

論文 高強度鉄筋を用いてプレストレスを導入した PRC 合成梁の長期曲げ性状

尚 自端*1・大野 義照*2・鈴木 計夫*3・鳥居 洋*4

要旨：高強度鉄筋を用いてプレストレスを導入したハーフプレキャスト梁に後打ちコンクリートを打設した PRC 合成梁の持続載荷実験を 2 年間にわたって行い、曲げひび割れ幅やたわみの経時変化を調べた。梁試験体の数は 6 体で、実験要因は鉄筋緊張応力の大きさ、プレストレスの導入方式等で、比較のために一体打はりも作成した。プレストレスの導入によって初載荷時、長期のひび割れ幅及びたわみを制御することができた。ただし、持続載荷中のひび割れ幅の増加量にはコンクリートの乾燥収縮が、たわみの増加量には乾燥収縮とクリープが大きく影響するので、プレストレスの効果は相対的に小さくなる。

キーワード：高強度鉄筋、プレストレス、PRC 合成梁、ひび割れ、たわみ

1. まえがき

高強度鉄筋は、ひび割れやたわみ制御のため常時荷重に対しては許容される鉄筋応力は制限され、その強度特性を有効に利用できないが、プレストレスト鉄筋コンクリート (PRC) 部材の緊張材として用いることによって活用できる¹⁾。一方、施工の合理化、省資源、品質の向上の観点から部材の一部をプレキャスト化し、現場で後打ちコンクリートと一体化するハーフプレキャスト工法が普及してきている。

本報告では、高強度鉄筋 SD495 を緊張し、プレテンション方式でプレストレスを導入したプレキャスト部材と後打ちコンクリートからなる PRC 合成梁のひび割れやたわみ等の長期曲げ性状を、プレストレス力等を実験要因にした二年間の持続載荷実験によって調べた。

2. 実験概要

2. 1 試験体の種類及び載荷方法

試験体の種類を表 1 に示す。実験要因は鉄筋の緊張応力 ($\sigma_s=0, 300\text{MPa}$)、持続荷重の大きさ ($M=2.07 \times 10^4, 1.44 \times 10^4\text{Nm}$)、制

作方法 (合成断面と一体打ち断面の比較)、およびプレストレス力の導入方法 (プレテンション/ポストテンション) である。

表 1 試験体の種類

試験体番号	目標圧縮強度 (MPa)		目標鉄筋緊張力 (MPa)	引張側鋼材		持続載荷 (10 ⁴ Nm)
	プレキャスト	後打ち		異形鉄筋	PC 鋼棒	
No.1	50	24	—	3-D13	—	2.07
No.2	50	24	300×1	3-D13	—	2.07
No.3	50	24	—	3-D13	—	1.44
No.4	24 (一体)		—	3-D13	—	2.07
No.5	50	24	—	3-D13	φ 9	2.07
No.6	50	24	300×2	3-D13	—	2.07

試験体の形状及び載荷方法を図 1 に示す。試験体は、断面 16×32(cm)、長さ 290cm の複筋長方形梁である。NO.4 は一体打ちで、その他は断面 16×25(cm) のプレキャストコンクリート梁に 16×7(cm) のコンクリートを打ち継いだ合成梁である。後打ちコンクリートは先打ちコンクリート材令 7 日に打設した。NO.2, NO.6 は高強度鉄筋の緊張によりプレテンション方式で後打ちコンクリートの打設直前にプレストレスを導入した。鉄筋の目標緊張応力は 300MPa (一本の緊張力 3.81×10⁴N) で、NO.2

* 1 大阪大学大学院 工学研究科建築工学専攻 (正会員)

* 2 大阪大学教授 工学部建築工学科 工博 (正会員)

* 3 福井工業大学教授 工学部建築学科 工博 (正会員)

* 4 (株) 東急建設 構造設計部 (正会員)

は1本, No.6 は2本緊張した。NO.5 は $\phi 9$ のアンボンドP C鋼材を用い, ポストテンション方式で載荷直前に, 持続載荷開始時の無緊張鉄筋の応力が試験体 NO.2 と同じなるようにプレストレスを導入した。P C鋼材の緊張力は $3.67 \times 10^4 \text{N}$ である。試験体はそれぞれH型钢と1組としてプレキャスト部コンクリート材令 30~33 日目に3等分点載荷した。持続荷重 $2.07 \times 10^4 \text{N}$ は, 鉄筋の長期許容応力度 (220MPa) から定めた NO.1 の許容曲げモーメントである。NO.3 の持続荷重 ($1.44 \times 10^4 \text{N}$) は, 持続載荷開始時に NO.2 の鉄筋応力とほぼ等しくなるように決めた。

