

鉛直打継目を有する RC 梁のせん断性状におけるプレストレスの導入効果

辻 幸和*¹, 杉山 隆文*², 池田 正志*³

1. はじめに

コンクリート構造物を施工する際、コンクリートを連続して打ち込むことが理想である。しかし、施工能力の限界、およびセメントの水和熱による温度応力や温度ひび割れの制御等の理由から、コンクリートを連続して打ち込むことが困難な場合がある。そのため、コンクリート構造物の施工には水平および鉛直の打継目を設ける場合が多くなるが、打継目部分においてせん断耐力が低下するなどの構造上の弱点となりやすい。

打継目の補強には、経済性や施工性の観点から鋼板や炭素繊維等の巻き立て工法が一般的であり、これまで研究成果も多く報告されている。著者らも、鋼板による補強について報告してきた^{1,2)}。しかし、打継目を有する構造物において、プレストレスの導入が RC 部材のせん断性状に及ぼす効果については、ほとんど研究がなされていない³⁾。

本研究では、プレストレスの導入によるせん断性状の向上に着目して^{4,5)}、鉛直打継目を有する RC 梁にプレストレスを導入した補強効果を、斜めひび割れ性状、せん断耐力およびスターラップのひずみ性状について実験的に検討した結果を報告する。

2. 実験概要

2.1 供試体の形状寸法

供試体断面の形状寸法等の選定は、土木学会コンクリート標準示方書⁶⁾に基づいて行った。すなわち、すべての供試体がせん断破壊を起こすように、せん断耐力と曲げ耐力の破壊荷重比 P_V/P_M が約 0.8 になるように設計を行った。断面は、高さが 200 mm で幅が 150 mm の矩形断面とした。また、長さを 1200 mm、支点間を 1000 mm、載荷点間を 400 mm とした。その詳細を図 - 1 に示す。スターラップは D6 を 60 mm 間隔で、せん断スパン内に 4 本ずつ配置した。

プレストレスの導入にあたり、圧縮縁に引張力が作用しないように偏心距離 e を算定し、30 mm を選定した。プレストレス導入率は、PC 鋼棒の 0.2 % 永久伸びに対する引張力である 71.8 kN の 80 %、60 %、40 % の 3 種類とした。表 - 1 に供試体の一覧を示す。

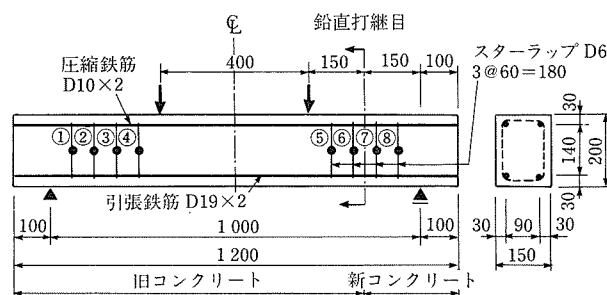


図 - 1 供試体の断面形状寸法および配筋方法

表 - 1 供試体の一覧

供試体名	コンクリート設計基準強度 (N/mm ²)	鉛直打継目	打継面の処理方法	プレストレス導入率 (%)	平均プレストレス (N/mm ²)	引張縁のプレストレス (N/mm ²)	せん断耐力と曲げ耐力の比 (P_V/P_M)
45 - 無	45	有	無処理	-	-	-	0.789
45 - 有 A				-	-	-	0.789
45 - PC 80 A				80	1.92	3.64	0.834
45 - PC 60 A				60	1.43	2.73	0.816
45 - PC 4 A				40	0.96	1.82	0.800
45 - 有 B				-	-	-	0.789
45 - PC 80 B				80	1.92	3.64	0.834
45 - PC 60 B				60	1.43	2.73	0.816
45 - PC 40 B				40	0.96	1.82	0.800
70 - 無	70	有	無処理	-	-	-	0.811
70 - 有 B				-	-	-	0.811
70 - PC 80 B				80	1.92	3.64	0.850
70 - PC 60 B				60	1.43	2.73	0.828
70 - PC 40 B				40	0.96	1.82	0.810

*¹ Yukikazu TSUJI : 群馬大学 工学部 建設工学科 教授

*² Takafumi SUGIYAMA : 群馬大学 工学部 建設工学科 助教授

*³ Masashi IKEDA : 群馬大学 工学部 建設工学科 技官

2.2 供試体の作製および荷荷方法

セメントは、JIS R 5210 に適合する T 社製普通ポルトランドセメントを使用した。密度が 3.16 (g/cm³)、比表面積が 3 320 (cm²/g) であった。細骨材は群馬県笠懸町陸砂 (粗粒率 2.77, 表乾密度 2.63 kg/l, 吸水率 2.35%), 粗骨材は大間々小平砕石 (粗粒率 6.55, 表乾密度 2.90 kg/l, 吸水率 0.67%) を使用した。混和剤には、通常強度コンクリートに AE 減水剤を、高強度コンクリートに高性能 AE 減水剤を使用した。練混ぜ水には、群馬県桐生市における水道水を使用した。

