端部筋の抜け出しを考慮した鉄筋コンクリートスラブの長期たわみ算定 CALCULATION OF LONG-TERM DEFLECTIONS OF REINFORCED CONCRETE SLABS IN CONSIDERATION OF STEEL SLIPPAGE AT FIXED EDGES

岩田樹美*, 李 振 宝**, 大野義照***

Tatsumi IWATA, Zhenbao LI and Yoshiteru OHNO

Deflection of reinforced concrete slabs increase with time due to factors like creep of concrete, the decrease in the rigidity by cracking. Moreover, additional deflection after cracking is known to occur because of steel slippage at the fixed edge. In this paper, a method that can calculate long-term deflections of continuous reinforced concrete slabs is given. Steel slippage is evaluated by bond creep analysis in this method. A comparison of the experimental and calculated deflections shows that both are generally in agreement. The effects of slab thickness, slab effective depth, ratio of reinforcement and other factors on the deflection of slabs are numerically analyzed.

Keywords : reinforced concrete, slab, long-term deflection, creep, shrinkage, slippage of tension steel

鉄筋コンクリート, スラブ, 長期たわみ, クリープ, 乾燥収縮, 鉄筋の抜け出し

1. まえがき

鉄筋コンクリート（以下RCと略記）スラブは、持続荷重下において曲げひび割れによる剛性低下、コンクリートのクリープ、乾燥収縮等の影響を受け、時間の経過と共にたわみは増大する。RCスラブの過大なたわみの実態が明らかとなつて以来長期たわみに関する研究が数多くなされ、東・小森¹⁾が固定支持部からの鉄筋の抜け出しによる付加たわみの影響を指摘し、その影響の大きいことがその後の研究により報告されている。

この鉄筋の抜け出しによる付加たわみを考慮した長期たわみの解析方法についてはこれまでにいくつかの報告がなされているが、抜け出し量をいかに定量的に算定するかが重要な問題となっている。小柳等²⁾は片引き試験体の持続載荷実験を行い、得られた実験結果から導かれた実験式を鉄筋の抜け出し量算定式としている。この方法は初めて鉄筋の抜け出し量を定量的に扱ったものでその意義は大きい。鉄筋の抜け出し量算定式がコンクリートのクリープ、乾燥収縮および付着クリープの関数として表現されてはならず、それらの影響を評価するまでには至っていない。また、片引き試験における実験データから得られた算定式であるため、両引き試験体の抜け出しには適用できるか検討が必要である。岩原³⁾は付着応力 τ -すべり s 関係から出発しコンクリートのクリープ、乾燥収縮および付着クリープを考慮した鉄筋の抜け出しを解析的に検討し、鉄筋の抜け出し問題を定式化している。ただし、片引きモデルでは引張力が一端から鉄筋に作用し他端に等分布反力が作用しているとし、その場合の定着長さとしてRC構造計算規準・同解説（以下RC規準と略記）の規定値を一律に用いている。また、鉄筋の抜け出しを考慮した、たわみ角法による瞬時たわみの計算式を導いている⁴⁾。

筆者等は既報⁵⁾で、両引き試験体の持続載荷試験から得られた、持続荷重下における $\tau-s$ 関係を用いた付着解析により、経時的な抜け出し量が算定できることを示した。また、片持梁の載荷実験⁶⁾により、たわみを梁の曲げたわみに上記の方法で計算した鉄筋の抜け出しによる付加たわみを加えることにより捉えることができることを確認している。ここでは、付着解析においてRC引張材の両端に異なる引張力が作用するモデルを提案している。

本研究では、付着解析により抜け出し量を算定し、クリープ解析によりひび割れによる剛性低下、コンクリートのクリープおよび乾燥収縮を考慮する、両端固定RCスラブの長期たわみ計算法を提案した。また、既往の実験結果を用いてその計算法の適用性を検討すると共に、RCスラブモデル断面についてその計算法によりたわみを計算しスラブ厚さ、スパン等の各種要因が長期たわみおよび鉄筋の抜け出しによる付加たわみにおよぼす影響について検討し、それら要因の長期たわみに及ぼす影響の定量的な評価を試みた。

2. 両端固定一方向RCスラブの長期たわみ計算法

たわみは、部材を材軸方向に分割しそれぞれの断面での曲率を求めモーメントの定理により計算する。

2.1 付着解析による鉄筋の抜け出し量計算

付着解析については既報⁵⁾で報告しているのでここではその概要のみを示す。

付着解析モデルは、図1に示すように部材両端に異なる曲げモーメントが作用した場合にも適用できる付着解析モデルを用いた。今回新たに設定した解析仮定は以下の通りである。

(1) 持続荷重下における $\tau-s$ 関係を図2に示すように完全弾塑性近似曲線とする。図中の k_1 、 k_2 は持続荷重下における特性値 τ_y と K_1 が単

* NTT ファシリティーズ

** 耐震企画設計 工博

*** 大阪大学 教授・工博

NTT Power and Building Facilities Inc.

