

論文 ひび割れの抑制を考慮した鉄筋コンクリート造有孔梁のせん断補強

高崎雄太^{*1}・香取慶一^{*2}・林静雄^{*3}

要旨：有孔梁では開口部における断面欠損に起因する応力やひび割れの集中が見られる。著者らは、孔周囲にPC、緊張材を配することにより、この孔周囲のひび割れ発生を抑制する工法を考案した。本研究は、本工法の乾燥収縮やせん断力に対する有効性を検討するために行ったものである。研究の結果、ひび割れ発生抑制やせん断耐力の向上が見られた。一方、このPC緊張材の偏在配筋は、かえって悪影響を与えることも確認できた。

キーワード：アンボンドPC鋼棒、緊張力、配筋方法、剛性、ひび割れの抑制

1. はじめに

有孔梁は開口部における断面欠損のため、施工後の乾燥収縮歪に起因するひび割れや、地震時せん断力によるひび割れや応力が開口部周辺に集中する傾向にある。この応力やひび割れの集中の緩和を目的に、孔周囲にPC緊張材を配する工法を著者らは考案した。本研究は、RC造有孔梁の乾燥収縮に起因するひび割れや、地震時せん断力に起因するひび割れや応力に対する孔周囲PC緊張材の有効性を検証するために行ったものである。

2. 実験概要

2.1 試験体概要、使用材料

表1に試験体一覧、表2に使用材料、図1に試験体・ゲージ位置図を示す。現行の一般的な有孔梁補強方法として、開口部補強筋（簡易補強金物）の使用が挙げられるが、本工法は簡易補強金物の代わりにPC鋼棒を用いるものである（試験体No.3～No.11）。試験体は、全て同形状（シアスパン比1.54）で計11体、変数は補強方法・補強筋量・緊張力導入量の3種類である。PC鋼棒への緊張力導入量はPC鋼棒の軸方向伸び歪で制御し、3章に記す引張実験の前に3000 μ （降伏ひずみの50%）、4800 μ （同80%）導入している。

PC鋼棒縦方向8本補強シリーズ（試験体No.3～No.5）は、簡易補強金物補強のNo.2と開口部補強量

($P_s \cdot \sigma_y$)がほぼ同じ値である6.6N/mm²となるようにし、また、せん断に対して直接効果がある方向にPC鋼棒を縦方向に配するよう設計した。PC鋼棒縦方向4本補強シリーズ（試験体No.6～No.8）はPC鋼棒8本シリーズより補強量が少なくなるように設計した。PC鋼棒横方向補強シリーズ（試験体No.9～No.11）は、直接乾燥収縮歪を抑える方向ということで横方向にPC鋼棒を配することとした。

研究は、乾燥収縮ひび割れに対する本工法の有効性の確認（第3章）と、曲げせん断力に対する有効性の確認（第4章）に大別される。全試験体とも、第3章の実験を行った後、そのまま第4章の実験に用いた。

表1 試験体一覧

試験体番号	補強方法	孔付近補強		$w \sigma_y$ (N/mm ²)	Q_{suo} (kN)	1本当たりの緊張力導入量(PCの降伏歪比)
		製品(PC)補強筋比[%]	せん断補強筋比[%]			
1	無補強	0.00			351.8	
2	簡易補強金物	0.57		784	309.7	
3	縦8本9.2PC-C種	0.38	0.30	1078	303.2	0kN (0%)
4	〃					36.3kN (50%)
5	〃					56.9kN (80%)
6	縦4本9.2PC-C種	0.19	0.30	1078	265.0	0kN (0%)
7	〃					36.3kN (50%)
8	〃					56.9kN (80%)
9	横4本9.2PC-C種	0.27	0.30	1078	281.9	0kN (0%)
10	〃					36.3kN (50%)
11	〃					56.9kN (80%)