鉄筋および PC 鋼棒の力学的性状を表 - 2 に示す。引張鉄筋に SD 345 の D 19 を、圧縮鉄筋に SD 295 の D 10 を、スターラップに SD 295 の D 6 を使用した。補強に使用した PC 鋼棒は、C 種 1 号 SBPR 1080/1230 の呼び名 9.2 mm を使用した。

通常強度コンクリートおよび高強度コンクリートの示方配合およびフレッシュコンクリートの諸性状ならびに圧縮強度 (荷荷試験時) を表 - 3 に示す。

まず旧コンクリートを打ち込んだ後、材齢 24 時間に打継面の処理を行い、材齢 48 時間には新コンクリートを打ち込んだ。材齢 2 日の脱型後は、新コンクリートの材齢 28 日まで湿布養生を行った。打継面の処理方法は、打継面を粗骨材が見える程度まで表面を粗く削った処理のほかに、打継面の処理をまったくしない無処理のものを作製した。これにより、打継面処理の良否の影響が明確に現れると考えた。なお、高強度コンクリートを用いた RC 梁供試体については無処理のもののみである。

プレストレスの導入方法は、直径が 13 mm のシースを配置し、呼び名 9.2 mm の PC 鋼棒を用いたポストテンション方式で、グラウトによる充填の無いアンボンド梁とした。また、PC 鋼棒のリラクセーションやコンクリートのクリープおよび乾燥収縮等によるプレストレスの減少などの影響をできるだけ排除するため、荷荷試験直前にプレストレスの導入を行った。PC 鋼棒の緊張には油圧式センターホールジャッキを使用した。緊張量の制御は、PC 鋼棒にあらかじめ貼付しておいたワイヤストレインゲージによるひずみ制御とした。

供試体の詳細を、表 - 1 に示す。鉛直打継目を有しない一体型の供試体を「無」、有する供試体を「有」、打継面の

表 - 2 鉄筋および PC 鋼棒の力学的性状

	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)
SD 295 D 6	374	541	1.87 × 10 ⁵
SD 295 D 10	357	513	1.85 × 10 ⁵
SD 345 D 19	386	569	1.87 × 10 ⁵
SBPR 1 080/1 230	1 248	1 275	2.0 × 10 ⁵

表 - 3 コンクリートの示方配合および性状

	粗骨材の最大寸法 (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				混和剤単位量 (g/m ³)	スランプ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 (N/mm ²)	
				W	C	S	G				旧コンクリート	新コンクリート
通常強度	15	55	49	185	337	876	993	1 264	7.0	3.8	55.2	54.1
高強度	15	30	45	185	618	697	928	5 408	15.4	2.6	81.1	83.3

処理を行った供試体を「A」、無処理の供試体を「B」とする。また、プレストレス導入率が 80%, 60%, 40% の順に、PC 80, PC 60, PC 40 と表記する。

荷荷試験方法は、図 - 1 に示したように、支点間が 1 000 mm, 荷荷点間が 400 mm による 2 点集中静的漸増荷荷とした。測定したひずみは、圧縮鉄筋, 引張鉄筋, スターラップ, PC 鋼棒の各鋼材のひずみ, 供試体中央部の圧縮縁と引張縁および鉛直打継面位置の引張縁の各コンクリートのひずみである。さらに、曲げひび割れ発生荷重, 斜めひび割れ発生荷重およびひび割れの進展状況について、ひずみゲージおよび目視により観測を行った。

3. ひび割れ性状

3.1 曲げひび割れ発生荷重

図 - 2 および表 - 4 に、曲げひび割れおよび斜めひび割れの発生荷重を示す。曲げひび割れ発生荷重は、引張縁に貼付したひずみゲージが急激に変化したときの荷重とした。また目視で確認した曲げひび割れの発生位置は、すべて等曲げモーメント区間であった。

いずれの RC 梁ともに、プレストレスの導入効果により曲げひび割れ発生荷重は一体型と比較して大きい値を示した。また、プレストレスの導入力が大きいほど曲げひび割れ発生荷重も大きいことが確かめられた。なお、鉛直打継目を有した「45-有A」, 「45-有B」および「70-有B」は、一体型とほぼ同一荷重で曲げひび割れの発生が確認された。

