

論文

[2027] 高強度鉄筋を用いてプレストレスを導入したPRCはりの持続荷重下における曲げ性状

正会員 鈴木計夫 (大阪大学工学部)

正会員 大野義照 (大阪大学工学部)

白井敏彦 (大林組建築本部)

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造における高強度鉄筋の利用は、短期荷重に対しては部材強度の増加等の多くの利点を有しているが、常時荷重下において強度に見合う高い鉄筋応力を許すと過大なひびわれ幅やたわみが生じるためその有効利用範囲が狭められている。前報¹⁾では、鉄筋自身の緊張によりプレストレスを導入したはりの単調増大荷重下での曲げ性状を調べ、高強度鉄筋の強度増加分を緊張することによってひびわれ幅やたわみが制御され、高強度鉄筋が有効に活用できることを報告した。

本報告では、持続荷重下での曲げ性状に関して、鉄筋の緊張によってプレストレスを導入した場合と同量のプレストレスをPC鋼材を用いて導入した場合の比較実験を行った。なお、鉄筋緊張の場合、従来のプレレストコンクリートにおけるPC鋼材の緊張応力に比べて鉄筋の緊張応力は低く、載荷開始までのクリープ・乾燥収縮によるプレストレスの損失が大きくなるので、持続載荷時期の影響についても検討した。

2. 実験概要

(1) 使用材料

コンクリートは早強ポルトランドセメント、山砂・海砂および最大寸法20mmの碎石を使用した、水セメント比52%、スランプ20cmのレディミクストコンクリートを用いた。その力学的性状を表1に示す。鉄筋はSD50の異形鉄筋D13をPC鋼材はC種PC鋼棒φ9.2を用いた。鋼材の力学的性質を表2に示す。

表1 コンクリートの力学的性質

材令	圧縮強度 (kg/cm ²)	割裂強度 (kg/cm ²)	弾性係数 (kg/cm ²)
9日	245	22.8	2.36×10 ⁵
12日	282	24.6	2.44×10 ⁵
114日	293	26.3	2.09×10 ⁵
252日	293	28.0	2.14×10 ⁵

(2) 試験体の性質

試験体の種類を表3に示す。実験要因は鉄筋の緊張応力 ($\sigma_s=0, 2000\text{kgf/cm}^2$)、緊張鋼材種(高強度鉄筋、PC鋼材)および持続載荷開始

表2 鋼材の力学的性質

鋼材種	断面積 (cm ²)	降伏応力度 (kg/cm ²)	引張強度 (kg/cm ²)	弾性係数 (kg/cm ²)
D13(SD50)	1.24	5952	7468	2.1×10 ⁵
PC鋼棒(φ9.2)	0.665	14496	15293	2.06×10 ⁵

時期(プレストレス導入後3日、105日)である。試験体形状は図1に示すように、12×24(cm)の単鉄筋長方

表3 試験体の種類

試験体名	引張側鋼材		目標鉄筋引張応力 (kg/cm ²)	導入直後引張力		載荷モーメント (tm)	導入～載荷経過日数 (日)
	異形鉄筋	PC鋼棒		鉄筋 (t)	PC鋼棒 (t)		
LR0	2-D13	—	0	0	—	0.864	3
LR2-1	2-D13	—	2000	4.28	—	0.864	3
LR2-2	2-D13	—	2000	4.32	—	1.37	3
LPR2-1	2-D13	φ9.2	0	-1.01	5.39	1.37	3
LR2-3	2-D13	—	2000	4.40	—	1.37	105
LPR2-2	2-D13	φ9.2	0	-1.02	5.39	1.37	105

注) 鉄筋引張力欄の負記号は圧縮力を表す。

形はりである。試験体LR2-1, 2, 3は高強度鉄筋の緊張によりプレテンション方式でプレストレスを導入した。試験体LPR2-1, 2は試験体LR2と同じ鉄筋を無緊張で配し、

