

論文 硬化を制御した樹脂で被覆したPC鋼材より線を用いたPRC大梁の耐震特性に関する実験研究

佐々木勇^{*1}・松崎育弘^{*2}・鈴木計夫^{*3}・松谷輝雄^{*4}

要旨：本報は、硬化を制御した樹脂で被覆したPC鋼材より線を用いた(アフターボンド工法)PRC大梁部材を基本試験体とし、その構造性能および復元力特性の把握と、グラウト工法やアンボンド工法およびRC構造との比較実験を行い、その基本的な耐震性能を報告するものである。結果としてアフターボンド工法は、グラウト工法との性状の一致、プレストレスによる剛性および主筋に沿った付着ひび発生荷重の制御、またRC梁との比較により、付着性能の改善を図れることが明らかになった。

キーワード：プレストレス、アフターボンド工法、剛性、付着、大梁

1. はじめに

わが国のプレストレスコンクリート〔以下PC〕構造においては、大梁のような耐震性能に直接影響を及ぼす部材にはPC鋼材とコンクリートの間に付着がとれるグラウト工法を用いることになっている。しかし、グラウト工法は、作業が繁雑である。そこで、あらかじめPC鋼より線、シース、エポキシ樹脂を工場で一体化したアフターボンドPC鋼材(図1)を用いことでPC鋼より線の挿入、グラウトの注入といった繁雑な作業なくし、なおかつ樹脂が固まることでグラウト工法と同様に付着がとれることを目的にアフターボンド工法〔1〕が開発された。また、近年RC造建物の高層化が図られているなか、梁のスパンの設定によっては、剛性の低下が懸念される。そこで、同一断面で同等の耐力を有するように剛性の改善を図る1つの方法としてプレストレス化が上げられる。また、RC構造において、主筋断面を多くする方法も考えられるが、むやみに主筋を配列すると、付着割裂による部材の耐力劣化が懸念される。その改善策としてRC構造の主筋(図1 A type)をPC鋼材におきかえたPRC構造(図1 B, C type)化が上げられる。つまりあらかじめPC鋼材を緊張することにより主筋に入る引張入力をおさえることで、付着性能の改善が可能であると考えられる。本報は、このようなことをふまえ、アフターボンド工法を用いたPRC大梁部材を基本試験体とし、その構造性能および復元力特性の把握と、グラウト工法やアンボンド工法およびRC構造との比較実験を行い、その基本的な耐震性能を得ることを目的とする。

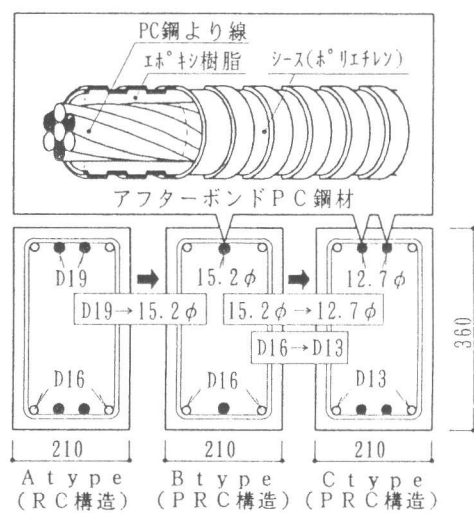


図1. 断面形状およびPC鋼材

- *1 安藤建設(株)、工修(正会員)
- *2 東京理科大学教授 工学部建築学科、工博(正会員)
- *3 大阪大学教授 工学部建築工学科、工博(正会員)
- *4 (株)鴻池組技術研究所長(正会員)

試験体名	主筋（材質）	構造	工法	プレストレス				計算値
				P_e/P_{py} %	P_n/P_{py} %	P_n t f /本	σ_g kgf/cm ²	
RC-A-0	2-D16(SD345)+2-D19(SD345)	RC						15.0
AB-B-0	2-D16(SD345)+ 1-15.2φ(SWPR7B)	PRC	アフターボンド工法	0.0	0.03	0.8	2.1	17.0
AB-B-4				0.40	0.39	10.4	27.5	
AB-B-8				0.80	0.73	19.3	51.1	
GB-B-0			グラウト工法	0.0	0.0	0.0	0.0	16.8
GB-B-4				0.40	0.36	9.8	25.9	
GB-B-8				0.80	0.70	18.8	49.7	
AB-C-0	2-D13(SD295)+		アフターボンド工法	0.0	0.05	0.9	4.8	18.7
AB-C-8	2-12.7φ(SWPR7B)			0.80	0.72	13.3	70.4	
UB-C-8			アンボンド工法	0.80	0.68	12.6	66.7	