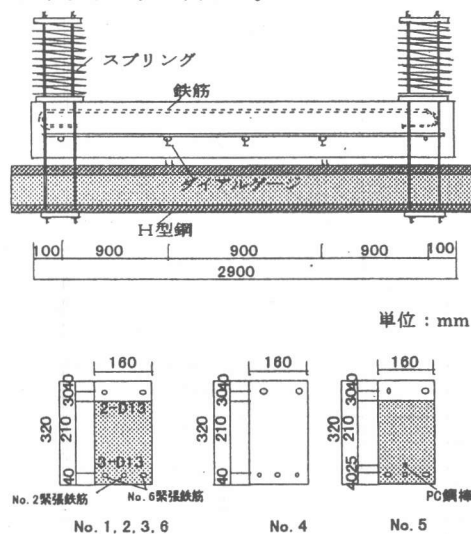


図1 試験体の形状及び載荷方法

2. 2 使用材料

コンクリートには目標強度 50MPa の先打ちコンクリートと 24MPa の後打ちコンクリートを用いた。表2にコンクリートの力学的性質を示す。主筋には SD495-Xふしの D13 を, P C鋼棒にはC種の $\phi 9$ を, スターラップには異形鉄筋 D10 を用いた。

表2 コンクリートの力学的性質

位置	材令 (日)	圧縮強度 (MPa)	割裂強度 (MPa)	ヤング係数 (10^4MPa)
プレキャスト部	7	38.7	3.36	2.93
	31	46.9	4.09	3.19
後打ち部	7	15.7	—	1.98
	24	24.8	2.24	2.33

2. 3 測定項目

鉄筋ひずみの測定は検長 2mm の箔ストレインゲージで, 梁中央区間 45cm の範囲の主筋上に 9cm づつの間隔で貼付し, その平均値を鉄筋ひずみの実測値とした。たわみはダイヤルゲージで測定した。引張鉄筋位置のひび割れ幅は検長 6cm のコンタクトストレインゲージ (以下 C.S.G と略記) で, 圧縮側コンクリートのひずみは検長 10cm の C.S.G で測定した。なお, コンクリートの乾燥収縮は梁断面と同じ断面の角柱試験体で測定し, クリープ試験は $10 \times 10 \text{ (cm)}$ 断面の角柱試験体を用いて行った。図2及び図3にそれぞれ乾燥収縮ひずみ $S_h(t)$ 及びクリープ係数 $\phi(t)$ の経時変化を示す。図中の曲線は最小2乗法によって求めた近似曲線である。

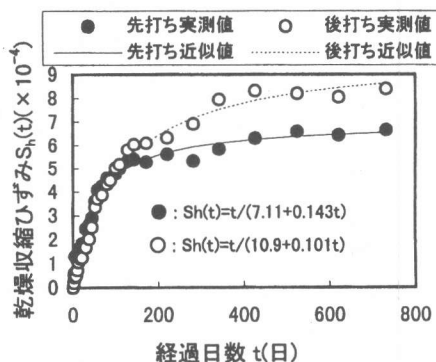


図2 乾燥収縮ひずみの経時変化

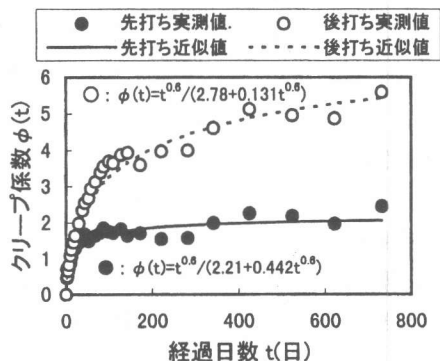
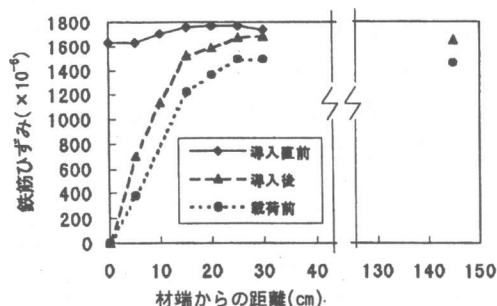