載荷モーメントによるPC鋼材の応力増分を少なくするためアンボンドPC鋼材を用い、ポストテンション方式でプレストレスを導入した。

持続荷重は、試験体LR0とLR2-1はLR0の鉄筋応力の変化量 $\Delta\sigma_{smax}$ (鉄筋位置コンクリート応力が0の時点からの鉄筋応力変化量)が約2200kgf/cm²となるモーメント0.864tm、LR2-2およびLR2-3はLR2-2の $\Delta\sigma_{smax}$ が約1600kgf/cm²となるモーメント1.37tmである。また、アンボンドPC試験体LPR2-1、LPR2-2もLR2-2およびLR2-3と同一モーメントを載荷した。表4に持続載荷直前の鋼材の引張力、有効プレストレス、持続載荷開始時のひびわれ断面における存在鉄筋応力 σ_{smax} 、その変化量 $\Delta\sigma_{smax}$ および圧縮縁コンクリート応力の計算値を示す。

(3) 試験体の製作および載荷方法

試験体はコンクリート材令4日で脱型した後、材令9日のプレストレス導入時まで湿布養生を行った。持続載荷は材令12日から開始した。載荷方法を図2に示す。LR0とLR2-1、LR2-2とLPR2-1、およびLR2-3とLPR2-2をそれぞれ1組として載荷した。プレストレス導入時における鉄筋の引張力は鉄筋ひずみ測定値より、載荷までの鉄筋の引張力の損失は脱型直後に貼付した検長30cmのコンタクトストレインゲージ(以下、C.S.G.と略記)によるコンクリートひずみ測定値より算出した。ひびわれ幅および鉄筋ひずみは鉄筋位置のコンクリート表面に貼付した検長4cmのC.S.G.で、圧縮縁コンクリートのひずみは圧縮縁から1cm下の両側面において検長10cmのC.S.G.で、たわみはダイヤルゲージを用いて測定した。

コンクリートの乾燥収縮・クリープは、はり試験体と同一断面形状のコン

表4 持続載荷直前の鋼材の引張力、有効プレストレスおよび持続載荷開始時の応力

試験体名	引張鉄筋引張力 (kgf)	PC鋼材引張力 (kgf)	下縁有効プレストレス (kg/cm ²)	持続載荷開始時応力 (kg/cm ²)		
				鉄筋応力		上縁コンクリート応力
				σ_{smax}	$\Delta\sigma_{smax}$	
LR0	-360	—	-3.8	1970	2140	123
LR2-1	3620(84.6)	—	38.5(84.6)	2180	450	76
LR2-2	3590(83.1)	—	38.2(83.1)	3280	1550	150
LPR2-1	-1580	5220(96.8)	38.9(83.1)	1010	1380	144
LR2-3	820(18.6)	—	8.7(18.6)	3190	2760	171
LPR2-2	-4310	4520(83.9)	2.2(4.8)	1140	2750	171

注) () 内の値は有効率(%)、引張鉄筋引張力欄の負記号は圧縮力を表す。

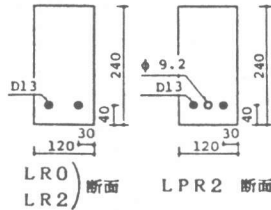


図1 試験体形状

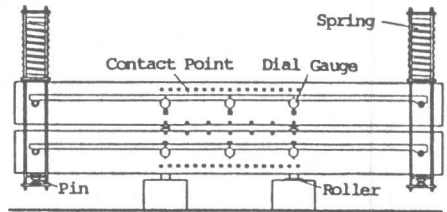


図2 載荷方法

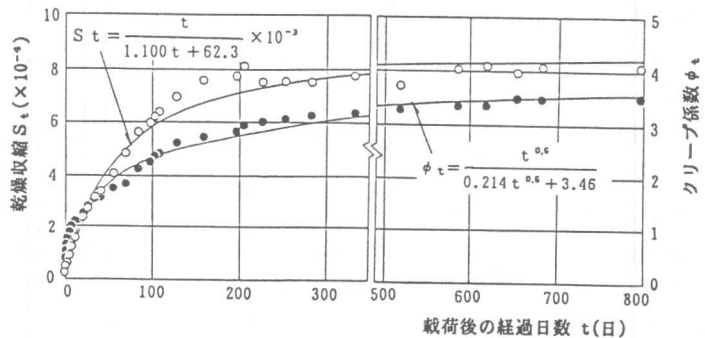


図3 乾燥収縮・クリープ係数(材令12日載荷)