w : 開口部補筋降伏強度(規格値), Q_{suo} : 修正広沢式開口部せん断耐力

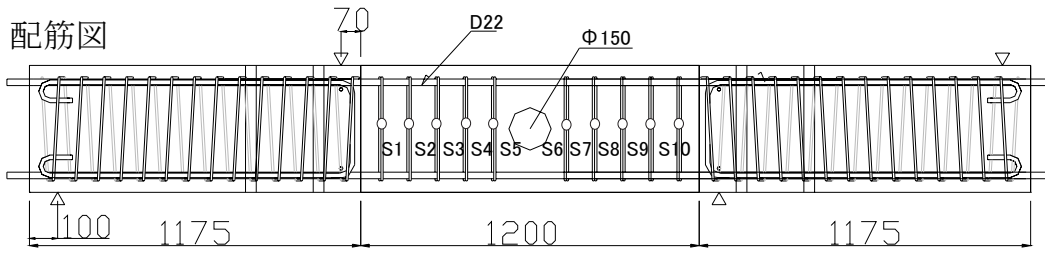
表2 使用材料一覧

種類	断面積 (mm ²)	降伏応力度 (MPa)	最大応力度 (MPa)	降伏歪 (μ)	ヤング率 (GPa)	伸び率 (%)
KSS785 S8 補強筋	50	1074	1124	5951	180	
KSS785 S8 簡易補強金物	50	1100	1168	6089	181	
D22 ネジボロ	380	1190	1309	6387	186	
アンボンドPC鋼棒9.2mm	66	1248	1286	6452	193	11.65
コンクリート設計基準強度	圧縮強度 σ	ヤング係数E				
	36N/mm ²	30.4N/mm ²	22.7GPa			

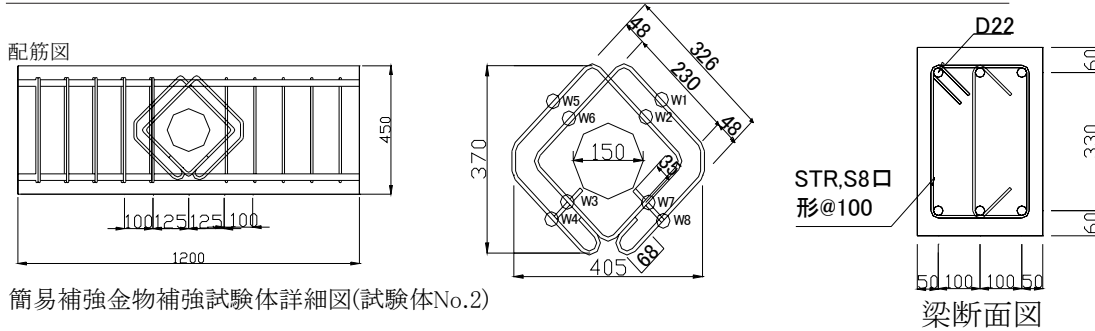
*1 東京工業大学大学院 (正会員)

*2 東京工業大学 建築物理研究センター 助手 工博 (正会員)

*3 東京工業大学 建築物理研究センター 教授 工博 (正会員)



無補強試験体詳細図(試験体No. 1)



簡易補強金物補強試験体詳細図(試験体No.2)