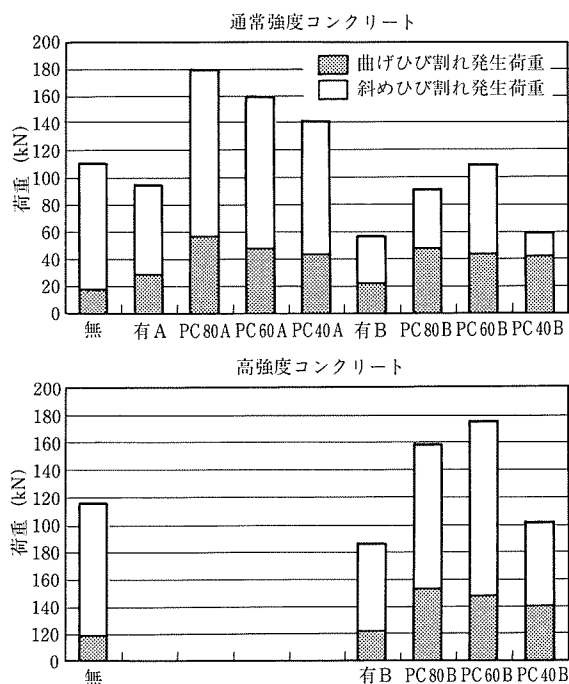


図 - 2 曲げひび割れおよび斜めひび割れ発生荷重

表 - 4 ひび割れ発生荷重および破壊荷重

供試体名	曲げひび割れ発生荷重 (kN)	斜めひび割れ発生荷重 (kN)	引張鉄筋降伏荷重 (kN)	破壊荷重 (kN)
45-無	19	110	258	300
45-有A	28	96	253	303
45-PC 80 A	54	180	320	342
45-PC 60 A	43	159	317	337
45-PC 40 A	41	141	300	315
45-有B	22	57	—	214
45-PC 80 B	45	90	—	316
45-PC 60 B	43	108	—	276
45-PC 40 B	41	59	305	326
70-無	18	116	280	345
70-有B	23	86	283	299
70-PC 80 B	51	159	—	311
70-PC 60 B	47	175	331	353
70-PC 40 B	40	102	314	345

鉛直打継目の無い等曲げモーメント区間において、いずれの梁も曲げひび割れが生じたためである。

3.2 斜めひび割れ発生荷重

斜めひび割れ発生荷重は、目視により確認した時の荷重である。せん断スパンに生じた曲げひび割れが急激に載荷点と支点の方向に進展した荷重を、斜めひび割れ発生荷重とした。斜めひび割れ発生荷重は、鉛直打継目の有無および打継面の処理方法の差異による影響が著しく認められた。

すなわち、「45-有A」の斜めひび割れ発生荷重は、一体型の「45-無」より若干低い値であった。「45-有A」は、打継面の処理を行ったために斜めひび割れ発生荷重の極端な低下は見られなかった。また、打継目を処理しない「45-有B」は、一体型に比べて約 50 % 低い 57 kN で斜めひび割れが生じた。「45-有B」では鉛直打継目による悪影響が顕著であった。

プレストレスを導入したばかりでは、打継面の処理の違いにより斜めひび割れ発生荷重が大きく異なった。打継面の処理を行った場合では、プレストレスの導入により一体型の「45-無」より大幅に斜めひび割れの発生が抑制されている。また、プレストレス導入率が高いほど斜めひび割れの発生を抑制する効果は大きい。しかし、打継面の処理を行わない場合では、プレストレスを導入した「45-PC 60 B」のみが、一体型とほぼ同程度の荷重で斜めひび割れを生じたが、早期荷重の段階で斜めひび割れが発生する傾向が見られた。特に「45-PC 40 B」は、「45-有B」とほぼ同程度の荷重であった。つまり、斜めひび割れの発生には、打継面の処理の影響を大きく受けると考えられる。

高強度コンクリートを用いた RC 梁においても、鉛直打継目を有する「70-有B」は一体型の「70-無」に比べ約 26 % 低い 86 kN で斜めひび割れが生じた。

なお、打継面の処理を行っていない場合、通常強度コンクリート梁ではプレストレスを導入しても早期荷重の段階で斜めひび割れが発生する傾向が見られた。しかしながら、高強度コンクリートを用いると、「70-PC 80 B」と「70-PC 60 B」のプレストレスを導入した梁は、一体型の「70-無」より大きい荷重で斜めひび割れが生じた。なお、打継

面を処理しないと、打継面の平滑さのばらつき及び影響の方が大きいために、プレストレス導入率が 60 % より 80 % の梁の方が、斜めひび割れ発生荷重が小さくなっている。

3.3 斜めひび割れ発生状況

通常強度コンクリートを用いた RC 梁における破壊時のひび割れ発生状況を図 - 3 に示す。一体型である「45-無」の斜めひび割れは、支点と載荷点を結ぶように直線的に生じた。