トロール試験体にて測定した。図3には材令12日からの乾燥収縮およびクリープ係数を示す。同図中の曲線は最小自乗法で求めた近似曲線であり、解析ではこれらの曲線を用いた。ただし、材令114日に荷重した試験体のクリープ係数は、CEB・FIPの指針²⁾の荷重時材令の影響係数にならって、図3中のクリープ係数を0.56倍して用いた。また、プレストレス導入後の試験体の保存および持続荷重は温度 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 、相対湿度 $60 \pm 5\%$ の恒温恒湿室において行った。

3. 実験結果および考察

(1) プレストレス有効率

導入直後の鉄筋の引張力に対する荷重時の有効引張力の割合、PC鋼材引張力有効率およびコンクリート下縁のプレストレス有効率を前掲の表4中の()の内に示している。LPR試験体ではプレストレスが鉄筋へ移行するので、PC鋼材引張力の有効率に比べてコンクリート断面に作用するプレストレスの有効率は小さい³⁾。LPR2はLR2試験体に比べてPC鋼材の分だけ鋼材総断面積が大きいので、プレストレスの損失も若干大きくなっている。

(2) ひびわれ状況

表5にひびわれモーメント M_{cr} および平均ひびわれ間隔 l_{av} の実測値と計算値を、図4にひびわれ状況図を示す。プレストレス導入の3日後に荷重した4体では荷重開始後29日の状況を、導入の約3カ月後に荷重した2体においては9日後のひびわれ状況を示した。

試験体LR2-1は、荷重モーメント 0.864tm はひびわれモーメント M_{cr} の値に近く(表5参照)、鉄筋応力は低くて荷重後29日ではひびわれはまだ出つくしていない非定常状態にある。しかし、荷重後約1年経過すると新たなひびわれは出つくして、定常状態に至っている。

(3) 平均鉄筋ひずみ

各試験体の等曲げスパンにおける平均鉄筋ひずみのDecompressionからの変化量 $\Delta \epsilon_{sav}$ の経時変化を図5に示す。同図中の曲線はクリープ解析(Mean-Stress法⁴⁾)によって計

表5 ひびわれモーメント、ひびわれ間隔

試験体名	M_{cr} (tm)		l_{av} (cm)	
	実測値	計算値	実測値	計算値
LR0	0.36	0.34	10.3	12.0
LR2-1	0.84	0.89	16.0	12.0
LR2-2	0.84	0.89	12.3	12.0
LPR2-1	0.90	0.90	10.9	12.0
LR2-3	0.60	0.52	11.1	12.0
LPR2-2	0.42	0.44	11.1	12.0