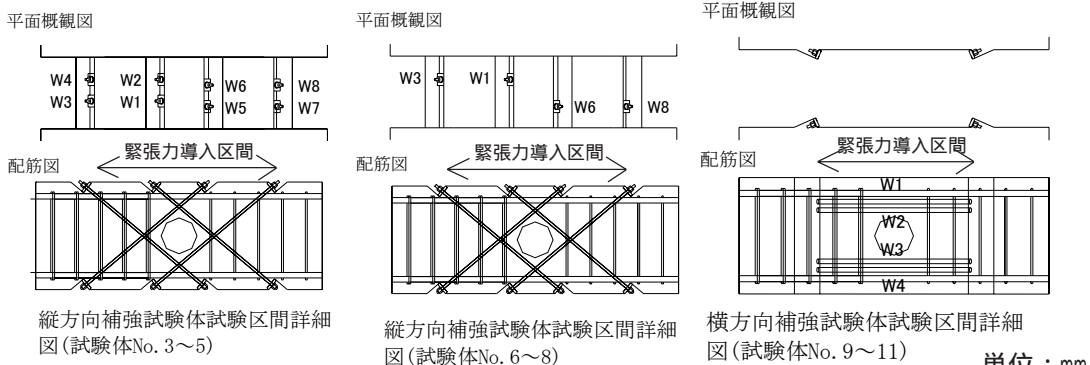


図1 試験体一覧, ゲージ位置図

単位: mm

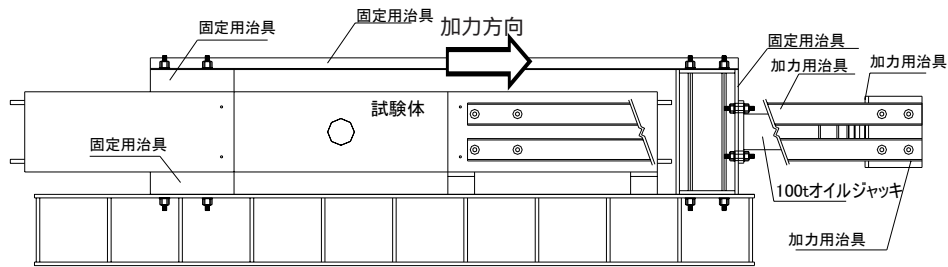


図2 軸方向引張実験装置図

3. 軸方向引張実験

3.1 実験方法

実験装置を図2に示す。試験体に擬似的に乾燥収縮ひび割れを起こさせるために、試験体軸方向に引張軸力を与えるものである。なお、スラブによる拘束は無視し、試験体に曲げやねじれのないように純粋な軸方向引張加力を行った。加力制御は試験体の軸方向伸び変位により行い、コンクリートに材齢30日前後で生じる乾燥収縮歪を400 μ程度と仮定し、その分を引張量(0.5mmに相当)として与える。

3.2 試験体ひび割れ発生状況

表3にひび割れ発生荷重を、図3にひび割れ図を示す。No.1, No.2は、開口部のひび割れが先行し、その後開口部以外の部分にもひび割れが生じる。

PC鋼棒縦方向8本補強の試験体では、緊張力が導入されていないNo.3はNo.1などと同様に、開口部付近からのひび割れが生じ、その後、開口部以外のひび割れが発生する。緊張力の量で比較すると、緊張力の多いNo.5の方が緊張力の少ないNo.4よりも開口部付近のひび割れ発生も遅かった。特にNo.5

表3 引張実験 実験結果表

ひび割れ発生箇所	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
開口部(kN)	164.5	127.5	49.0	226.1	218.7
開口部以外(kN)	164.5	127.5	49.0	97.1	218.7
最大引張時変位(mm)	0.94	0.50	0.53	0.49	0.50
最大引張時荷重(kN)	242.3	225.6	213.7	226.1	258.3

ひび割れ発生箇所	No.6	No.7	No.8	No.9	No.10	No.11
開口部(kN)	57.5	121.0	166.7	91.2	166.7	115.3
開口部以外(kN)	75.0	100.9	137.4	129.4	166.7	115.3
最大引張時変位(mm)	0.50	0.54	0.50	0.50	0.50	0.50
最大引張時荷重(kN)	207.5	230.5	255.0	250.1	218.8	248.3