打継面の処理を行った梁は、斜めひび割れが打継面にお

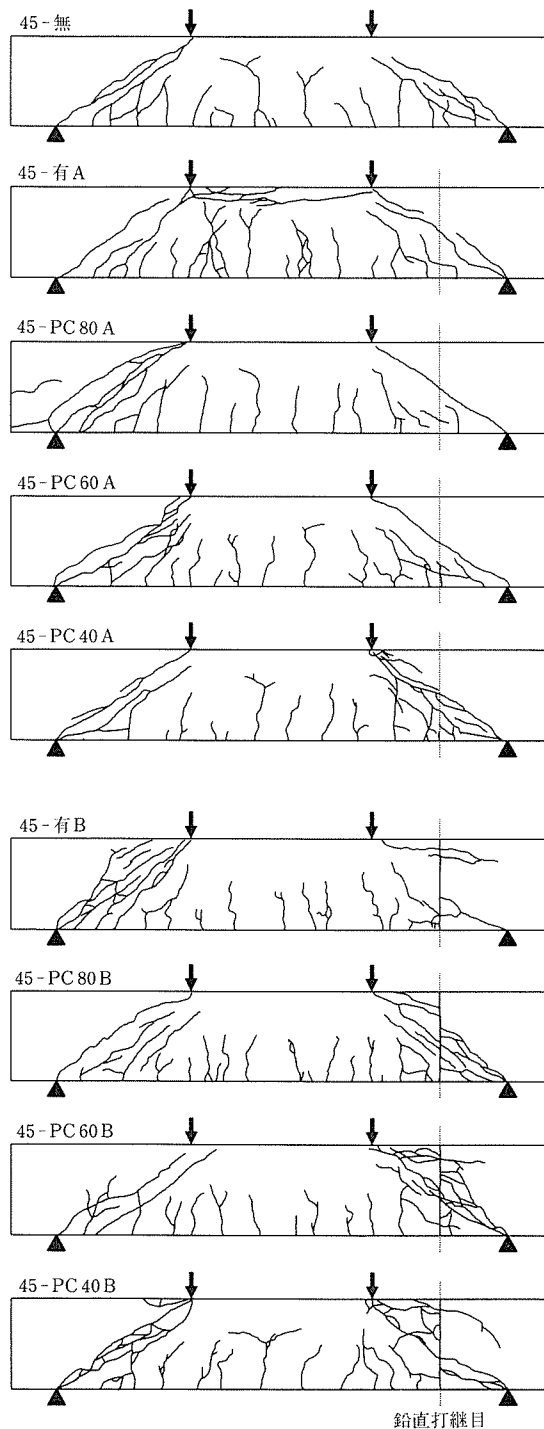


図 - 3 ひび割れの発生状況 (通常強度コンクリート梁)

いてずれることがなく、一体型と同様に荷点と支点を直線で結ぶように生じた。なお、「45-有A」では鉛直打継目を有しない側から最初に斜めひび割れが発生した。また、プレストレスを導入した「45-PC 80 A」および「45-PC 60 A」でも、鉛直打継目を有しない側からせん断破壊にいたった。

しかし、打継目を処理しない「45-有B」では、斜めひび割れが鉛直打継目で大きくずれ、引張鉄筋と圧縮鉄筋付近に生じた。これは、鉛直打継目に沿って曲げひび割れが生じることで、打継面の圧縮領域のコンクリートの断面積が一体型の「45-無」に比べて小さくなり、せん断耐力が大きく低下し、高さ方向にずれたためである。打継面の処理を行っていない場合、打継面は平滑であり、ひび割れ面のかみ合いにより伝達されるせん断力はきわめて小さいと考えられる。そのためプレストレスを導入した「45-PC 80 B」、「45-PC 60 B」、「45-PC 40 B」においても、同様に鉛直打継目でずれが見られた。またこれらのプレストレスを導入した梁は、鉛直打継目でずれが生じた後にPC鋼材位置において斜めひび割れが発生し、支点と荷点とを結ぶようにひび割れが生じた。

図-4は、高強度コンクリートを用いた梁における破壊時のひび割れ発生状況を示す。「70-無」の斜めひび割れは、「45-無」と同様に、支点と荷点を結ぶように直線的に生じた。打継目を処理しない「70-有B」は、「45-有B」と同様に、鉛直打継目で大きくずれたために、せん断耐力が大きく低下した。

プレストレスを導入した高強度コンクリートを用いて打継目を処理しなかった梁においては、斜めひび割れは、通

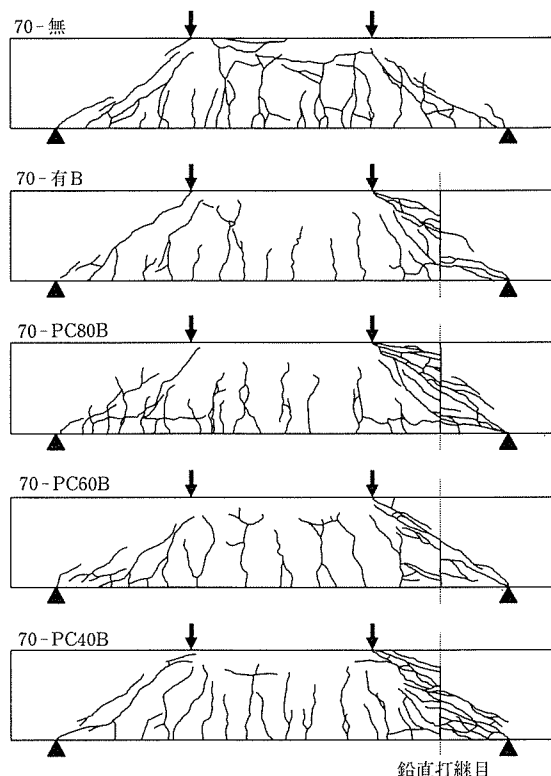


図-4 ひび割れの発生状況（高強度コンクリート梁）

常強度コンクリートを用いて打継目の処理を行った梁とはほぼ同程度の荷重で、鉛直打継目がずれて生じた。

4. 破壊形式および破壊荷重

破壊荷重を表-4に示す。せん断破壊を生じるように、梁の形状寸法と鉄筋等を配置したため、すべての梁はせん断圧縮破壊を生じた。そして、鉛直打継目を有する梁は、「45-PC 80 A」と「45-PC 60 A」を除き、すべて鉛直打継目を有するせん断スパンで破壊を生じた。