Taishinkikaku Sekkei Ltd., Dr. Eng.

Prof., Dept. of Architectural Eng., Faculty of Eng., Osaka Univ., Dr. Eng.

図1 付着解析モデル

図2 $\tau-s$ 関係

調増荷時の値より低下することを考慮するための低減係数であり、次式で与えられる⁵⁾。

$$k_1 = (0.25 + 0.5t^{0.7}) / t^{0.2}, \quad k_2 = 0.75$$

この曲線で近似したモデルの特性値 τ_0 , K_0 の設定については $\tau-s$ 関係がコンクリート強度や鉄筋の節形状等多くの要因の影響を受けるため定式化するのは現状では困難であるが、 $\tau-s$ 関係に関する研究結果⁷⁾を参考に簡単に次のように設定する。 $\tau-s$ 関係を調べた既往の実験結果⁸⁾を基に、コンクリート強度 σ_B の特性値 τ_0 , K_0 への影響は $\sigma_B^{2/3}$ で、鉄筋径 D への影響は $1/D$ で考慮し、 τ_0 は鉄筋径に関わらず一定として与えた。 $\sigma_B = 240 \text{ kgf/cm}^2$, $D13$ における平均値を特性値 τ_0 , K_0 の基準値とし、この基準値に基づいて特性値 τ_0 , K_0 を次式で計算する。

$$K_0 = 11600 \times \left(\frac{\sigma_B}{240} \right)^{2/3} \times \left(\frac{13}{D} \right) \quad (\text{kgf/cm}^2) \quad (1)$$

$$\tau_0 = 34.3 \times \left(\frac{\sigma_B}{240} \right)^{2/3} \quad (\text{kgf/cm}^2) \quad (2)$$

(2) 付着解析を行う際のコンクリート断面積は、引張鉄筋とコンクリートの図心とが一致するコンクリート部分が引張力分担に対して有効であると^{3), 9)}、図3に示すハッチ部分を解析用コンクリート引張有効断面とする。

図3 解析用有効断面

図1に示す両引き材において時刻 t における両端に作用する力をそれぞれ $P_{s1}(t)$, $P_{s2}(t)$ 、その間に作用するせん断力を $q(t)$ とすると次の微分方程式が誘導できる⁵⁾。

$$\frac{d^2 S_x(t)}{dx^2} = \frac{1+n'p}{E_s A_s} \cdot U \cdot \tau_x(t) - \frac{q(t)}{E_c A_c} \quad (3)$$

$$\text{ここに、} q(t) = (P_{s1}(t) - P_{s2}(t)) / L, \quad n' = E_s / E_c, \\ E_c = E_c / (1 + 0.5\phi), \quad p = A_s / A_c$$

$S_x(t)$: 時刻 t の時 x 位置における鉄筋とコンクリートの相対すべり
 E_s , A_s , U : 鉄筋のヤング係数, 断面積, 周長

E_c , A_c , ϕ : コンクリートのヤング係数, 断面積, クリープ係数

上式において仮定(1)で示した $\tau_x(t) = f(S_x(t))$ という $\tau-s$ 関係を与えれば、上式を解くことによりすべり量が計算できる。

特例として、両引きモデルの場合 $P_{s1}(t) = P_{s2}(t)$ 、片引きモデルの場合 $P_{s2}(t) = 0$ として計算する。

2.2 長期たわみ計算法

図4に長期たわみ計算のフローチャートを示す。不静定構造である固定支持スラブに曲げひび割れが発生すると、曲げモーメントの再配分が生じる。再配分後の曲げモーメント分布を決定する条件として左右対称構造、対称荷重の場合、中央部のたわみ角が0になるという回転角の釣り合い式により、端部引張鉄筋の抜け出しによる回転角 θ_s を考慮して次のような条件式が与えられる²⁾。