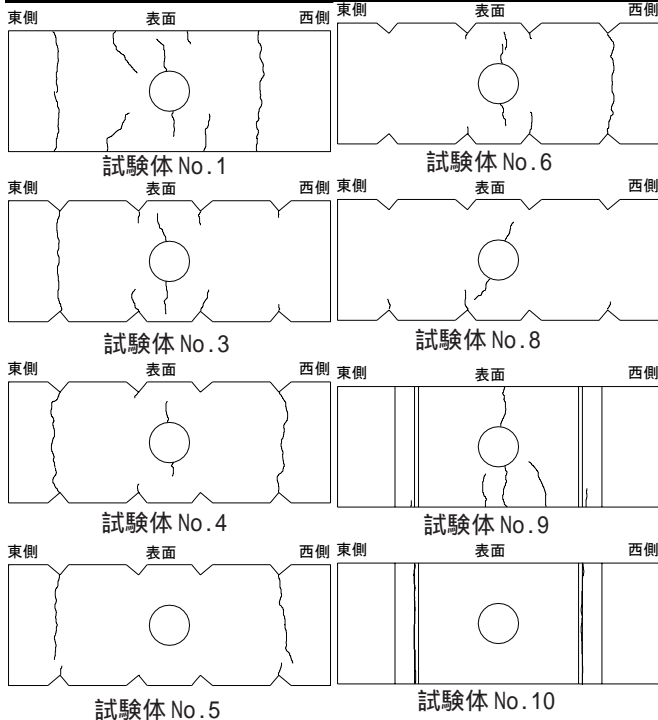


図3 引張実験ひび割れ図

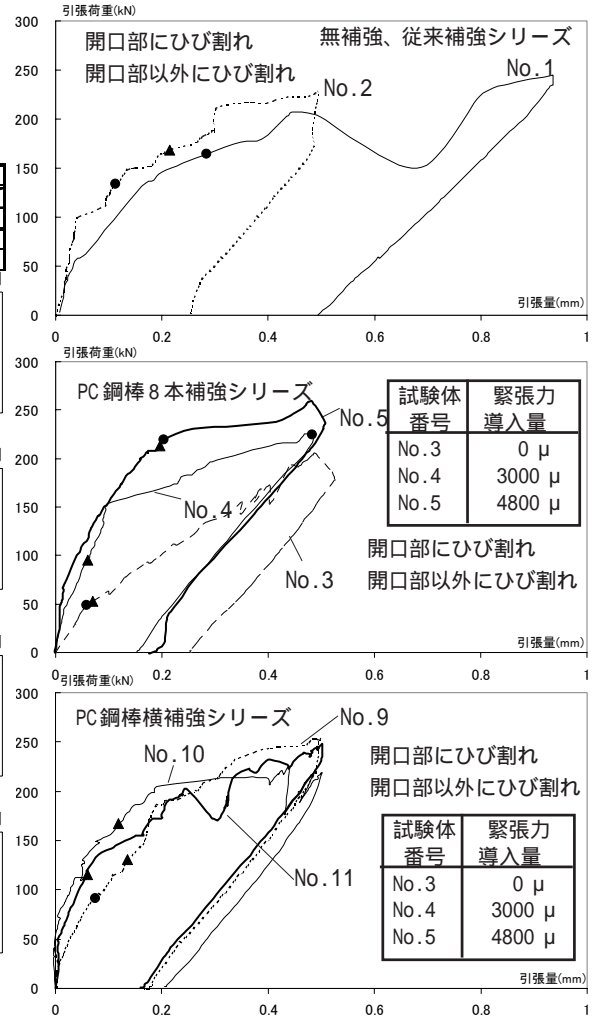


図4 引張実験 荷重 - 変位関係図

は裏面にわずかなひび割れが発生するだけである。これは、緊張力導入区間のひび割れが少ない分、その外側(特にノッチ部)にひび割れが多く発生するためであると考えられる。

PC鋼棒縦方向4本補強の試験体では、PC鋼棒縦方向8本補強のもの比べて、ひび割れ抑制の効果が少なくなっており、その緊張力も梁幅の片側にかかるようになってきている。よって、緊張力の効かない方向にひび割れが斜めに出てしまう結果になった。また、緊張力量が多いほど、ひび割れの長さが長くなる傾向になった。

横方向筋補強試験体では、補強方法が角度的にも軸方向の引張に対して有効であるため、緊張力の差異によらず、緊張力導入区間に顕著なひび割れは発生しなかった。

3.3 荷重 - 変位関係

補強方法ごとの荷重 - 変位関係を図4に示す。No.1, No.2の比較では、剛性や0.5mm変位時荷重が

No.2の方が大きくなっている。

PC鋼棒縦方向8本補強の試験体シリーズでは、緊張力のないNo.3よりも他の試験体の方が同じ荷重に対する変位は少なく、除荷後の戻り分も大きい。すなわち軸方向引張剛性が大きいということである。緊張力の多いNo.5の方がその傾向が顕著で、ピーク時の軸方向引張荷重もNo.3よりも2割ほど高くなっている。緊張力のある試験体は、ひび割れ発生後に変位が大きく進行しており、しかもそのひび割れの発生時期も遅くなっている。よって、緊張力の影響によりひび割れ発生が抑えられていることが分かる。PC鋼棒縦方向4本補強の試験体シリーズは、PC鋼棒縦方向8本のシリーズと同様の傾向が示された。

横補強のシリーズでも緊張力導入量が多いほど剛性が大きくなったが、ピーク時の荷重は小さくなった。これは、緊張力導入区間の剛性は大きくなったが、PC緊張材を配するために設けたノッチ部にひび割れが集中してしまったためと考えられる。