P_e : 計画時のプレストレス, P_n : 実験時のプレストレス, P_{py} : PCより線の降伏荷重, $\sigma_g = P_n / (b \cdot D)$
 計算値: RC標準曲げ耐力計算式 $Q_{mu} = 0.9 a_t \cdot \sigma_y \cdot d / a$, GB-B-0の P_n は測定していないので参考値

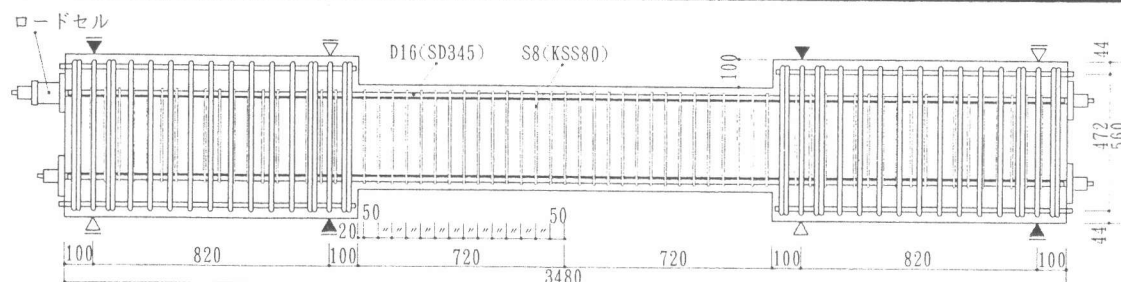


図2. 試験体形状および一覧

2. 実験概要

2.1 試験体

図2に試験体形状および一覧を示す。
 試験体は実大の1/3スケールであり、試験区間断面は $b \times D = 21 \times 36$ cmの矩形で、せん断スパン $a = 72$ cm ($a/D = 2.0$)、補強筋比 $p_w = 0.95\%$ (50mm間隔)とした。また、PC鋼材の緊張定着後、エポキシ樹脂の硬化を促進させるために約55度で20日間蒸気養生を行った。

変動要因は、次の3要因を計画した。

1) 基本的な性能(主筋の付着性能等)を把握する上で、工法(構造)による比較を4種(RC構造[以下RC], アフターボンド工法[以下AB], グラウト工法[以下GB], アンボンド工法[以下UB])。

2) 図1に示したように、PC鋼材は曲げ耐力が期待できる主筋と同じ並びに配置し、RC曲げ耐力計算式による曲げ耐力がほぼ同等となるような主筋の配置を3種(A, B, C type)。

3) 部材の剛性および主筋の付着性能の制御を目的に、PC鋼より線の降伏荷重に対するプレストレスの割合(P_e/P_{py} , [以下プレストレス量])を3種(0%, 40%, 80%)。

本実験で使用した鉄筋の材料試験結果を表1に、コンクリートの材料試験結果を表2に、PC鋼より線の材料試験結果を表3に示す。主筋の降伏強度は3580~3820kgf/cm²、補強筋の降伏強度は9780kgf/cm²、実験時のコンクリート圧縮強度は324~380kgf/cm²であった。PC鋼より線は15.2φと12.7φのSWPR7B材を使用し降伏強度は18740~19140kgf/cm²であった。

表1. 鉄筋材料試験結果

使用箇所	種類	降伏強度 kgf/cm ²	降伏歪み $\times 10^{-6}$	ヤング係数 $\times 10^6$ kgf/cm ²	引張強度 kgf/cm ²
主筋	D13	3580	1810	1.97	5230
主筋	D16	3750	2020	1.97	5550
主筋	D19	3820	2220	2.01	5730
補強筋	S8	9780	9780	2.16	11510

表2. コンクリート材料試験結果

試験体NO.	圧縮強度 kgf/cm ²	ヤング係数 $\times 10^6$ kgf/cm ²	割裂強度 kgf/cm ²
1	367	2.56	30.2
2, 3, 4	324	2.38	26.3
5, 6, 7	341	2.36	32.1
8, 9, 10	380	2.46	27.5