破壊荷重は「45-有B」が、一体型と比較して約30%低い値でせん断破壊にいたった。鉛直打継目を処理しなかったため、せん断耐力の著しい低下を生じた。プレストレスを導入した梁は、「45-PC 60 B」を除き、一体型の破壊荷重より大きい値を示した。

高強度コンクリートを用いたRC梁では、通常強度コンクリートRC梁同様、鉛直打継目を有する「70-有B」が一体型の梁と比較し破壊荷重の低下が見られ、約13%低い299kNでせん断破壊にいたった。プレストレスを導入した梁は一体型と同等以上の最大荷重であった。

打継面の処理を行った梁は、プレストレスの導入量に対応して、せん断耐力も増加した。しかしながら、打継面の処理を行わない通常強度・高強度コンクリートを用いた梁は、プレストレスの導入効果が明確に現れないものも見られた。

5. 分担せん断力

スターラップを配置したRC梁は、作用せん断力に対し、斜めひび割れが生じるまでは主としてコンクリートで抵抗し、斜めひび割れが生じると主としてコンクリートとスターラップで抵抗する。鉛直打継目を有するRC梁は、鉛直打継目の存在により、コンクリートが分担するせん断力が低下し、低下した分を主としてスターラップで補うことになる。

せん断力とコンクリートおよびスターラップそれぞれの分担せん断力との関係を、図-5および図-6に示す。図中の○印は、斜めひび割れの発生を示す。それぞれの値の算出方法を以下に示す。なお、斜めひび割れ部での粗骨材の分担分および軸方向鉄筋のダウエル作用による分担分は、それぞれ無視している。

スターラップが分担するせん断力 V_s の実測値は、スターラップのひずみの実測値より、以下の式で求めた。なお、スターラップのひずみは、実測した最大値を用いた。

$$V_s = A_w \times \sigma \times z/s$$

ここに、 z はコンクリートの圧縮応力の合力の作用位置から引張鉄筋までの距離で、梁の有効高さ d を1.15で除した値とし、また s はスターラップの配置間隔とする。

コンクリートが分担するせん断力 V_c の実測値は、作用せん断力 V より V_s の実測値を差し引いて求めた。

コンクリートが分担するせん断力 V_c の計算値は、コンクリートのせん断耐力の計算値 V_{cd} が作用せん断力 V より大きい場合には V とし、コンクリートのせん断耐力の計算値 V_{cd} が作用せん断力 V より小さい場合には V_{cd} として、

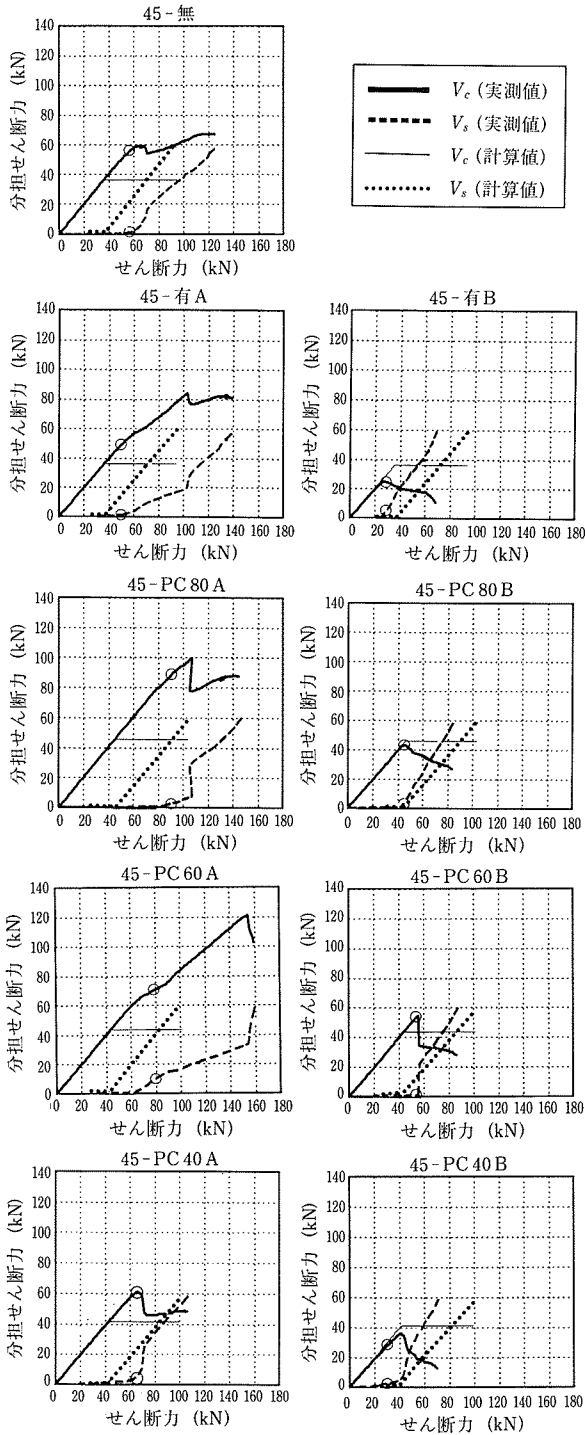


図-5 せん断力とコンクリート・スターラップの分担せん断力との関係 (通常強度コンクリート梁)