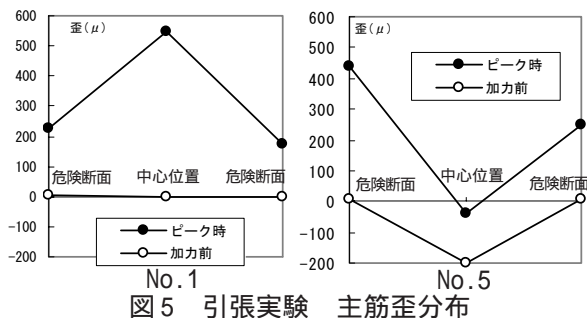


図5 引張実験 主筋歪分布

3.4 主筋歪分布

図5に加力前と0.5mm変位ピーク時の主筋歪分布図を示す。特にここでは、緊張力の導入されていない試験体No.1と緊張力導入量の一番多いNo.5を例として挙げる。ここでの加力前とは、引張実験前の緊張力導入時のことである。最大耐力時の歪は、開口部の断面欠損がより大きな試験区間中心位置での歪が増大する。これは、無補強のNo.1および緊張力導入のない他試験体で確認できた。一方、緊張力の導入されているNo.5では、中心位置があまり歪まず、逆に危険断面が歪む。そしてその中心の歪み分が少ないほど開口部付近のひび割れが少なくなる傾向にある。

4. 曲げせん断加力試験結果

4.1 実験方法

次に前章で扱った試験体に曲げせん断耐力実験を行った(図6)。加力制御は部材角(R)により行い、加力サイクルは下記とし、最終的にはせん断破壊するまで載荷した。

±1サイクル: $R = \pm 1/500 \text{ rad}$ (変形 = ± 2.4mm)

±2サイクル: $R = \pm 1/200 \text{ rad}$ (変形 = ± 6.0mm)

±3サイクル: $R = \pm 1/100 \text{ rad}$ (変形 = ± 12.0mm)

±4サイクル: $R = \pm 1/50 \text{ rad}$ (変形 = ± 24.0mm)

4.2 破壊状況

表5に諸現象発生荷重を、図7に±2サイクルまでのひび割れ図を示す。概して、緊張力の導入により、孔部対角方向ひび割れや孔部接線方向ひび割れの発生が遅れる傾向が見られ、特にPC鋼棒縦方向8本補強のシリーズで一番顕著であった。横補強シリーズは逆にノッチの影響が大きくなってしまい、No.1よりも耐力が低下した。また、このサイクルまでだとひび割れの発生が少なくなり、最終的には緊張力の導入によって特定のひび割れに

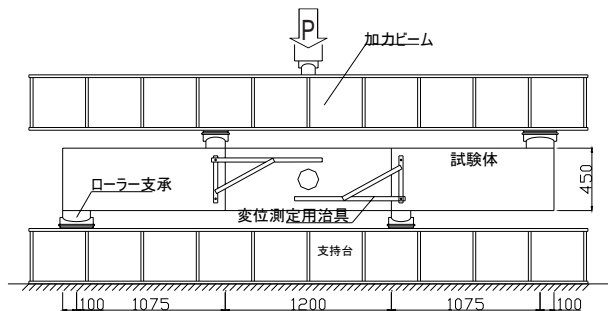


図6 曲げせん断加力装置図(正サイクル時)

表5 せん断実験 実験結果(全て正サイクル)

試験体 No.	緊張力導入量 (降伏歪比)	曲げひび割れ 荷重(kN)	せん断ひび割れ 荷重(kN)	孔部対角ひび割れ 荷重(kN)	孔部接線ひび割れ 荷重(kN)	最大荷重時	
						荷重(kN)	変位(mm)
No.1		53.9	181.3	79.4	208.7	272.0	9.93
No.2		49.4	122.9	86.3	239.6	337.2	11.62
No.3	0%	39.8	109.6	84.0	222.3	367.8	12.07
No.4	50%	48.2	124.7	134.8	351.0	426.5	12.26
No.5	80%	38.9	168.1	168.1	369.9	414.5	12.08
No.6	0%	39.5	112.5	83.9	199.7	319.3	10.79
No.7	50%	38.2	124.8	101.4	242.2	300.8	9.06
No.8	80%	39.5	150.8	137.6	260.5	341.6	10.08
No.9	0%	43.0	137.4	90.0	103.9	206.5	6.13
No.10	50%	39.8	123.7	110.2	290.3	292.6	8.74
No.11	80%	38.8	128.1	115.2	227.5	247.3	5.94