注) M_{cr} の計算には $1.8\sqrt{F_c}$ の曲げ引張強度を用いた。
 l_{av} の計算値はPRC指針解説の計算式による³⁾。

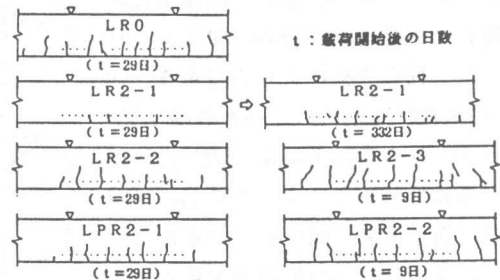


図4 ひびわれ状況図

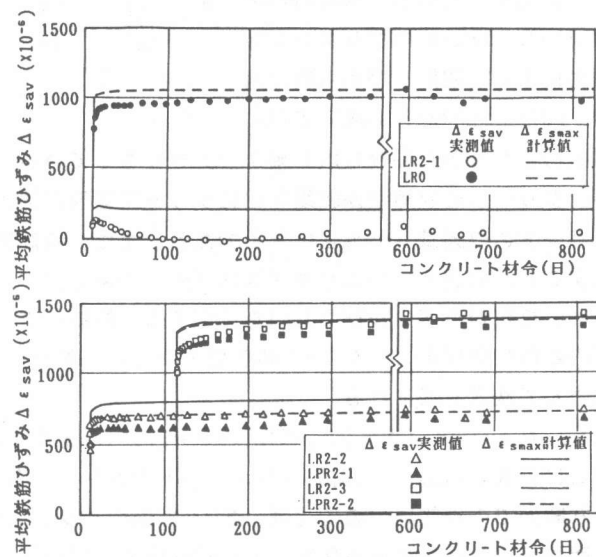


図5 平均鉄筋ひずみの経時変化

算したひびわれ断面での鉄筋ひずみの変化量 $\Delta \epsilon_{smax}$ の経時変化である。 $\Delta \epsilon_{smax}$ の計算値と $\Delta \epsilon_{sav}$ の実測値の差は主にひびわれ間コンクリートの引張力の分担によるものとみなせる。 $\Delta \epsilon_{sav}$ は持続荷重開始直後に付着応力の緩和等で急増し、その後は圧縮側コンクリートのクリープによる中立軸の低下から生じる応力中心距離 j の減少によって漸増する⁵⁾。しかし、LR2-1では鉄筋応力が低いいため付着応力の緩和が少なく、コンクリートの乾燥収縮による収縮により鉄筋のひずみは漸減している。LR2-3とLPR2-2は荷重開始時期が遅いためにプレストレスの損失が大きく、これらの試験体の $\Delta \epsilon_{sav}$ はLR2-2、LPR2-1の $\Delta \epsilon_{sav}$ より大きな値となっている。LPR試験体とLR試験体を比較すると、LPR2-1の $\Delta \epsilon_{sav}$ はPC鋼材が配置されているためにLR2-2より若干小さい。荷重時期が遅い場合は、LPR2-2のプレストレスの損失量はLR2-3より大きいので、荷重開始時においてはLPR2-2の $\Delta \epsilon_{sav}$ はLR2-3より僅かに大きくなっている。

(4) 平均ひびわれ幅

平均ひびわれ幅の経時変化を図6に示す。前述したように、持続荷重開始直後に平均鉄筋ひずみが急増するためにひびわれ幅もこの期間に急増し、その後はひびわれ間コンクリートの乾燥収縮により漸増する。LR2-1の荷重開始時のひびわれ幅はプレストレスの効果によりLR0に比べ大幅に低減され、また $\Delta \epsilon_{sav}$ が時間経過とともに減少しているため、その後のひびわれ幅の増大量も小さく、LR2-1とLR0のひびわれ幅の差はさらに広がっている。荷重時期の遅いLR2-3、LPR2-2はプレストレスの損失によって初期ひびわれ幅は増大し、LR2-2、LPR2-1の同時点(材令114日)における長期ひびわれ幅より大きくなっている。これは前者の荷重までの鉄筋位置のコンクリートの収縮量が乾燥収縮にクリープ変形が加わり、後者の荷重後のひびわれ間コンクリートの収縮量より大きいためである。また、鉄筋緊張の場合とPC鋼材緊張の場合を比較すると、両者のひびわれ性状はほぼ同じである。

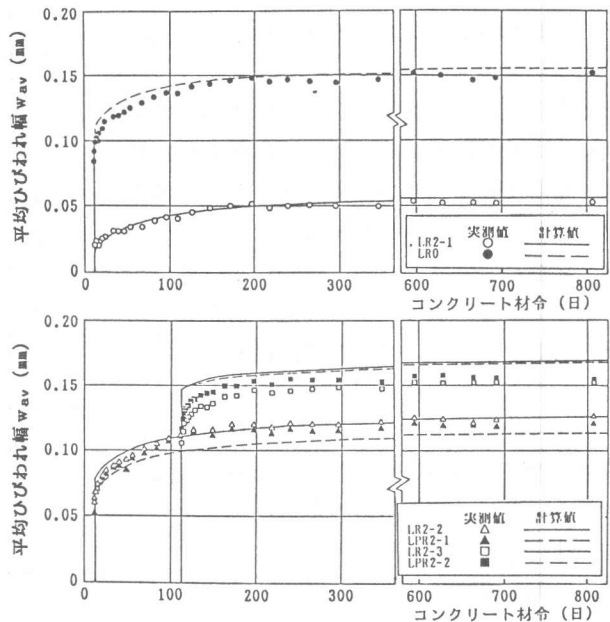


図6 平均ひびわれ幅の経時変化

次に、持続荷重下のひびわれ幅を算定する。持続荷重下においては、ひびわれ幅はひびわれ間の鉄筋の伸びとコンクリートの収縮の和として現れるので、付着応力の緩和と乾燥収縮を考慮して次式で表される。

$$w_{av} = l_{av} \times (\Delta \sigma_{smax} / E_s - \alpha \sigma_{sc} / E_s + \beta S_t) \quad (1)$$