それぞれ求めた。そしてスターラップが分担するせん断力 V_s の計算値は、作用せん断力 V より V_c の計算値を差し引いて求めた。

通常強度コンクリートを用いた「45-無」RC梁では、斜めひび割れ発生後に、コンクリートの分担せん断力は一時的に減少するものの、その後、ひび割れ面のかみ合いによってせん断力が伝達されるため、コンクリートの分担せん断力は再び増加する。打継面の処理を行った梁も、「45-無」と同様な傾向が見られ、プレストレスを導入し

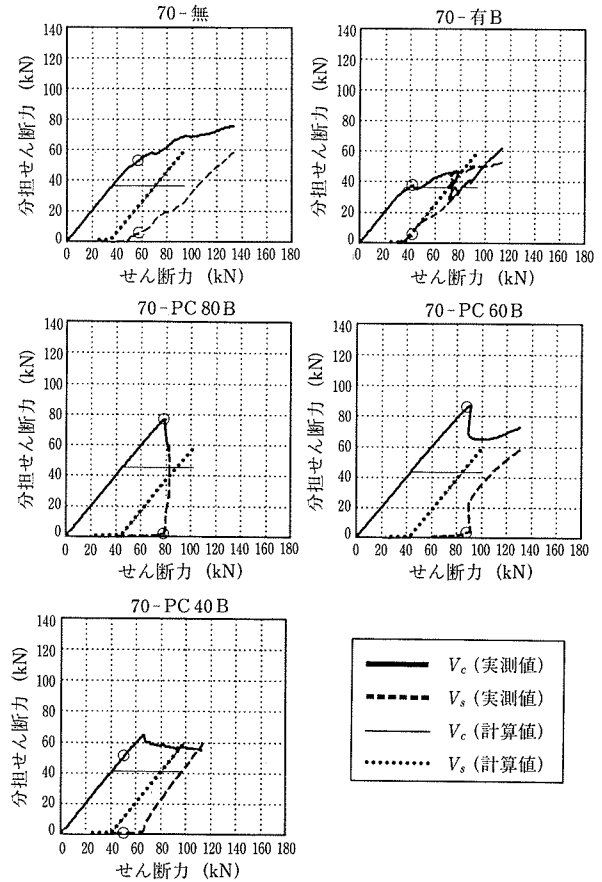


図-6 せん断力とコンクリート・スターラップの分担せん断力との関係 (高強度コンクリート梁)

た「45-PC 80 A」「45-PC 60 A」のコンクリートの分担せん断力は、「45-無」と比較して大きく、プレストレス導入の効果が現れている。

鉛直打継目の処理を行わなかった「45-有B」は、「45-無」よりも早期の荷重段階で斜めひび割れが生じているため、コンクリートの分担せん断力は、早期の荷重段階から減少をはじめ、スターラップの分担せん断力が増加しはじめている。また、コンクリートの分担せん断力は荷重の増加とともに減少する一方である。これは、打継面の処理を行っていないため、鉛直打継目に沿って生じた曲げひび割れによって伝達されるせん断力はほとんど無いと考えられるからである。プレストレスを導入したはりのコンクリートの分担せん断力は、「45-有B」に比べると、斜めひび割れの発生が遅れるため、大きい値となっているが、斜めひび割れ発生後は急激に減少している。

高強度コンクリートを用いた「70-無」梁のコンクリートの分担せん断力は、斜めひび割れ発生後若干の減少が見られるものの、せん断力の増加とともに増加している。鉛直打継目を処理しなかった「70-有B」は、「45-有B」と同様な傾向が見られ、早期の荷重段階からコンクリートの分担せん断力が低下し、その分のせん断力をスターラップが分担している。プレストレスを導入した梁のコンクリートの分担せん断力は、斜めひび割れが生じるまでは「70-無」より大きい、斜めひび割れが生じた後は急激に減少し、「70-無」より小さくなり、「70-有B」と同程度とな

っている。

6. スターラップの挙動

各荷重レベルにおけるスターラップのひずみを、図-7 および図-8 に示す。スターラップの番号は図-1 に示した各番号に対応している。すなわち、鉛直打継目は番号⑥、⑦間に存在する。

通常強度コンクリートを用いた「45-無」「45-有A」梁のスターラップのひずみは、荷重の増加に伴い全体的に増加している。「45-有A」は鉛直打継目を有しているにもかかわらず、打継面の処理を粗骨材が見える程度まで行ったため、スターラップのひずみからは鉛直打継目が弱点となっていない。プレストレスを導入した梁も「45-無」と同