表3. PC鋼より線材料試験結果

種類	降伏強度 kgf/cm ²	降伏荷重 t f	ヤング係数 $\times 10^6$ kgf/cm ²	引張強度 kgf/cm ²
15.2φ(AB)	18900	26.6	1.88	19650
15.2φ(GB)	19140	26.9	1.90	19790
12.7φ	18740	18.5	1.94	19350

(AB): アフターボンド, (GB): グラウトボンド

2. 2 加力方法

図3に加力模式およびCYCLEを示す。加力は、試験体の左右端をピンローラー支持した状態で上下の油圧ジャッキを個々に制御し、梁両端の相対変位($\delta 1, \delta 2$)が等しくなるように図3のような加力CYCLEで正負交番繰り返し载荷した。また、荷重($P1, P2$)、相対変位($\delta 1, \delta 2$)およびP C鋼材の付着性能を示す定着部の定着力(図2参照)をロードセルにより電氣的に測定した。

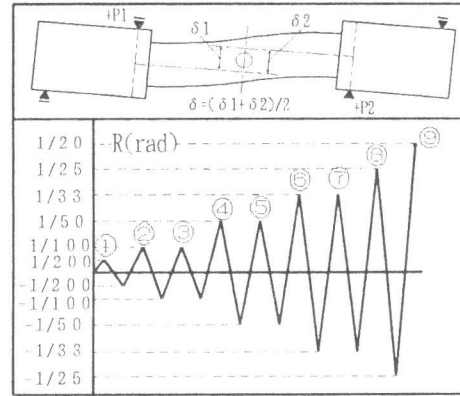


図3. 加力模式およびCYCLE

3. 実験結果および検討

3. 1 破壊性状

図4に最終破壊状況、表4に実験結果一覧を示す。主筋とコンクリートの間に付着のとれるRCやABおよびGBは、主筋位置に沿った付着ひびが確認された。その後の繰り返しにより、RCは、細かい付着ひびが多く入り、そのひびが主筋上端に沿って大きく目開き、一本の付着ひびに進展して破壊に至った。それに対し、AB、GBは、細かい付着ひびは多く入るものの卓越したひびは見られなかった。なお、破壊経過におけるABとGBによる差異はみられなかった。UBは、梁端隅角部が圧縮されることによるコンクリートの劣化が激しく、最終的には曲げ圧縮破壊に至った。

3. 2 変形状

図5(a)~(c)にせん断力Q-相対変位 δ 曲線を示す。RC-A-0は、計算値 Q_{mu} 付近で曲げ降伏を起こし、その後、部材角 $R=1/100\text{rad}$ で主筋に沿った付着ひびの発生により逆S字型のエネルギー吸収の少ないループ性状を示した。AB-B-8は、RC-A-0と