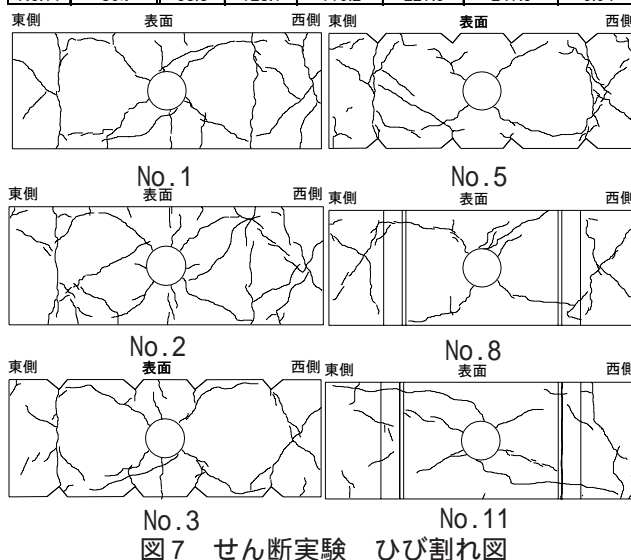


図7 せん断実験 ひび割れ図

破壊が集中するのではなく、多くのひび割れに分散する結果になった。

シリーズごとに細かく見ると、PC鋼棒縦方向8本補強のシリーズは緊張力の導入なしで簡易補強金物補強試験体とひび割れ発生荷重や最大耐力はほとんど変わらなかったが、緊張力を導入すると、最大耐力が12~16%ほど大きくなりひび割れ発生時期も遅らせられた。

PC鋼棒縦方向4本補強のシリーズは、緊張力が断面に対して偏在作用することから、緊張力を入れすぎると、孔部の対角方向及び接線方向の両方のひび割れの発生を遅らせることができるが最大耐力が逆に低下するという結果になった。配筋の関係上、表

面は正側の加力時には強く、負側の加力に弱くなるはずであり、実際、正サイクルで最終形に至った時には裏側の方が破壊が進行していた。

横補強のシリーズは、緊張力導入によってひび割れ発生時期が変化し、緊張力が導入されている試験体の方が多少早くなった。また、緊張力導入の多いNo.11は、2サイクルの正側でせん断破壊したため、横方向の緊張力の与え方は問題があると考えられる。ひび割れの入る角度は、縦補強とは異なり緊張力の多い試験体の方が寝る傾向であった。

最終的な破壊状況は、おおよそ全ての試験体で開口部接線方向ひび割れから卓越したひび割れによってせん断破壊している。

4.3 荷重 - 変位関係

荷重 - 変位関係のグラフを図8に示す。PC鋼棒縦方向8本補強の試験体シリーズは、緊張力の導入されていないNo.3よりも残り二つの試験体の方が最大荷重や最大変形が大きい。これは剛性が高くなっていることを示し、No.5は $R=+1/50\text{rad}$ ($\approx 24.0\text{mm}$) 近くまで加力しても大きな耐力低下はなかった。

PC鋼棒縦方向4本補強のシリーズは、緊張力導入量の多いほど、初期段階での剛性が高くなる傾向がある。緊張力を増すと、最大耐力は逆に低下してしまっただが、その後の耐力低下は少なく、最大変位も緊張力が増すほど大きくなっている。PC鋼棒8本補強のタイプと違い、断面に一樣な緊張力のかかり方をしないため、不安定な応力状態になったことが原因と考えられる。

PC鋼棒横方向補強のシリーズでも緊張力導入量が多いほど初期剛性が高くなるが、最大耐力は逆に低下した。初期剛性や孔部対角方向ひび割れまでの剛性などはどの補強シリーズよりも高くなったが、諸ひび割れ発生荷重が早くなったため、見かけの剛性が落ちた。そのため、従来補強の簡易補強金物によるNo.2よりも耐力が小さくなっている。

4.4 剛性について

表6にNo.1～No.5の剛性を、図9にNo.1, No.3, No.5の荷重 - 層間変位の包絡線を示す。曲げひび割れ発生直前、孔部対角方向ひび割れ発生、孔部接線方向ひび割れ発生、最大耐力時のそれぞれの接線剛性を