様な傾向が見られるが、同一荷重レベルにおいて「45-無」に比べ、スターラップのひずみは、プレストレス導入率が高いほど大幅に抑制されており、プレストレスの導入による補強効果が認められる。

「45-有B」は、打継面の処理を行っていないため鉛直打継目が弱点となり、スターラップのひずみは、小さい荷重レベルから鉛直打継目より支点側の番号⑦に局所的に集中し、最終的にスターラップは降伏にいたっている。これは、鉛直打継目に沿って曲げひび割れが生じ、打継面で高さ方向にずれ、斜めひび割れが大きく開いたためである。プレストレスを導入した梁は、「45-有B」と比較すると、スターラップのひずみは若干抑制されているが、「45-無」のように全体的な増加を示しておらず、「45-有B」と同様

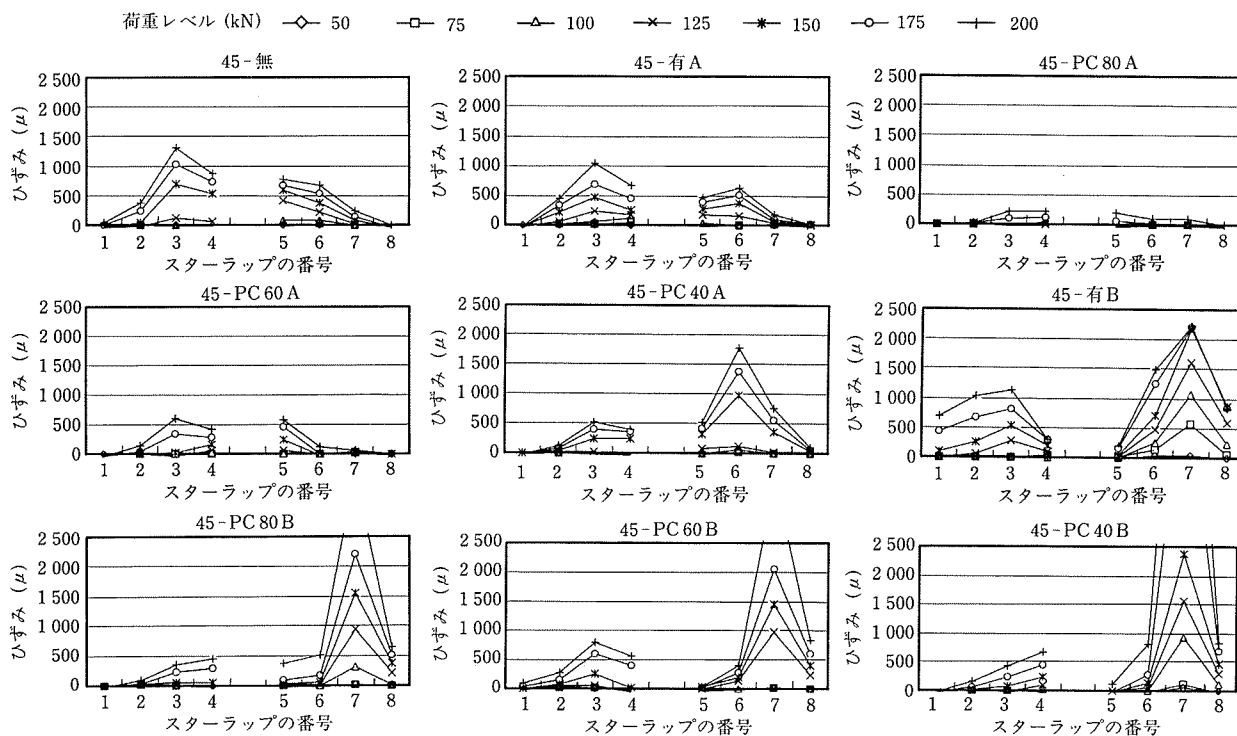


図-7 各荷重レベルにおけるスターラップのひずみ分布 (通常強度コンクリート梁)