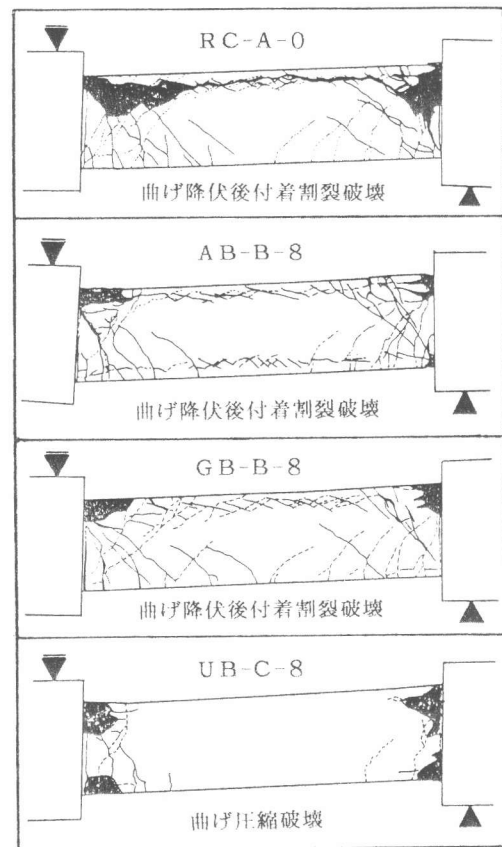


図4. 最終破壊状況

表4. 実験結果一覧

試験体	曲げひび		せん断ひび		鉄筋降伏		部材降伏		R=1/200		R=1/100		R=1/50		R=1/33		最大耐力		最終破壊モード
	Q	δ	Q	δ	Q	δ	Q	δ	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	δ	
	t f	mm	t f	mm	t f	mm	t f	mm	t f	t f	t f	t f	t f	t f	t f	t f	t f	mm	
RC-A-0	4.2	1.02	13.0	6.25	15.0	9.91	15.7	9.91	13.2	16.2	16.0	14.9	16.3	14.31					曲げ降伏後付着割裂破壊
AB-B-0	3.5	0.89	8.4	7.29	8.0	5.93			8.4	10.4	13.1	14.8	14.8	43.68					付着割裂破壊
AB-B-4	5.5	1.20	10.0	4.91	11.0	5.94			11.7	13.7	15.7	16.5	16.8	43.61					付着割裂破壊
AB-B-8	7.5	1.52	13.0	5.86	13.6	6.50	17.9	21.94	14.2	17.1	17.6	17.0	17.9	21.94					曲げ降伏後付着割裂破壊
GB-B-0	3.5	1.00	7.0	4.30	9.0	6.67			9.3	11.6	14.2	15.3	15.3	43.60					付着割裂破壊
GB-B-4	5.0	0.83	11.0	5.24	11.8	7.20			12.7	15.5	17.8	18.6	18.6	43.54					付着割裂破壊
GB-B-8	7.0	1.24	12.0	4.51	14.9	8.30	17.9	17.25	14.5	17.7	18.1	18.4	18.4	42.16					曲げ降伏後付着割裂破壊
AB-C-0	3.0	0.94	6.8	5.87	5.5	3.97			6.8	10.3	13.8	14.9	14.9	43.44					付着割裂破壊
AB-C-8	8.0	1.47	14.5	4.03	12.0	4.03	17.6	17.48	14.5	17.6	18.0	18.6	18.7	43.08					曲げ降伏後付着割裂破壊
UB-C-8	9.0	2.14			12.0	4.01			13.8	15.2	14.8	14.5	15.2	14.46					曲げ圧縮破壊

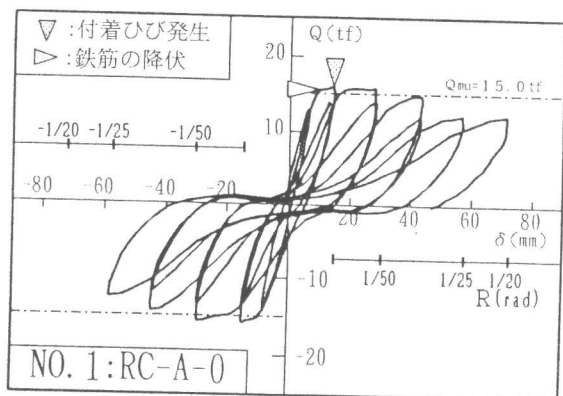


図 5 (a). $Q-\delta$ 曲線 (RC 構造).

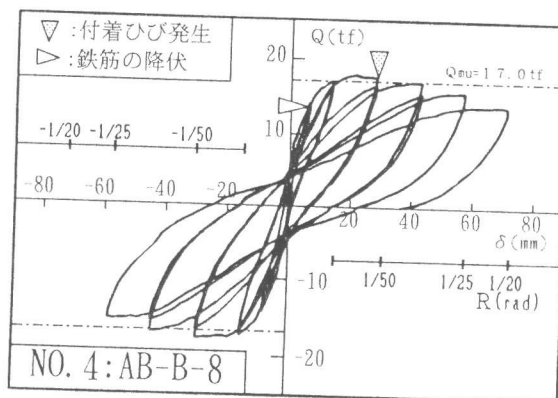


図 5 (b). $Q-\delta$ 曲線 (アフターボンド工法).

同等以上の剛性を示し、RC-A-0より大きい部材角 $R=50\text{rad}$ で付着ひびが発生し、その後、紡錘型のエネルギー吸収の大きいループ性状を示し、改善が図れた。主筋とコンクリートの間に付着のとれない UB-C-8 は、RC、AB ほどの耐力上昇はなく繰り返しの耐力低下の少ない復元力特性を示した。