図3 クリープ係数の経時変化

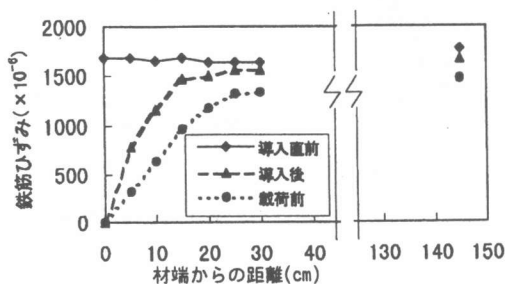
3. 実験結果及び考察

3. 1 緊張鉄筋の定着長さ

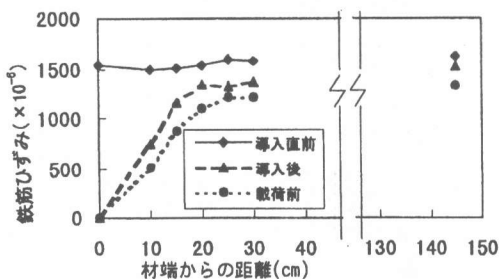
図4 (a), (b), (c)に試験体 NO.2, NO.6 におけるプレストレス導入前後の緊張鉄筋ひずみの挙動を示す。同図から、材端より 25cm 離れた位置のひずみは中央スパンのひずみとほぼ同じであり、緊張鉄筋はこの位置で定着されていると言える。この異形鉄筋の定着長さを既往の提案式²⁾により D13, $F_c=38.7\text{MPa}$, 緊張応力 300MPa として求めると 24.7cm となり、計算値は実測値とよく一致している。



(a) NO.2 の緊張鉄筋定着部のひずみ分布



(b) NO.6 左の緊張鉄筋定着部のひずみ分布



(c) NO.6 右の緊張鉄筋定着部のひずみ分布

図4 緊張鉄筋定着部のひずみ分布

3. 2 ひび割れ状況及び間隔

図5に持続載荷 732 日におけるひび割れ

状況を、表3に同じく等曲げ区間におけるひび割れ間隔を示す。鉄筋応力の大きい NO.1 と NO.4 のひび割れ間隔の実験値は計算値⁵⁾とほぼ等しく、荷重を増加しても新たなひび割れの生じないひび割れ定常状態に至っている。プレストレスを導入した NO.2, NO.5 及び荷重の小さい NO.3 はひび割れ間隔が広く、ひび割れ定常状態に至っていないと言える。試験体 NO.6 にはひび割れは生じていない。

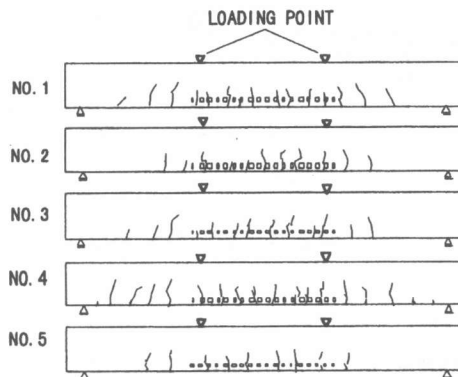


図5 ひび割れ状況

表3 ひび割れ間隔

試験体 番号	ひび割れ間隔 (cm)	
	実験値	計算値
NO.1	10.4	11.9
NO.2	13.4	
NO.3	13.8	
NO.4	12.6	
NO.5	15.6	

注: ひび割れ間隔の算定は参考文献⁵⁾によったものである。

3. 3 鉄筋ひずみの経時変化

図6に各試験体の Decompression (鉄筋位置コンクリート応力が零の状態)時から持続載荷 732 日までの平均鉄筋ひずみ実測値 ($\Delta \epsilon_{s.av}$) の経時変化を示す。曲線は Mean-stress 法³⁾によるクリープ解析によって求めたひび割れ断面の鉄筋ひずみの計算値 ($\Delta \epsilon_{s.max}$) である。ひび割れの生じていない NO.6 を除き、持続載荷開始直後に鉄筋とコンクリート間の付着クリープ (付着応力の緩和) によって協力作用が減少するため、平均鉄筋ひずみ $\Delta \epsilon_{s.av}$

は急増する。その後、圧縮側コンクリートのクリープや付着クリープによって平均鉄筋ひずみは漸増している。同図により、プレストレスを導入した試験体 NO.2(プレストレス力 3.81

