひび割れによって進展が阻害され、終局時のせん断耐力は計算値以上となる。

謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金（基盤研究（A）・課題番号：20246073）を得て実施したものである。また、本実験の実施には群馬大学学部生江原正樹氏に多大なご援助を頂いた。ここに記して、感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 長谷川俊昭ほか：乾燥収縮ひび割れが鉄筋コンクリート部材に及ぼす影響，コンクリート工学年次講演会論文集，Vol.6，No.0，pp.617-620，1984.
- 2) Kishi, T., et al. : Effect of Drying/Autogenous Shrinkage on Ductility/Fracture Mode of Beam and Self-Repairing

Function of Expansive Agent, Proceeding of the JCI, Vol.22, No.3, pp.511-516, 2000.

- 3) 谷村 充ほか：若材齢時長さ変化を考慮した RC 曲げ部材のひび割れ・変形の一般化評価方法，土木学会論文集，No.760，V-63，pp.181-195，2004.5
- 4) 牛尾亮太ほか：高強度 RC 通りのせん断挙動に及ぼす体積変化の影響に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.2，pp.769-774，2006.
- 5) 土木学会：2007 年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕，2008.
- 6) 今本啓一ほか：各種骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮特性と骨材比表面積の影響，日本建築学会構造系論文集，第 606 号，pp.9-14，2006.8
- 7) 丸山久一ほか：垂井高架橋損傷対策特別委員会中間報告書，土木学会，2005.
- 8) 二羽淳一郎ほか：せん断補強筋を用いない RC 通りのせん断強度式の再評価，土木学会論文集，No.372，V-5，pp.167-176，1986.8
- 9) Pimanmas, A.et al. : Control of Crack Localization and Formation of Failure Path in RC Members Containing Artificial Crack Device, J. Materials. Conc. Struct., Pavements, JSCE, No.683, V-52, pp.173-186, 2001.
- 10) 田中泰司ほか：曲げせん断力を受ける RC 部材の人工亀裂装置とせん断補強筋の併用効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.2，pp.349-354，2005.