3. 3 アフターボンド (AB) 工法とグラウト (GB) 工法の比較

図 6 (a)~(c) にアフターボンド工法とグラウト工法の $Q-\delta$ 包絡線の重ね書きおよび各部材角 R での Q -定着力 ΔP (定着部は図 2 参照) を合わせて示す。なお、 ΔP は、加力直前を規準点の 0 tf とする。

a) プレストレス量 = 0 % の場合

鉄筋の降伏および剛性の一致、さらに付着ひびの発生についてもほとんど同じ付近でみられ、AB は $R=1/50\text{rad}$ で定着力 $\Delta P=3\text{tf}$ を生じたが、履歴性状の一致を示した。

b) プレストレス量 = 40 % の場合

鉄筋の降伏 $R=1/200\text{rad}$ まで剛性の一致を示した。その後、AB は、 $R=1/100\text{rad}$ の CYCLE において、定着力 ΔP が 1.0 tf 以上となったあたりから GB ほど耐力が上がらなくなり ($R=1/50\text{rad}$ では GB と比較し定着力 ΔP の逆転がみられたが) $R=1/33\text{rad}$ の付着ひび発生後、明かな耐力低下をおこした。また本実験で用いた GB のシース径が AB よりも大きいので、その影響による場合も考えられる。

c) プレストレス量 = 80 % の場合

AB は、 $R=1/50\text{rad}$ で定着力 ΔP が約 1.0 tf 生じたが、プレストレス量 = 0% と同様に、AB は GB と同等の履歴性状を示した。

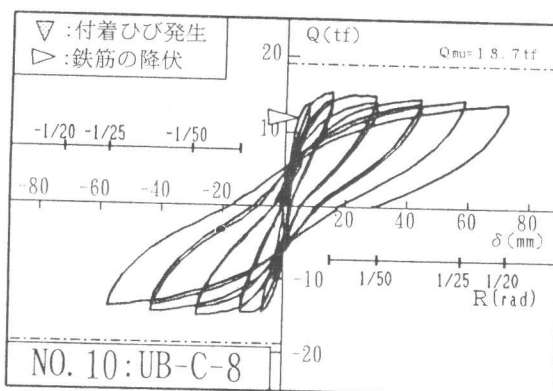


図 5 (c). $Q-\delta$ 曲線 (アンボンド工法)

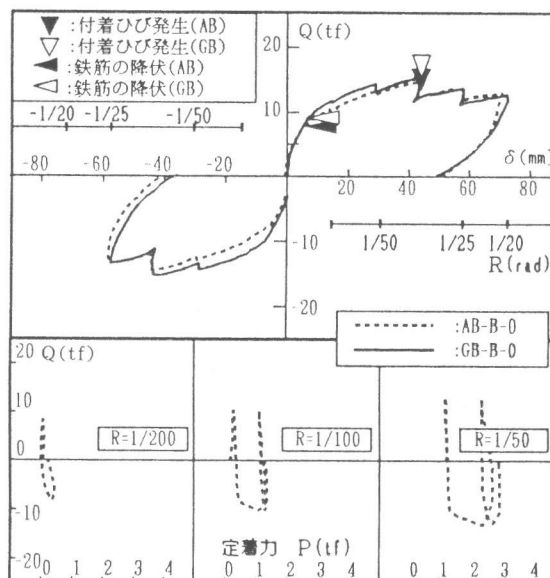


図 6 (a). $Q-\delta$ 包絡線 ($P_e/pPy=0\%$)

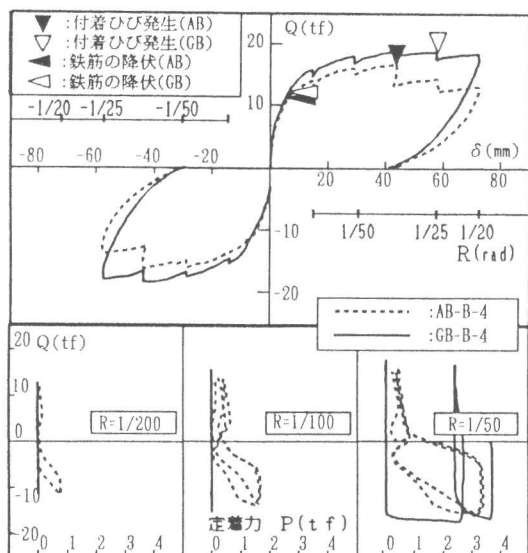


図 6 (b). Q- δ 包絡線 ($P_e/pPy=40\%$)