$$\int_0^{l/2} \phi dx + \theta_s = 0 \quad (4)$$

ここに、 ϕ : 曲率, l : スパン

長期たわみは(4)式を満足するようなモーメント分布に対してモーメントの定理により計算する。以下にその具体的な計算方法を示す。

(i) 曲げモーメント分布

曲げモーメントの初期値として両端完全固定として計算されるモーメント分布 $M_{y=0}$ を与える。

(ii) ひび割れの有無の判定

ひび割れによる剛性低下を考慮するため、ひび割れモーメント M_{cr} により全断面有効領域とひび割れ発生領域に分けて曲率計算を行う。曲げ強度は長期的には持続応力や乾燥収縮の影響で見かけ上低下する。そこで長期の曲げ強度は、クリープ限度を静的強度の70%として考慮し¹⁰⁾、乾燥収縮に対する鉄筋の拘束作用により生じる引張応力 σ_{sh} を差し引いたものとした。

$$\left. \begin{aligned} M_{cr}(\text{瞬時}) &= 18\sqrt{\sigma_B} \cdot Z \\ M_{cr}(\text{長期}) &= (18\sqrt{\sigma_B} \times 0.7 - \sigma_{sh}) Z \end{aligned} \right\} (5)$$

ここに、 σ_B : コンクリート圧縮強度, Z : 断面係数

$M_y < M_{cr}$ のとき、Mean-Stress 法¹¹⁾によるクリープ解析で、 $M_y <$

図4 フローチャート

M_{cr} のとき、全断面有効として次式で曲率を計算する。

$$\phi_{cr} = M_i / E_i I \quad (6)$$

$$\phi_{sh} = 0.5 E_i \varepsilon_{sh} b \left\{ x_n^2 - (D - x_n)^2 \right\} / E_i I \quad (7)$$

ここに、 $E_i I = E_c / (1 + \phi) \times I$: 全断面剛性

ϕ_{cr} 、 ϕ_{sh} : クリープおよび乾燥収縮による曲率、 x_n : 中立軸

ε_{sh} : 乾燥収縮ひずみ、 b : 断面幅、 D : 断面せい

(iii) (ii) で求めた曲率を端部から部材中央まで積分する。

$$\int_0^{l/2} \phi dx = \sum_{i=1}^{n/2} \phi_i dx \quad (8)$$

ここに、 n : 分割数、 ϕ_i : i 点における曲率

(iv) 端部引張鉄筋の抜け出し s による回転角 θ_s の計算

端部曲げモーメントによる端部引張鉄筋応力を断面解析により計算し、その応力による鉄筋の抜け出し量 s を前述した付着解析により計算する。回転角 θ_s は、 s を用いて次式のように表される。

$$\theta_s = \frac{s}{d - x_n} \quad (9)$$

ここに、 d : 有効せい、 x_n : 端部ひび割れ断面の中立軸

(v) (8)、(9) 式を (4) 式に代入し、(4) 式が成立するまで (i) から (iv) の繰り返し計算を行う。

(vi) たわみの計算

(4) 式を満足するモーメント分布に対する中央たわみをモールの定理により次式により計算する。

$$\delta_{l/2} = \frac{l}{2} \sum_{i=1}^{n/2} \phi_i dx - \sum_{i=1}^{n/2} \phi_i \left(\frac{l}{2} - x_i \right) dx \quad (10)$$

ここに、 x_i : 固定支持端から i 点までの距離

3. 長期たわみ計算法の適用性の検討

3.1 既往のRCスラブ実験結果との比較

過去に報告されている国内での両端固定一方スラブの長期たわ

み実験結果^{12), 13), 14), 15)}に対して、本報で提案した長期たわみ計算法の適合性を検討する。併せて既往の計算法の検討も行う。

表1に検討対象としたスラブのたわみの実験値と提案した計算法による計算値などを示す。クリープ係数、乾燥収縮ひずみについては報告されている実測値を使用し、されていない場合はCEB-FIP国際指針の方法¹⁶⁾により算出した。試験体S3、S5、S6、S7については施工荷重を想定した載荷初期の過荷重を作用させているため、過荷重による剛性低下を考慮して計算した。なお、長期たわみ計算における端部引張鉄筋の抜け出し量の計算は、試験体の支持状況を考慮して片引きモデルとして計算を行った。

瞬時たわみについては、S1-Bの計算値がかなり小さくなっている。そこで載荷開始材令が56日と遅いため乾燥収縮によるひび

図5 たわみの計算値と実験値との比較

表1 既往の両端固定RCスラブ試験体とそのたわみ (実測値と計算値の比較)