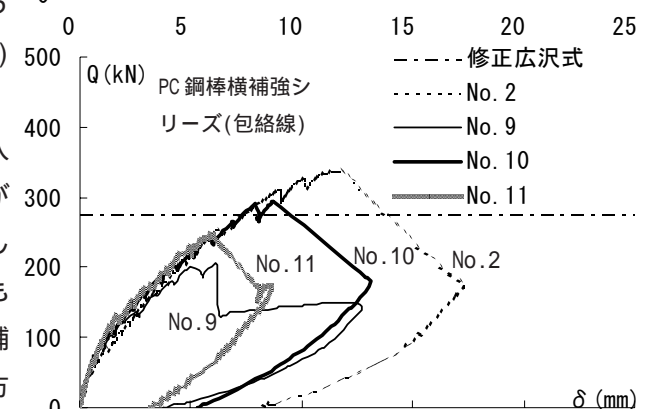
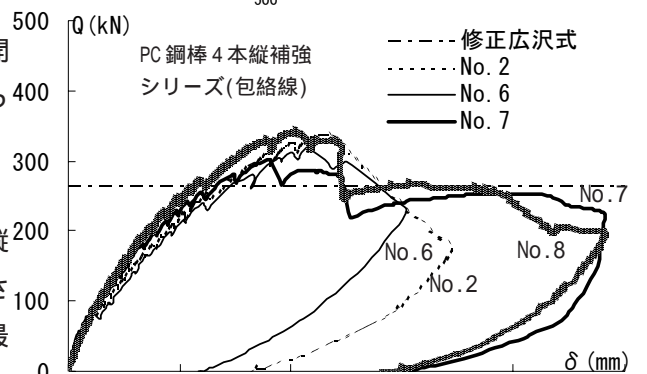
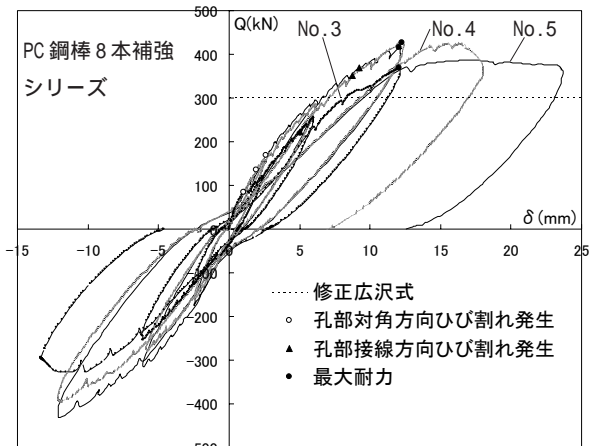


図8 せん断実験 荷重 - 変位曲線

表6 剛性表(試験体No.1～No.5)

	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
曲げひび割れ発生直前 K1(kN/mm)	102.7	107.5	106.3	101.7	96.7
孔部対角方向ひび割れ K2(kN/mm)	53.3	58.1	68.2	61.4	58.5
孔部接線方向ひび割れ K3(kN/mm)	33.2	30.9	34.7	31.5	30.7
最大耐力 K4(kN/mm)	12.7	17.6	20.7	21.6	15.5

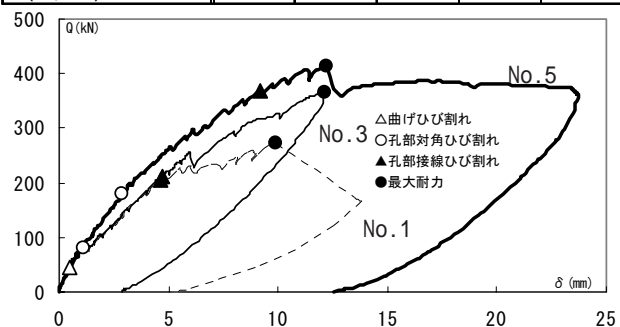


図9 せん断実験 荷重 - 変位包絡線

求めてみると、ほぼ同じような値をとっている。しかし、実際の包絡線を比べると、剛性が上がっているように見える。これは、それぞれのひび割れ発生時期などを緊張力によって抑えることが出来たため、見かけの剛性が上がったと考えられる。