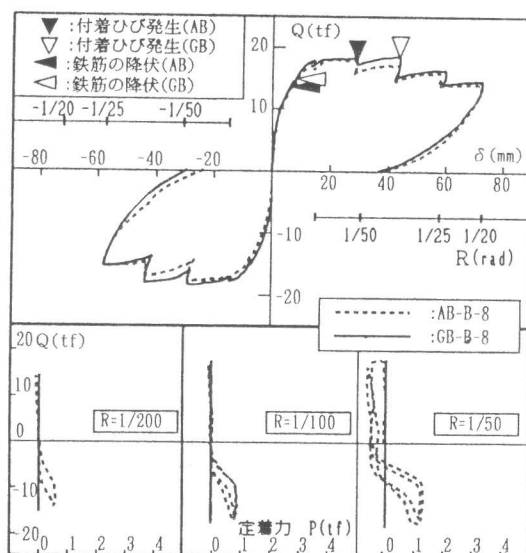


図 6 (c). Q- δ 包絡線 ($P_e/pPy=80\%$)

以上のことから、最もプレストレス量の大きい 80%の試験体において履歴性状が一致したことより、アフターボンド工法はグラウト工法と同様に PRC 構造部材として耐震性能に優れているといえる。AB の定着部は、载荷初期より定着力の変動 (PC 鋼材とコンクリートの付着が切れる) がみられるため、その定量化が必要である。

3. 4 プレストレス量による剛性の制御

図 7 にアフターボンド工法 B type の Q- δ 包絡線を示す。プレストレス量を上げることにより曲げひび、せん断ひび (表 4 参照) および鉄筋の降伏をおくらせることで剛性が上昇し、部材角初期での耐震性能が改善された。つまりアフターボンド工法において、剛性制御の 1 つの指標としてプレストレス量が考えられる。

3. 5 付着性能の改善

表 5 に付着応力度計算結果を示す。図 7 の付着ひび発生荷重は、プレストレス量が多いほど高い値を示した。これは、PC 鋼材 (主筋) に多くプレストレスを入れるほど素材降伏までの余力、すなわち引張入力が少なくなることにより主筋に沿った付着ひびの発生荷重が高くなったと思われる。また、RC-A-0 と同等以上の剛性を示した AB-B-8 は、RC-A-0 と比較し、主筋の付着性状の向上により履歴性状の改善が顕著にあらわれた。これは RC-A-0 と AB-B-8 の主筋の違いである D19 と 15.2 ϕ に着目し、次のようなことから検証できる。部材降伏時の D19 と 15.2 ϕ の梁端での引張力の増分は、D19 は素材降伏荷重、15.2 ϕ は既に降伏に対して 80% 緊張してあるので素材降伏までの残り 20% の荷重ということになる。つまり、断面の平面保持を仮定し、せん断スパン長の最大平均付着応力度 τf を考えると、D19 は 25.5 kgf/cm²、15.2 ϕ は 10.9 kgf/cm² と明らかに差があることより説明される。このことから、同じ断面で同等の曲げ耐力および剛性を設計する場合、RC 構造を PRC 構造にすることで主筋の付着性状の改善を図れることが明らかとなった。

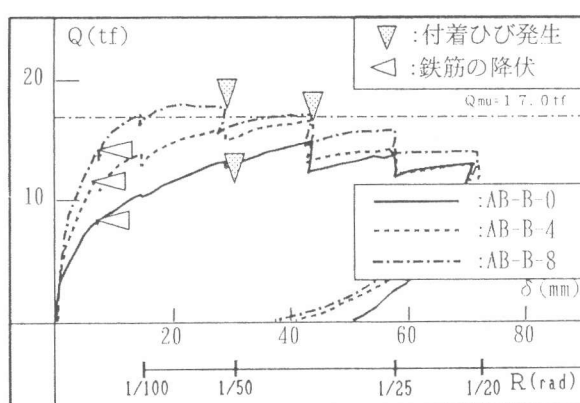


図 7. Q- δ 包絡線 (アフターボンド工法)

表 5. 付着応力度計算結果

種類	主筋	周長 l cm	降伏荷重 P_y tf	余力荷重 $P_{y'}$ tf	τf kgf/cm ²
RC-A-0	D19	6.0	11.0	11.0	25.5
AB-B-8	15.2 ϕ	6.9	26.9	5.4	10.9

$\tau f = P_{y'}/(l \cdot a)$, 15.2 ϕ の周長はシース外径
 $pPy' = 0.2 \cdot pPy$, a : せん断スパン (= 72 cm)