試験体 名称	断面寸法 B×D(cm)	スパン (cm)	かぶり (cm) 上端 下端	鉄筋量(cm ²)		クリー プ係数	収縮ひ ずみ (×10 ⁻⁶)	荷重 w (t/m)	コンクリート		加力 材令 (日)	瞬時たわみ(mm)					長期たわみ(mm)			
				端部	中央 部				圧縮強度 (kgf/cm ²)	弾性係数 (10 ⁵ kgf/cm ²)		実測値	計算値				実測値	計算値		
													ACI	RC規準	岩崎氏	本法		ACI	RC規準	本法
松崎 A-1	100×12	380	2.5	4.99	0	3.72	500	0.567	168	1.85	30	1.53	1.41	3.67	1.63	1.91	16	3.37	10.6	17.3
松崎 A-2	100×12		2.5	3.57	3.57			0.486				1.04	1.04	3.15	-	0.91	11.6	2.50	9.05	13.3
岩原 SN-1	45×13.7	360	3.7 3.2	2.14 2.14	0 2.14	4.45	503	0.43	204	2.32	30	1.36	1.09	2.48	1.32	1.7	17.4	2.94	7.78	15.7
岩原 SN-3	45×13.5		1.5 3.2			4.6	520	0.429				1.63	1.15	2.61	1.33	1.5	15.7	3.10	8.41	14.5
岩原 SN-4	45×13.3		5.3 3.2					0.427				1.71	1.24	2.74	1.62	1.45	17.8	3.35	8.87	25.4
山本 S3	40×12		360			2.5 2.5	1.43 1.43	0 1.43				3.14 1.68	317 272	0.2304 0.1728	150(7日) 221(28日)	2.21(7日) 2.32(28日)	3	1.06	0.95	2.81
山本 S5		28		0.96	0.75		2.68	-	0.73	3.92	1.58	5.32	3.1							
山本 S6	40×13	500	2.54 2.54	0 2.54	3.11 1.67	232 199	0.2496 0.1872	3	5.24	6.01	11.4	5.77	7.85	19.62			12.6	19.3	17.4	
山本 S7			28	5.08	4.30	10.8	5.31	6.05	14.78	9.03	15.6	13.1								
小森 SI-B	25×10	500	3 3	0.57 0	0 0.57	2	345	0.06	205	1.62	56	13	5.99	15.7	-	5.6 (14.6)	46	12.0	34.6	50.2

割れ耐力の低下が生じていると考え、長期のひび割れ耐力を用いて計算したところ 14.6mm と実験値にほぼ等しくなった。この S1-B の計算結果からも分かるように瞬時たわみについてはひび割れ発生による剛性低下のたわみに及ぼす影響が大きいと言える。

図 5 a) に S1-B 試験体を除く 9 体の瞬時たわみの計算値と実験値の比較を示す。RC 規準解説の方法¹⁷⁾を除き、計算値は実験値を良く捉えている。ただし ACI の計算法¹⁸⁾は、端部筋の抜け出しを評価していないため、実験値に比べて全体的に小さい傾向にある。RC 規準についてはひび割れによる倍率 K_1 を長期と同じ値で評価しているため、実験値に比べてかなり大きくなっている。

図 5 b) ~ d) に S1-B 試験体を除く長期たわみの計算値と実験値の比較を示す。ACI の計算法は文献¹⁷⁾にも述べられているようになりかなり過小評価する結果となっている。RC 規準についても端部筋の抜け出しの影響を評価していないので、実験値に比べて全体的に小さくなっている。本法による計算値は実験値を良く近似しており本法の適合性を確認できた。

3.2 合成スラブ持続荷重実験結果との比較

筆者が行ったプレストレスト鉄筋コンクリート合成スラブの持続荷重実験結果¹⁹⁾について検討する。試験体は高強度鉄筋を用いてプレストレスを導入したプレキャスト板に後打ちコンクリートを打設した合成床板であるため、以下のような計算方法を用いた。

(1) 長期たわみ計算法の合成スラブに対する適用

乾燥収縮以外の要因による増大たわみについては、一体打ちの場合と同様に計算する。ただし、プレキャスト部にはプレストレスが作用しているため、下縁が引張となるような曲げモーメントが生ずる場合についてはひび割れモーメントにプレストレスの影響を考慮した。