ここに、 $\Delta \sigma_{smax}$: 圧縮側コンクリートのクリープを考慮した Decompression からのひびわれ断面での鉄筋応力の変化量、 E_s : 鉄筋のヤング係数、 σ_{sc} : 持続荷重開始時のひびわれ間コンクリートの協力作用による鉄筋応力の減少量、 α : その残存率、 β : 自由乾燥収縮 S_t に対するひびわれ間コンクリートの収縮の割合である。 l_{av} および σ_{sc} はPRC指針解

説式⁵⁾による計算値を、 $\Delta \sigma_{smax}/E_s$ は前述のクリープ解析による計算値を用い、 α 、 β は先に行った実験⁵⁾ 結果などよりそれぞれ 0.5および 0.6として(1)式より算出した w_{av} を図6中に曲線で示す。計算値は実測値とほぼ一致している。

(5) 圧縮縁ひずみ

圧縮縁ひずみ ϵ_c の経時変化を図7に示す。圧縮縁ひずみはコンクリートのクリープと乾燥収縮によって増大し、その増大量は引張鉄筋ひずみに比べて格段に大きい。表4に示すように、LR2-1の持続載荷開始時の圧縮縁応力はプレストレスによってLR0より小さくなっているが、長期においては引張鉄筋のひずみのような大きな差異は生じていない。載荷時期の遅いLR2-3、LPR2-2の ϵ_c は、載荷開始時は若干大きくなるものの、持続載荷中のクリープ・乾燥収縮が小さいので、全般にLR2-2、LPR2-1より小さくなっている。またLR試験体とLPR試験体を比較すると、載荷開始時の圧縮縁応力がほぼ等しいので、両者の ϵ_c の初期値ならびに増大量もほぼ等しい。同図には乾燥収縮を考慮したクリープ解析による計算値を示している。計算値は実測値とよく一致している。

(6) たわみ

等曲げスパン内のたわみの経時変化を図8に示す。LR2-1はプレストレスによってたわみは制御されているが、上述のように引張鉄筋ひずみに比べて圧縮縁ひずみの持続載荷中の増大量は格段に大きく、その増大量はLR0と同程度であったため、たわみの場合はひびわれの場合と異なってプレストレスの有無による増大量の差は小さい。載荷開始時期の影響についてみると、持続載荷時期の早い方が持続載荷中の圧縮縁ひずみの増大量が大きいので、長期たわみは大きくなっている。また、たわみについても緊張鋼材種による差は殆どない。同図中の曲線は、クリープ解析による計算値、すなわち圧縮縁ひずみの計算値と平均鉄筋ひずみの