3. 6 定着力 ΔP による付着性能

図8にアフターボンドP C鋼材の引張り模式を示す。負荷荷の定着力 ΔP はロードセルより、加力直前を基準点の0tfとした梁端の引張り $\Delta P'$ は、平面保持が成り立つと仮定し、鉄筋の降伏荷重 sPy および既に緊張されている引張り P_n を考慮して、次式より求める。

$$\Delta P' = Q \cdot a / j - \sum sPy - P_n$$

AB-B-4の定着力 ΔP と梁端引張り $\Delta P'$ の割合 $\Delta P' / \Delta P$ は、 $R=1/200$ と $1/100rad$ ではほぼ同様な値を示し、 $R=1/50rad$ では低くなり、付着がきれていく様子がわかる。GB-B-4は、 $\Delta P' / \Delta P=6.41$ ($R=1/50rad$)となりABと比べると若干高い値となり付着能がよいことがわかる。またAB-B-8の部材降伏時では、 $\Delta P'=0.2 \times (\text{降伏荷重})$ 、 $\Delta P' / \Delta P=5.89$ となりAB-B-4の $R=1/200, 1/100rad$ とほぼ同じ値となり式の妥当性があることがわかる。

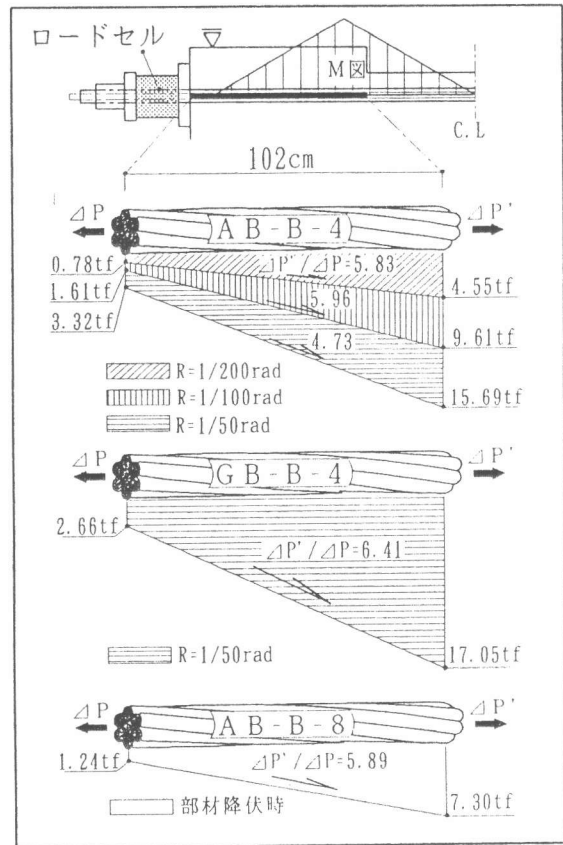


図8. 引張り模式

4. まとめ

アフターボンド工法を用いたP R C大梁部材を基本試験体とし、その構造性能および復元力特性の把握と、グラウト工法やアンボンド工法およびR C構造との比較実験を行い、その基本的な耐震性能を得ることができ、以下のことが明らかとなった。

- 1) 施工性の優れたアフターボンド工法による梁の基本性能は、グラウト工法による梁と比較してせん断力 Q -相対変位 δ 曲線がほぼ同じ結果を示したことから、アフターボンド工法はグラウト工法と同様に付着を期待したP R C構造の大梁として利用できることが確認できた。
- 2) アフターボンド工法を用いたP R C構造梁部材においも、従来のP R C構造梁部材と同様にプレストレス量により剛性および付着ひびの発生荷重を制御することが可能である。
- 3) 同じ梁断面で同等の曲げ耐力および剛性を確保することを意図して設計する場合、付着性能の改善策として、R C構造をP R C構造にすることが有効である。

謝辞

神鋼鋼線(株)よりP C鋼材を提供して頂きました。住友電気工業(株)より補強筋等を提供して頂きました。また、本実験にあたっては、東京理科大学 松崎研究室 卒研究生の河村良夫氏・新具誠次氏に協力して頂きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 材寄勉・南敏和・小林剛：アフターボンドP C鋼材の諸特性について
プレストレストコンクリート, Vol. 32 NO. 4 jul. 1990 pp91~pp98