ヤング係数およびクリープ係数はプレキャスト部と後打ち部の面積比による平均値を用いた。乾燥収縮の影響についてはプレキャスト部と後打ち部の収縮差による増大曲率を坂、六車の提案式²⁰⁾を用いて計算する。クリープ係数と乾燥収縮ひずみはコントロール試験体の測定結果から得られた回帰式を使用し、プレキャスト部の軸方向収縮についてはプレストレスによるクリープひずみを考慮した。

(2) 実験概要

図 6 に試験体の形状および寸法を示す。試験体はコンクリート製載荷フレームで支えられた両端固定一方スラブで、スパンは内法寸法で 450 cm、スラブ断面形状はプレキャスト部が中央部：100×10 cm、両端部：100×7 cm の山形スラブで、これに後打ちコ

図6 試験体の形状、寸法

ンクリートを打設し全せいを 15 cm とした。載荷は後打ちコンクリート打設後 40 日目 (先打ちコンクリートでは材令 63 日目に対応) に実施した。持続載荷荷重は 530 kgf/m² である。プレキャスト部および後打ち部のコンクリートにはそれぞれ呼び強度 270 kgf/cm²、210 kgf/cm²、スランプ 18 cm のレディミクストコンクリートを用いた。ハーフスラブ主筋には高強度異形鉄筋 SD490 の D13 を、合成スラブ端部上端筋には SD295 の D13 と D10 を併用した。実験の詳細については文献¹⁹⁾を参照されたい。

(3) 実験結果との比較

図 7 に中央たわみの経時変化を示す。たわみの計算値は、載荷後のひび割れモーメントの計算において曲げ強度を瞬時の曲げ強度の 70% として計算しており、剛性を過小評価するため載荷初期において大きく見積もる傾向はあるが、載荷期間全体を通しては実験値をよく捉えている。載荷日数 1153 日における全たわみは実験値が 11.2 mm、計算値が 10.6 mm で両者の比率 (実験値/計算値) は 1.06 である。図 7 中に瞬時、クリープ、端部引張鉄筋の抜け出しおよびコンクリートの乾燥収縮差によるたわみの増大 (計算値) を示している。抜け出しによる付加たわみ δ_s は (9) 式より得られる θ_s を用いて次式で計算した。

$$\delta_s = \frac{\theta_s l}{4} \quad (11)$$

載荷日数 1153 日におけるクリープおよび端部引張鉄筋の抜け出しによる増大たわみがそれぞれ全体の 45%、42% を示しており、それらの全体に占める割合が大きい事が分かる。収縮差による増大たわみが小さいが、試験体の収縮差自体が小さいことと、プレストレスによりひび割れが端部以外に生じていないことによるものと考えられる。また、収縮差による増大たわみが時間の経過とともに小さくなっているが、これはプレキャスト部におけるプレストレスによるクリープひずみにより収縮差が減少するためである。

図7 中央たわみの経時変化

4. 各種要因が長期たわみにおよぼす影響

本論文で提案した長期たわみ計算法を用いて、スラブ厚さ、スパン等の各種要因が RC スラブの長期たわみに及ぼす影響について検討する。

4.1 基準断面とコンクリートの諸係数

図 8 に基準断面の形状および寸法を示す。断面諸元は以下の通りである。

図8 基準断面

コンクリート強度：実強度を240kgf/cm²とする。

スラブ厚さ：15cm、スパン：4.5m、かぶり厚さ：3cm

仕上げ荷重＋積載荷重：340kgf/m²

クリープ係数、乾燥収縮ひずみ：

クリープ係数 φ_t と乾燥収縮ひずみ S_d の関係を、プレストレストコンクリート設計・施工標準・同解説²⁾に示されている関係式を用いて決定した。

$$S_d = S_n \frac{\varphi_t}{\varphi_n} \quad (12)$$

$$\varphi_t = \frac{ab_1 t}{10.5 + 0.25t} \quad (13)$$

$$S_n = 5 \times 10^{-4} ab_2 \quad (14)$$

ここに、 S_n ：乾燥収縮ひずみ最終値、 φ_n ：クリープ係数最終値

a ：部材断面寸法の大小による影響を表す定数

b_1, b_2 ：コンクリートの乾湿の影響を表す定数

t ：材令(日)

(12) 式に (13)、(14) 式を代入

$$S_d = 5 \times 10^{-4} ab_2 \times \frac{0.25}{ab_1} \times \varphi_t \quad (15)$$