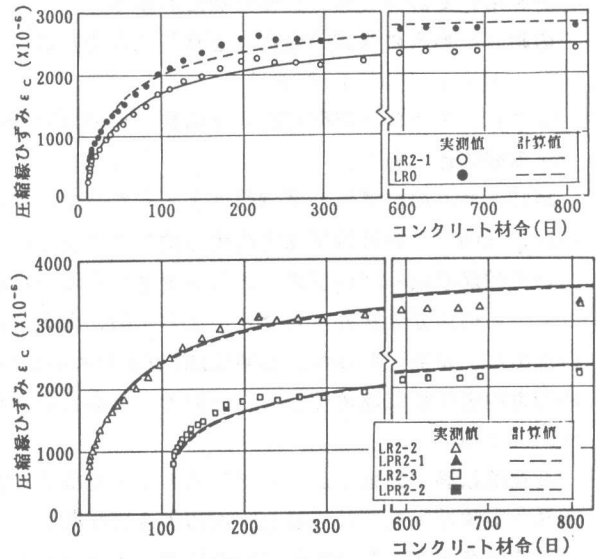


図7 圧縮縁コンクリートひずみの経時変化

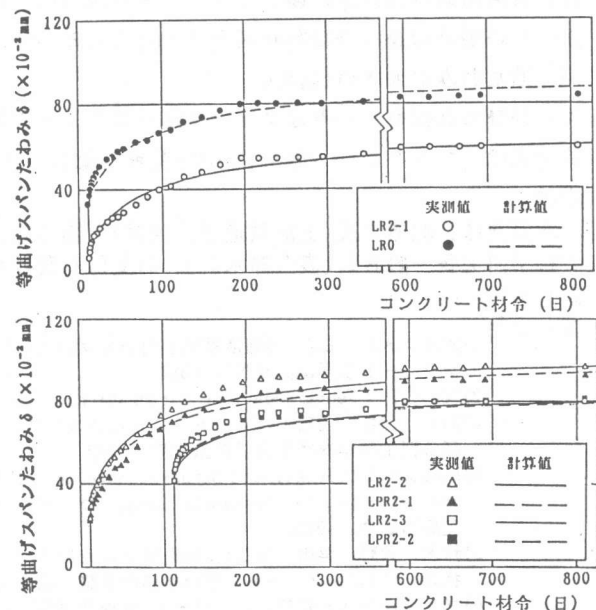


図8 等曲げスパンたわみの経時変化

計算値とから曲率を求めて算出した値である。計算値は実測値とほぼ一致している。

表6に瞬時および材令811日のスパン全たわみについてそれらの実測値とACI 318-83⁷⁾コードの算定式による計算値を示す。ACI算定法では、瞬時たわみはひびわれや鉄筋の影響を考慮した有効断面2次モーメントを用いて計算され、長期付加たわみはその瞬時たわみに次式の係数 λ を乗じて求められる。

$$\lambda = \xi / (1 + 50 \rho') \quad (2)$$

ここに、 ξ = 経過時間に関する係数、1.69 (LR0~LPR2-1)、1.625 (LR2-3、LPR2-3)、 ρ' = 圧縮鉄筋比である。

瞬時たわみの計算値と実測値はよく一致している。しかし、長期たわみについては、LR0、LR2-2、LPR2-1の計算値は実測値の約80%程度と小さめに算出されている。これは係数 λ において乾燥収縮・クリープの大きさを考慮するようになっていず、部材寸法が小さい本実験ではそれらの値が大きかったことによるものと考えられる。また、LR2-1は瞬時たわみが小さいために、長期たわみの計算値はLR0等よりも小さい値となっている。LR2-3、LPR2-2は持続荷重中の乾燥収縮の値が小さいので、長期たわみの計算値は逆に大きめに算出されている。

4. まとめ

高強度鉄筋の緊張によってプレストレスを導入したはりの持続荷重下における曲げ性状を調べた実験結果をまとめると、次のようになる。

- (1) 持続荷重下においても鉄筋の緊張によるプレストレスングの効果が確認できた。その効果はPC鋼材の緊張による効果と同程度であった(図5~図8)。
- (2) 載荷開始時期が遅い場合はプレストレスの損失により初期ひびわれ幅は増大し、載荷時期の早い場合の長期ひびわれ幅より大きくなる(図6)。たわみについては載荷時期の早い方が長期たわみは大きい(図8)。
- (3) ひびわれ幅やたわみはクリープ解析等によって精度よく算定できた。ACIの長期たわみ算定式は、コンクリートのクリープ・乾燥収縮量によっては適合性のよくない場合もある。

謝辞

本研究は、紀敬雷氏(上海鉄道学院講師)の協力によって実施したものであり、また、文部省科学研究費一般B(代表者鈴木計夫)の交付を受けた研究の一部であることを記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 鈴木、大野、白井：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；第9回コンクリート工学論文報告集 1987
- 2) CEB/FIP: Recommendations internationales pour le caucul; 1970
- 3) 鈴木、大野、佐田：プレストレス鉄筋コンクリートはりの曲げ性状について；コンクリート第2回工学年次講演会講演論文集、1980
- 4) H. Rüsçh & D. Jungwirth: Berücksichtigung der Einflüsse von Kriechen und Schwinden aus das Verhalten der Tragwerke (邦訳、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)
- 5) 鈴木、大野、栗田、横田：持続荷重下におけるプレストレス鉄筋コンクリートはりの曲げ性状；第7回コンクリート工学年次講演会講演論文集 1985
- 6) 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；日本建築学会
- 7) ACI Committee 318: Building Code Requirements for Concrete (ACI 318-83)

表6 全スパンたわみの実測値と計算値 (軸: 10^{-2} mm)

試験体名	瞬時たわみ		材令811日のたわみ	
	実測値	計算値	実測値	計算値
LR0	230	220(0.96)	759	592(0.78)
LR2-1	97	82(0.85)	482	221(0.46)
LR2-2	212	243(1.15)	803	654(0.81)
LPR2-1	210	231(1.10)	783	621(0.79)
LR2-3	359	365(1.02)	701	958(1.37)
LPR2-2	374	365(0.98)	713	958(1.34)

注: () の数値は計算値の実測値に対する割合