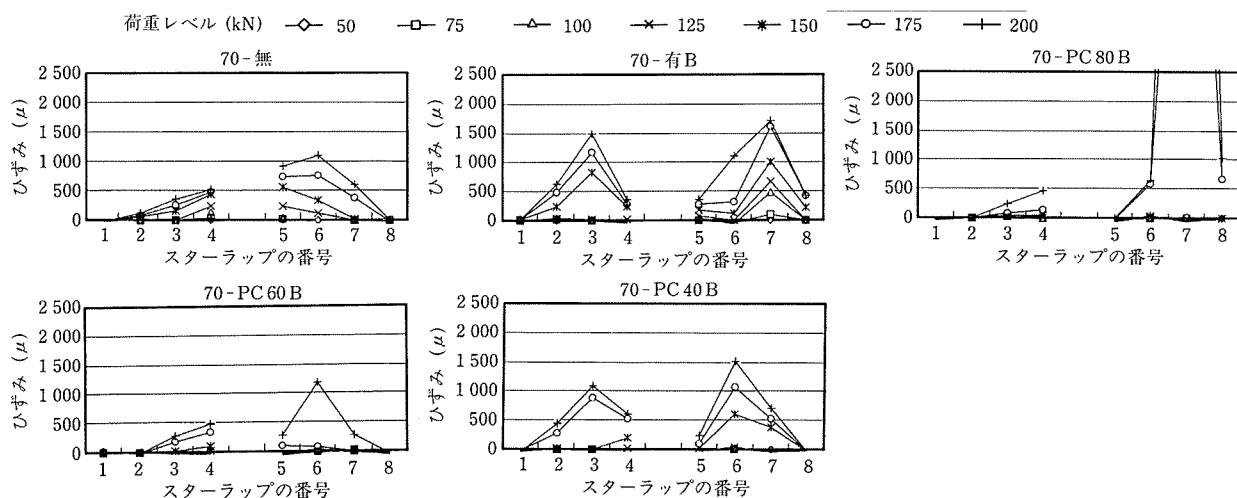


図-8 各荷重レベルにおけるスターラップのひずみ分布 (高強度コンクリート梁)

に、スターラップのひずみは番号⑦に局所的に集中し、最終的にスターラップは降伏にいたっている。

高強度コンクリートを用いた RC 梁におけるスターラップのひずみは、打継面の処理を行っていない通常強度コンクリートを用いた RC 梁とほぼ同様な傾向である。しかし、プレストレスを導入した梁のスターラップのひずみは、斜めひび割れが生じるまでは、「70-無」に比べ抑制されており、プレストレス導入による補強効果が認められる。しかし斜めひび割れが生じた後は、打継面で高さ方向にずれ、斜めひび割れが大きく開いてしまったため、スターラップのひずみが局所的に集中し、最終的にスターラップは降伏にいたっている。

鉛直打継目の打継面の処理方法が相違すると、コンクリートの強度にかかわらずスターラップのひずみ分布に大幅な差が見られる。プレストレスを導入することで、斜めひび割れの発生が遅れ、スターラップのひずみの増加を遅らせることが可能である。しかし斜めひび割れが生じると、打継面で高さ方向にずれてしまうため、スターラップのひずみは、局所的に集中し、最終的にスターラップは降伏にいたってしまうのである。

7. ま と め

本研究では、せん断スパン中央に鉛直打継目を有する RC 梁にプレストレスを導入する補強を施し、その斜めひび割れ性状およびせん断耐力についての導入効果を実験的に検討した。本研究の範囲内で、以下のことが言える。

- ① プレストレスを導入することにより、斜めひび割れの発生を遅らせることができ、スターラップの分担せん断力を軽減することが可能である。
- ② プレストレスを導入することにより、スターラップのひずみを抑制することが可能であるが、斜めひび割れが発生すると急激にスターラップのひずみは増加することがある。

③ 打継面の処理の良否が、プレストレスの導入効果に及ぼす影響は大きく、打継面の処理が粗悪であるとプレストレスの導入効果は小さい。

④ 高強度コンクリートを用いると、一般に打継目の悪影響が軽減されるが、この場合でも打継目の処理が重要である。

参考文献

- 1) 辻 幸和, 松浪康行, 橋本親典, 杉山隆文: 打継目の鋼板補強におけるグラウトの品質, 阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集, pp.373~376, 1996.1
- 2) 辻 幸和, 杉山隆文, 橋本親典, 松浪康行: 鉛直打継目を有する RC はりの鋼板補強に関する基礎研究, 土木学会論文集, No.571/V-36, pp.169~183, 1997.8
- 3) 示, 井上, 小林, 仁枝: プレストレスが PRC はり部材のせん断耐荷挙動に及ぼす影響, 土木学会第 53 回年次学術講演会講演概要集第 5 部, pp.1054~1055, 1998.10
- 4) 太田知則, 辻 幸和, 杉山隆文, 池田正志: 鉛直打継目を有する RC はりのせん断性状におけるプレストレス導入効果, 土木学会第 53 回年次学術講演会講演概要集第 5 部, pp.1060~1061, 1998.10
- 5) 池田正志, 辻 幸和, 杉山隆文: 鉛直打継目を有する RC はりにおけるプレストレスの補強効果, 土木学会第 56 回年次学術講演会講演概要集第 5 部, pp.1204~1205, 2001.10
- 6) 土木学会: コンクリート標準示方書 (平成 8 年度版) 設計編

<謝辞>

本研究は、科学研究費補助金基盤研究 (A) (1) (課題番号 11355020, 研究代表者 町田篤彦 埼玉大学教授) により実施したものである。本研究を遂行するにあたり、群馬大学大学院工学研究科 博士前期課程建設工学専攻に当時在学中の山口光俊氏, 金田和男氏, 宮前俊之氏, 中田 学氏, 岡本朋憲氏をはじめ、社会基盤工学第一研究室の諸氏には、多方面にわたり御援助頂き、深く感謝の意を表します。

【2002 年 4 月 8 日受付】