$b_1 = b_2$ とすれば乾燥収縮ひずみとクリープ係数の関係は次のようになる。

$$S_d = 1.25 \times 10^{-4} \varphi_t \quad (16)$$

クリープ係数、乾燥収縮ひずみはRC標準で示されている値を参考に、(16) 式の関係からそれぞれ $\varphi_n = 3.2$ 、 $S_n = 4 \times 10^{-4}$ と設定した。

4.2 計算を行ったケース

表2に示すように8つの要因の長期たわみへの影響を調べた。Hシリーズはスラブ厚さのみを12cmから21cmまで変化させ、H12等と表示している。Dシリーズは施工精度としての端部上端筋の下がりによりスラブ端部の有効せいが低下したときの長期たわみへの影響を調べるため、有効せいの設計値に対する実有効せいの比を有効せい比として0.5～1まで変化させている。Lシリー

ーズはスパンを3mから5.5mまで変化させている。PTシリーズは引張鉄筋の間隔および径を変えて、端部引張鉄筋比を0.31%から1.12%まで変化させている。複筋比は端部で0.69、中央部で0であり一定としている。Wシリーズは積載荷重を100kgf/cm²から500kgf/cm²まで変化させている。Sシリーズは乾燥収縮ひずみを 2×10^{-4} から 6×10^{-4} まで変化させている。クリープ係数は(16)式で示した関係にしたがって設定している。TおよびKシリーズは推定が困難である付着強度 τ_{y0} および付着剛性 K_0 が長期たわみに及ぼす影響を調べるため、 τ_{y0} を20kgf/cm²から60kgf/cm²、 K_0 は2000kgf/cm²から18000kgf/cm²まで変化させている。ケースによっては計算上固定支持端部にひび割れの生じないこともあるが、本検討においてはすべてひび割れが生じ鉄筋の抜け出しがあるものとして計算する。

表2 要因と水準

シリーズ	要因	水準
H	スラブ厚さ(cm)	12, 15, 18, 21
D	有効せい比	0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1
L	スパン(m)	3, 3.5, 4, 4.5, 5, 5.5
PT	端部上端筋比(%)	0.31, 0.41, 0.56, 0.64, 0.78, 0.87, 1.12
W	積載荷重(kg/m)	100, 200, 300, 400, 500
S	収縮ひずみ($\times 10^{-4}$) (クリープ係数)	2(1.6), 3(2.4), 4(3.2), 5(4), 6(4.8)
K	付着剛性(kg/cm ²)	2000, 4000, 6000, 10000, 13100, 18000
T	付着強度(kg/cm ²)	20, 30, 34.3, 40, 50, 60

□の数値は基準値を表す

4.3 計算結果および考察

(1) 固定支持部のモデル化の相違がたわみに及ぼす影響

固定支持部からの鉄筋の抜け出し量を付着解析により計算する場合、対象とする接合部に応じて両引きモデルあるいは片引きモデルにモデル化して計算する。図9は図1に示す付着解析モデルにおいて鉄筋径D13、かぶり厚さ3cmとして片引きおよび両引きにモデル化したときの鉄筋応力と端部すべり量との関係の解析値を示したものである。同図よりすべり量は定着長さにより決まるため、鉄筋応力が大きくなれば実部材では梁幅に対応する解析試験体長さの長いものほどすべり量は大きくなっている。片引きモデルの場合、鉄筋とコンクリート間の付着力と荷重との釣り合いから決定される定着長さによりすべり量が決まり、両引きモデルとの大小関係はこの定着長さの大小関係で決まる。本解析では片引きモデルにより求めた端部すべり量は両引きモデルの30cmと40cmの間にある。しかし、鉄筋応力が2000kgf/cm²までの範囲では片引きモデルと両引きモデルに大きな差異はなく、瞬時についてはモデル化の相違による影響はほとんどないと言える。同様の付着解析モデルに対して鉄筋応力を2000kgf/cm²で持続載荷した場合の端部すべり量と乾燥収縮との関係を図10に示す。長期のすべり量にはモデル化の相違および両引きにおいては試験体長さの影響が見られ、特に試験体長さの小さいときにすべり量が小さくなっている。このすべり量の相違が長期たわみにおよぼす影響を調べるため、Hシリーズ、PTシリーズおよびSシリーズについて長期たわみの両引きモデルによる計算値の片引きモデル

ルによる計算値に対する割合と端部引張鉄筋応力との関係を図 11 に示す。同図より鉄筋応力が大きく試験体長さの大きい両引きモデルが片引きモデルの 1.2 倍程度と大きくなることがあるが、鉄筋応力が 2000kgf/cm² までは 0.8~1 の範囲に収まり、片引きモデルで計算すれば両引きモデルも含めて安全側に評価できることが分かる。以下の考察では端部引張鉄筋の抜け出しを片引きモデルにモデル化して解析した結果を用いる。