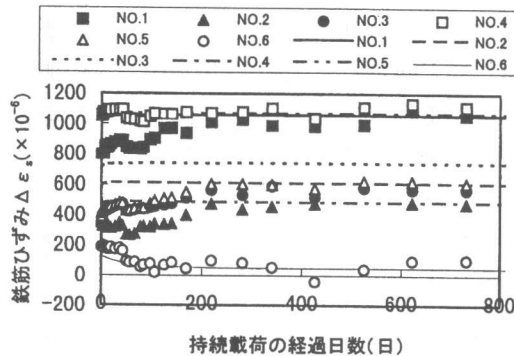


図6 鉄筋ひずみの経時変化

$\times 10^4 \text{N}$), NO.5 (プレストレス力 $3.67 \times 10^4 \text{N}$), NO.6 (2本 $3.81 \times 10^4 \times 2 \text{N}$) の長期平均鉄筋ひずみは、導入していない NO.1 に比べてそれぞれ約 45%, 40%, 90% が低減されている。試験体 NO.6 はひび割れが生じなかったため、コンクリートの乾燥収縮の影響が大きく、長期鉄筋ひずみは減少傾向になる。プレストレス量のほぼ等しい NO.2 と NO.5 の比較から、高強度鉄筋自身を緊張してプレストレスを導入しても従来の PC 鋼材を用いて導入した場合と同様の効果が得られる。また NO.1 と NO.4 の比較から合成断面と一体打断面はほぼ同じ性能であることが分かる。

3. 4 ひび割れ幅の経時変化

図7に各試験体の持続載荷 732 日までの平均ひび割れ幅の経時変化を示す。曲線は既往の研究⁴⁾の提案式により計算値である。ひび割れ幅は全体に持続載荷開始直後に引張鉄筋応力が急増するため急増し、その後、コンクリートのクリープ及び乾燥収縮により漸増している。

長期ひび割れ幅 w_{av} は次式で計算される⁴⁾。

$$w_{av} = q'(t) l_{av} (\varepsilon_{s\max}(t) + S_h(t)) \quad (1)$$

$$q'(t) = a_1 a_2 q(t) \quad (2)$$

ここに: w_{av} : 平均ひび割れ幅(mm), $q(t)$: 付着特性に関する係数⁴⁾, ただし, $a_1 a_2 \geq 1$, l_{av} : 平均ひび割れ間隔実測値(cm), $\varepsilon_{s\max}(t)$: 持続載荷中の時刻 t におけるひび割れ断面の鉄筋ひずみ, $S_h(t)$: コンクリートの自由乾燥収縮ひずみ (後打ちコンクリートの乾燥収縮)

コンクリートの乾燥収縮の影響が大きいため、試験体間の長期ひび割れ幅の差異は鉄筋ひずみの場合より少なくなっている。また、プレストレスを導入した試験体 NO.2, NO.5 の長期ひび割れ幅は導入していない NO.1 の比べてそれぞれ約 40%, 20% が低減された。