4.5 補強筋歪分布

図10に3サイクル時ピークの補強筋歪分布を示す。No.1や緊張力の導入されていない試験体などは似たような挙動を示し、開口部に一番近い補強筋の歪が卓越していく。緊張力の導入されているNo.5, No.8は開口部付近の補強筋に歪が集中するのではなく、その外側の補強筋にも歪を生じさせている。特にNo.5は、他の試験体に比べて補強筋の歪分布が全補強筋間で近い値になっている。試験区間の各位置の補強筋それぞれが同じようなせん断力を受け持つ力の流れ方になっているのが分かる。しかし、No.8はPC鋼棒縦方向8本補強試験体のNo.5と似たような傾向を示したが、緊張力が断面に一樣にかからないため、試験体の左右で安定した挙動を示していない。

4.6 開口部補強筋歪分布

図11に開口部補強筋歪分布を示す。全体的な挙動として、正サイクルと負サイクルで効く補強筋が明らかに別れている。No.2とPC鋼棒8本補強されているNo.3を比べると、PC鋼棒で補強されている試験体の方が加力前からの歪の進行度合いが多い。緊張力の導入されているNo.5は緊張力が導入された直後から最大耐力時までの歪む分が緊張力の導入していないNo.3に比べて少ない。また、緊張力導入量の多いほどその傾向は顕著である。そして、No.5は、PC鋼棒が緊張力の効かない側のサイクルの時は逆に圧縮側に転じた。

PC鋼棒縦方向4本補強のNo.8は、No.5と同じような挙動を示したが、PC鋼棒の本数が少ない分1本あたりの受け持つ力が増えるため、サイクルごとの歪の進展が大きい値となり、最終的にはPC鋼棒のうち1本が破断した。横補強のシリーズは、加力を進めても歪が最大でも300 μ 程度とわずかしき変化せず、せん断補強にはほとんど貢献していないと思われる。

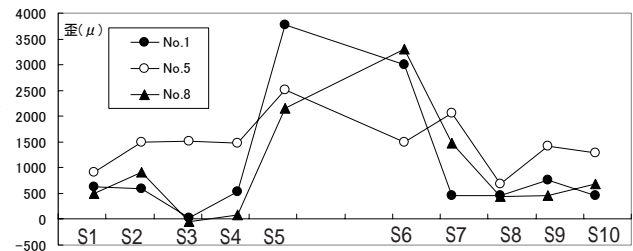


図10 せん断実験 補強筋歪分布

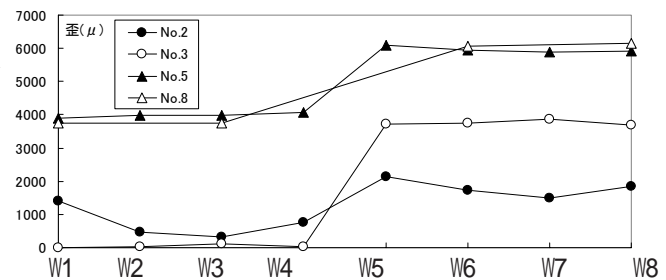


図11 せん断実験 開口部補強筋歪分布

5. まとめ

開口部周りにPC緊張材を配した効果を検討するために行った本実験より以下の知見を得た。

1. 断面に一樣に緊張力をかけることのできるPC鋼棒8本を用いた補強方法は、緊張力の導入により乾燥収縮ひび割れやせん断ひび割れ発生を抑える効果がある。また、軸引張力とせん断耐力の向上ももたらす。
2. PC鋼棒4本を縦に補強した試験体は、断面に偏った力がかかってしまうため、軸引張力やせん断耐力を向上させる効果は少ない。
3. 横方向補強の試験体は、試験体軸方向の引張に対しては有効な補強効果を発揮したが、せん断耐力的には向上が見られなかったため、補強効果がないものと思われる。

【参考文献】

- 1) 田所, 三橋, 清水, 林, 香取: 「高強度鉄筋コンクリート造有孔梁の開孔補強に関する実験的研究」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, PP. 353-354, 2001年9月
- 2) 広沢, 「鉄筋コンクリート造有孔梁の設計方法に関する総合的な検討」, (財)日本建築センター平成5年度研究助成報告書 No. 9302
- 3) 広沢, 清水: 「鉄筋コンクリート造有孔梁のせん断強度とじん性」, 建築技術, PP. 93-101, 1979年3月

謝辞: 大阪大学の中塚信先生に多くのご指導を受けました。また、試験体の作成にご協力くださった高周波熱練やティエム技研の方々にも感謝の意を表します。

本研究は東京工業大学建築物理研究センター共同利用研究の一貫として行われたものである。