図 9 鉄筋応力ー端部すべり関係 図10 すべり量ー ε_{sh} 関係

図 11 長期たわみの両引きモデルによる計算値の片引きモデルによる計算値に対する割合

(2) 端部モーメントおよび端部引張鉄筋応力

図 12(a), (b) に端部モーメントおよび端部引張鉄筋応力と各種要因との関係を示す。端部上端にひび割れが発生すると固定度が低下し、端部モーメントは減少する。持続荷重を受けてスラブ部分の剛性が低下すると、応力再配分により端部モーメントは瞬時に比べて増大する。さらにクリープの影響で中立軸が下がるため、同一モーメントに対する鉄筋応力は大きくなる。これら二つの影響で長期の鉄筋応力は瞬時より大きくなり、抜け出し量増大の原因となっている。長期の端部モーメント低下率（完全端部固定支持として計算される端部モーメントに対する割合）は 0.85~0.95 の範囲にある。

(3) 端部引張鉄筋抜け出し量およびたわみ

図 12(c), (d), (e) に端部引張鉄筋抜け出し量、抜け出しによる付加たわみおよび全たわみと各種要因との関係を示す。全体的に端部筋すべり量、付加たわみおよび全たわみと各要因との関係は同じ傾向を示している。スラブ厚さ、スパン、鉄筋比のたわみに及ぼす影響は大きい。スラブ厚さについては、スラブ厚さの小さいものほど中立軸と引張鉄筋との距離が小さくなるためすべり量の増大率より付加たわみの増大率が大きくなっている。施工時の不具合として考えられる有効せいの低下によるたわみは非常に大きく、本解析では文献 2) に示されている端部有効せい比の逆数以上にたわみは大きくなっている。積載荷重、乾燥収縮とたわみとの関係は直線関係になっている。付着剛性 K_0 については 5000kgf/cm² 程度まではすべり量にその影響が見られるが、たわみにはその影響はほとんど見ら

れない。それに比べ同じ付着特性値である τ_{y0} のたわみに対する影響は大きく、 τ_{y0} の減少とともにたわみは双曲線的に増加しており、特に τ_{y0} の小さいときにたわみへの影響が大きい。したがって τ_{y0} の推定についてはある程度の精度が必要である。

図 13 に長期たわみの弾性たわみに対する倍率を示す。端部鉄筋応力が大きくなる程倍率も大きくなっている。端部鉄筋応力が通常鉄筋として使用される SD295 の長期許容応力度 2000kgf/cm² 以下でも、倍率が 6~15 になる。過去の実験結果から、長期たわみは弾性たわみの 12~18 倍になると報告されている²²⁾が、図 13 によればそのような倍率においては端部筋応力が 2000gf/cm² を超えると考えられる。

図 13 長期たわみの弾性たわみに対する倍率

(4) 端部引張鉄筋の抜け出しによる付加たわみの全たわみに占める割合

端部引張鉄筋の抜け出しによる付加たわみの全たわみに占める割合と各要因との関係を図 14 に示す。付加たわみの割合は瞬時の方が大きく瞬時は 0.4 前後、長期は 0.3 前後を示しており持続載荷によるたわみの増大率は付加たわみよりも曲げたわみの方が大きいことを示している。またそれぞれの要因については、全たわみの小さいものすなわちスラブ部分の剛性の大きいものほど付加たわみの割合は大きくなっている。

図 14 付加たわみの全たわみに対する割合

図 12 (a)端部モーメント、(b)端部筋応力、(c)端部抜け出し量、(d)付加たわみ、(e)全たわみ

5. まとめ

以上の検討より得られた主な結果をまとめると以下のとおりである。

- (1) 持続荷重下において両端固定RCスラブは、ひび割れによる剛性低下、コンクリートのクリープと乾燥収縮および固定支持部からの鉄筋の抜け出しにより増大するが、これらの影響を考慮した長期たわみ計算法を誘導した。
- (2) 本計算法を用いて、既往のRCスラブ持続載荷実験に対して検証した結果、長期たわみの実測値をよく捉えておりその適合性を確認した。また、持続載荷実験が行われたPRC合成スラブのたわみについて計算した結果、コンクリートのクリープおよび端部筋の抜け出しによる増大たわみはそれぞれ長期たわみの45、42%を占め、それらの全たわみに占める割合が大きい。
- (3) 本計算法を用いて一般的なRCスラブにおけるスラブ厚さ、スパン等の各種要因の長期たわみに及ぼす影響について検討した。その結果、長期たわみは弾性たわみの6～15倍となり、また端部筋の抜け出しによる付加たわみの全たわみに占める割合は大幅瞬時で40%、長期で30%で、端部筋の抜け出しによる付加たわみの影響の大きいことを定量的に捉えることができた。