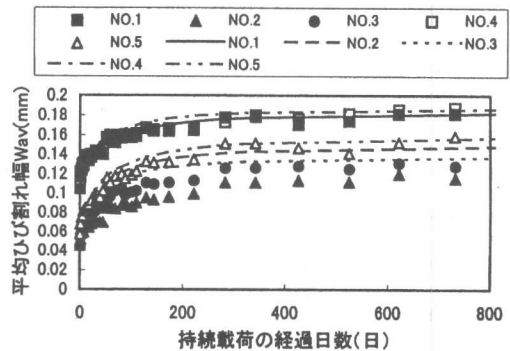


図7 平均ひび割れ幅の経時変化

3. 5 圧縮縁ひずみの経時変化

図8に各試験体の持続載荷 732 日目における圧縮縁ひずみの経時変化を示す。

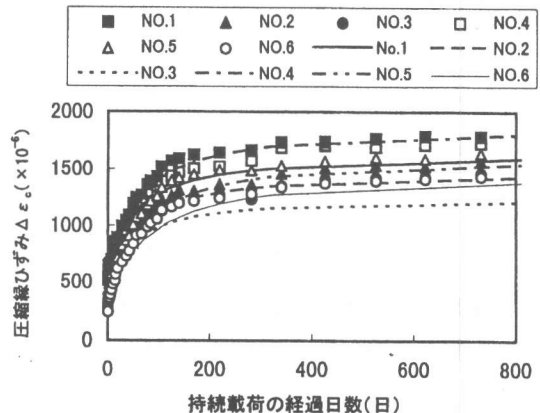


図8 圧縮縁ひずみの経時変化

曲線は後打ちコンクリートのクリープ係数及び乾燥収縮ひずみを用いて Mean-stress 法による計算値である。なお、長期曲げ性状には圧縮側コンクリートのクリープ及び乾燥収縮の影響が支配的なことから、クリープ解析には後打ちコンクリートのデータを用いた。同図より、圧縮縁ひずみは圧縮側コンクリートのクリープと乾燥収縮によって増大している。ただし、その増加量は引張鉄筋ひずみの増加量に比べて格段に大きいことが分かる。また、プレストレスを導入した試験体 NO.2, NO.5, NO.6 の長期圧縮縁ひずみは導入していない NO.1 よりそれぞれ約 15%, 10%, 20% が低減されている。前述の鉄筋ひずみの低減率に比べて小さく、圧縮縁コンクリートの長期ひずみに対するプレストレスの効果は小さくなり、クリープや乾燥収縮の影響が大きいことが分かる。

3. 6 たわみの経時変化

図 9 に各試験体の持続載荷 732 日における等曲げスパン内のたわみの経時変化を示す。曲線は前述と同じように Mean-stress 法による計算値である。同図より、等曲げたわみはコンクリートのクリープや乾燥収縮に伴って大きく増大している。

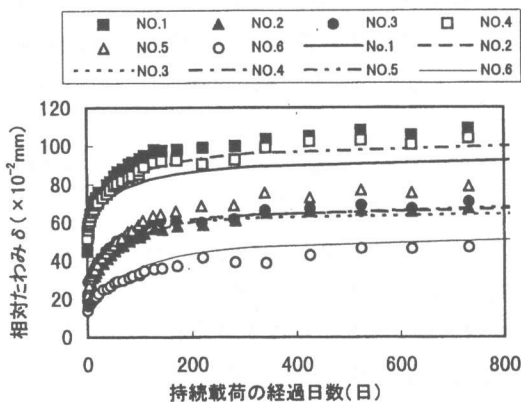


図 9 等曲げスパンたわみの経時変化

また、プレストレスを導入した試験体 NO.2, NO.5, NO.6 の長期等曲げたわみは導入していない NO.1 よりそれぞれ約 35%, 30%, 60% が低減され、プレストレスによる長期た

わみの制御効果が表われている。合成断面の NO.1 のたわみは一体打ちの NO.4 によりやや大き目であるが、その差は小さい。計算値と実測値はほぼ一致している。

3. 7 ひび割れ幅及びたわみの増加量

表 4 にひび割れ幅とたわみの初載荷時の値、732 日間の増加量、及び増加量の初期値に対する倍率を示す。NO.1 から NO.5 のひび割れ幅、たわみの長期増加量には大きな差異がない。これは前述のようにひび割れ幅の増加量にはひび割れ間コンクリートの収縮が、たわみの増加量には圧縮側コンクリートのクリープ、乾燥収縮が大きく影響するからである。一方、同表により、持続載荷 732 日目における NO.2 の長期ひび割れ幅増加量はほぼ NO.1 と同じであり、すなわち、プレストレスの長期ひび割れ幅増加に対する制御効果は殆どないといえる。

長期たわみ増加量の初期値に対する倍率は、すべて 1.0 以上になっており、全たわみ値の中に、長期たわみ増加量の割合が高いことが分かる。またひび割れ幅の場合と同様にプレストレスの長期たわみ増加に対する制御効果は小さい (NO.1, NO.2)。

荷重が小さい NO.3 の鉄筋応力は NO.2 及び NO.5 とほぼ同じであることから、ひび割れ幅及びたわみの初期値は NO.2, NO.5 とほぼ同じである。また長期増加量は前述の理由で NO.3 は NO.2, NO.5 とほぼ同じである。

表 4 長期値の初期値に対する倍率

試験体番号	ひび割れ幅の実測値 (mm)		たわみの実測値 (mm)	
	初載荷	732 日の増加量	初載荷	732 日の増加量
NO.1	0.104	0.078(0.75)	0.45	0.64(1.42)
NO.2	0.045	0.070(1.56)	0.21	0.50(2.38)
NO.3	0.055	0.083(1.51)	0.23	0.48(2.09)
NO.4	0.113	0.075(0.66)	0.51	0.53(1.04)
NO.5	0.057	0.101(1.77)	0.22	0.57(2.59)
NO.6	—	—	0.14	0.33(2.36)

注：() 内の数値は長期値の初期値に対する比率である

3. 8 計算値と実測値の比較

ひび割れ幅の実測値と計算値の比較を表 5

に示す。計算値は Mean-stress 法で計算した鉄筋応力を用いて PRC 指針・解説⁵⁾及び前報⁴⁾で提案した式によった。

同表より、一体打ちの NO.4 のひび割れ幅は、計算値は実測値と一致している。一方、プレストレスを導入した試験体及び合成断面においては、計算値は実測値より大き目に算出されている。

表5 ひび割れ幅の実測値と計算値の比較

試験 体番 号	ひび割れ幅(mm)			
	初載荷		持続載荷 732 日	
	実測値	計算値	実測値	計算値
NO.1	0.104	0.119(1.14)	0.180	0.204(1.13)
NO.2	0.045	0.065(1.44)	0.115	0.150(1.30)
NO.3	0.055	0.070(1.27)	0.128	0.138(1.08)
NO.4	0.113	0.115(1.02)	0.188	0.188(1.00)
NO.5	0.057	0.067(1.18)	0.158	0.159(1.01)
NO.6	*****	*****	*****	*****

注：（ ）内の数値は計算値の実測値に対する比率である

たわみの実測値と計算値を表6に示す。計算値は断面曲率 ϕ から算出した。

同表より、NO.6の長期の場合を除いて、何れのたわみにおいても、計算値は実測値より若干小さ目に算出されている。ただし、全体に差は $\pm 15\%$ 以内に納まる。

表6 たわみ実測値と計算値の比較

試験 体番 号	相対たわみ(mm)			
	初載荷		材令 732 日	
	実測値	計算値	実測値	計算値
NO.1	0.448	0.423(0.94)	1.09	0.934(0.86)
NO.2	0.208	0.190(0.91)	0.705	0.683(0.97)
NO.3	0.230	0.219(0.95)	0.709	0.654(0.92)
NO.4	0.514	0.454(0.88)	1.04	1.014(0.98)
NO.5	0.221	0.164(0.74)	0.788	0.695(0.88)
NO.6	0.139	0.122(0.88)	0.468	0.523(1.12)

注：（ ）内の数値は計算値の実測値に対する比率である

4. まとめ

以上の実験結果及び考察をまとめると次のようになる。

- 1) 高強度鉄筋を用いてプレストレスを導入することによって、初載荷時及び長期のひび割れ幅及びたわみを制御することができた。ただし、持続載荷中のひび割れ幅の

増加量にはコンクリートの乾燥収縮が、たわみの増加量には乾燥収縮とクリープが大きく影響するので、プレストレスの効果は相対的に小さくなる。

- 2) RC合成はりの長期曲げ性状は一体打のRC梁と同じであった。
- 3) 高強度鉄筋自身の緊張によるプレストレス導入によって、従来のPC鋼材を用いて導入と同様な効果が得られた。
- 4) 既往の計算法及び計算式により長期ひび割れ幅とたわみの実測値を大略捉えることができた。

謝辞：実験の実施及びデータの測定と整理において、本学大学院生岩田 樹美氏（現 NTT ファシリテーズ）、日高 克明氏（現三菱重工業）及び本学四年生草場 直人君の協力を得たことを記して謝意を表わす。

参考文献：

- 1) 大野 義照・白井 敏彦・鈴木 計夫：高強度鉄筋を用いてプレストレスを導入したPRCはりの曲げ性状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 9, No. 2, pp.489-494, 1987
- 2) 金普漢：プレストレストコンクリート緊張材として用いた異形鉄筋の定着長さ，日本建築学会構造系論文集，No. 472, pp.121-128, 1995. 6
- 3) コンクリート構造物のクリープと乾燥収縮 百島祐信，鹿島出版会，1976
- 4) 李 振宝・大野 義照・尚 自端・鈴木 計夫：鉄筋コンクリート梁の長期ひび割れ幅，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 19, No. 2, pp. 879-884, 1997
- 5) 日本建築学会：プレストレスト鉄筋コンクリート（Ⅲ種PC）構造設計・施工指針・同解説，1986