今後、本計算法を簡略化した鉄筋コンクリートおよびプレストレスト鉄筋コンクリート曲げ材の長期たわみの略算法について検討していく予定である。

【参考文献】

- 1) 東 洋一、小森清司：鉄筋コンクリート帯スラブの長期たわみに関する実験的研究（その2）、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造系Ⅱ－Ⅱ、pp.1837-1838、1977.10
- 2) 武田寿一、高橋久雄、小柳光生：床スラブの長期たわみに関する研究、コンクリート工学論文、Vol.21、pp.115-124、1983.9
- 3) 岩原照次：長期設計荷重下におけるRC造スラブの鉄筋の抜け出しに関する解析的研究、日本建築学会構造系論文集、第400号、pp.45-57、1989.6
- 4) 岩原照次：使用荷重下における鉄筋コンクリート床スラブの長期曲げ問題に対する解析法に関する研究（第一報 ひび割れを生じた一方向スラブの瞬時曲げ問題に対する解析法）、日本建築学会構造系論文集、第415号、pp.63-73、1990.9
- 5) 大野義照、李 振宝、鈴木計夫：持続荷重下における異形鉄筋とコンクリート間の付着応力－すべり関係、日本建築学会構造系論文集、第459号、pp.111-120、1994.5
- 6) 大野義照、李 振宝、鈴木計夫：持続荷重下における端部鉄筋の抜け出しによる鉄筋コンクリート片持ち梁の付加たわみ、日本建築学会構造系論文集、第467号、pp.111-120、1995.1
- 7) 山尾芳秀、周 礼良、丹羽淳一郎：付着応力－すべり関係に関する実験的研究、土木学会論文報告集、第343号、pp.219-228、1984.3
- 8) 金 普漢、大野義照、鈴木計夫：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、第472号、pp.121-128、1995.6
- 9) 六車 照、森田司郎、富田幸次郎：鋼とコンクリートの付着に関する基礎的研究（I 付着応力分布について）－（I）、日本建築学会論文報告集、第131号、pp.1-8、1967.1
- 10) 日本コンクリート工学協会編：コンクリート便覧、p.66
- 11) H. Rusch, D. Jungwirth：コンクリート構造物のクリープと乾燥収縮（百島祐信訳）、鹿島出版会、1976
- 12) 松崎育弘、畑中 肇、田中久雄：鉄筋コンクリート造床スラブの長期たわみに関する実験的研究（その1）、鹿島建設技術研究所年報、第27号、pp.63-68、1979.6
- 13) 岩原照次：両端固定鉄筋コンクリート造一方向床スラブの長期曲げ性状、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.9、No.2、pp.615-620、1987.6
- 14) 山本俊彦：若材令時に過荷重を受けたRCスラブの長期たわみ、東急建設技術研究所報、No.8、pp.85-92、1982
- 15) 東 洋一、小森清司：鉄筋コンクリート帯スラブの長期たわみに関する実験的研究（その1）、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造系Ⅱ－Ⅱ、pp.1039-1040、1975.10
- 16) CEB-FIP Model Code for concrete structure、1970
- 17) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説、p.512
- 18) ACI Code 318-83
- 19) 堀 裕弘他5名：高強度鉄筋を用いてプレストレスを導入した型枠兼用プレキャスト板に関する実験的研究（その4、合成スラブの3年間の持続載荷実験）、日本建築学会大会学術講演梗概集C、pp.1085-1086、1993.9
- 20) 坂 静夫、岡田 清、六車 照：プレストレストコンクリート、朝倉書店、pp.403-408
- 21) 日本建築学会：プレストレストコンクリート設計施工規準・同解説、pp.114-115
- 22) 松崎育弘、星野克征：鉄筋コンクリート造床スラブの長期たわみ量の定量化に関する研究、日本建築学会関東支部報告集、pp.197-200、1982

（1997年9月9日原稿受理、1998年3月9日採用決定）