

論文 鉄筋コンクリートスラブの端部筋抜け出しによる付加たわみ

李 振宝*1・大野義照*2・五味久忠*3・鈴木計夫*4

要旨：持続荷重下における両端固定の鉄筋コンクリートスラブは、支持部材からの鉄筋の抜け出しにより固定度が低下し、付加たわみが生じ、さらに、この鉄筋の抜け出しはスラブの軸方向のコンクリートの乾燥収縮により増大し、付加たわみを増大させる。この鉄筋の抜け出しは鉄筋とコンクリート間の付着クリープおよびコンクリートの乾燥収縮に支配される。これらの影響を考慮した端部筋の抜け出しによる付加たわみの計算法を提案し、その適合性を両端固定スラブの持続載荷実験結果により検討した。

キーワード：スラブ、長期たわみ、鉄筋の抜け出し、付加たわみ、乾燥収縮

1. まえがき

鉄筋コンクリートスラブの長期たわみは固定支持端からの鉄筋の抜け出しによって大きく影響されることが既往の研究によって明らかにされている[1][2]。しかし、日本建築学会のRC構造計算規準・同解説の付録[3]に示されている長期たわみ計算法では端部鉄筋の抜け出しの影響については無視できないとしながらも定量的な評価までには至っていないために考慮されていない。

筆者らは持続荷重下における鉄筋の抜け出しは鉄筋とコンクリート間の付着クリープおよびコンクリートの乾燥収縮に支配されることを指摘し、この付着クリープの特性を表す持続荷重下の付着応力（ τ ）～すべり（ S ）関係[4]および抜け出し量の解析法[5][6]を提案するとともに、片持ちはりの持続載荷実験により抜け出しによる付加たわみを調べてきた。両端固定のスラブでは、さらに、スラブの軸方向の乾燥収縮により、抜け出しの量が増加することが考えられるが、それを考慮した解析法はいまだ確立されていない。

そこで、本論ではこれらの影響を考慮した抜け出しによる付加たわみの計算法を提案し、その適合性を両端固定の実大スラブの持続載荷実験結果[7]により検討した。

2. 鉄筋の抜け出しによる付加たわみ計算法

2. 1 端部筋の抜け出し量

(1) スラブは両端完全固定および軸方向の収縮も完全に拘束されているとし、その端部固定曲げモーメント（ M_0 ）および軸拘束力（ N_0 ）を(1)および(2)式により求める。

$$M_0 = \frac{w\ell^2}{12} \quad (1)$$

$$N_0 = E_{ct}A_c \times k\epsilon_{sh} \quad (2)$$

$$E_{ct} = \frac{E_c}{1 + \phi_t} \quad (3)$$

*1 大阪大学大学院 工学研究科建築工学専攻（正会員）

*2 大阪大学助教授 工学部建築工学科、工博（正会員）

*3 大阪大学大学院 工学研究科建築工学専攻

*4 大阪大学教授 工学部建築工学科、工博（正会員）

w : 等分布荷重

ℓ : スパン長

ϕ_t, A_c : コンクリートのクリープ係数、断面積

ϵ_{sh} : コンクリートの自由乾燥収縮

k : 実部材の収縮とコンクリートの自由乾燥収縮との差を考慮する係数 $k < 1$

(2) 端部断面を図1に示すようなひび割れ断面とし、 M_0 および N_0 が作用されている場合の中立軸深さ(X_n)、鉄筋応力(σ_s)を求める。断面における曲げモーメントと軸力の釣り合い式は次のようになる。

$$T - C = N_{y-1} \quad (4)$$

$$T(d - X_n) + C \times \frac{2}{3} X_n + N_y(D/2 - X_n) = M_{y-1} \quad (y=1) \quad (5)$$

$$T = a_t \sigma_s = a_t E_s \phi(d - X_n) \quad (6)$$

$$C = \frac{1}{2} E_{ct} b \phi X_n^2 \quad (7)$$

b, D : スラブ幅、スラブ厚

E_s : 鉄筋のヤング係数

ϕ : 曲率

a_t : 引張鉄筋の断面積

d : 圧縮縁から引張鉄筋中心までの距離

y : 繰り返し計算回数

(4)および(5)式の連立方程式を解くことによって端部ひび割れ断面の中立軸(X_n)および曲率(ϕ)を求め、鉄筋応力(σ_s)を求める。

(3) 鉄筋応力(σ_s)による鉄筋の抜け出し(S)を、提案した τ - S 関係モデル[4]および付着解析法[6]により求める。

(4) この鉄筋の抜け出しすなわちひび割れの発生によって、端部固定曲げモーメントおよび軸拘束力の一部分が解放される。その解放された曲げモーメント(ΔM_y)および軸拘束力(ΔN_y)を求める。

端部筋の抜け出しによる部材端部の回転角(θ_y)は次式で計算される。

$$\theta_y = \frac{S}{d - X_n} \quad (y=1) \quad (8)$$

両端固定部材に対して、両端部に回転角(θ_y)の回転が生じることで、(9)式の正の曲げモーメント(ΔM_y)が得られる。

$$\Delta M_y = \frac{2E_{ct}I_e\theta_y}{\ell} \quad (y=1) \quad (9)$$

I_e : スラブの有効断面二次モーメント

ひびわれ発生によって、部材が回転すると同時に、軸方向の縮みも生じる。その縮み量の平均値を部材の中心位置の縮み量($S1_y$)とし、次式で計算される。

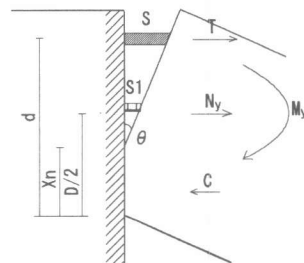


図1 端部断面

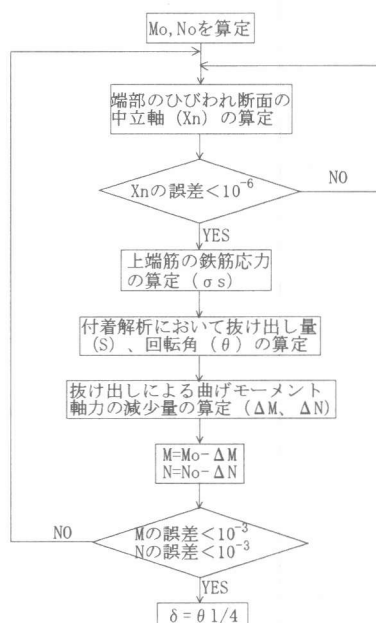


図2 付加たわみ計算のフローチャート

$$Sl_y = (D/2 - X_n)\theta_y \quad (y=1) \quad (10)$$

この縮みによって解放された軸拘束力 (ΔN_y) は次式で計算される。

$$\Delta N_y = E_{ct} A_c \times \frac{Sl_y}{\ell/2} \quad (y=1) \quad (11)$$

(5) 解放された後の端部曲げモーメント (M_y) と軸拘束力 (N_y) は次式から求まる。

$$\begin{cases} M_y = M_0 - \Delta M_y \\ N_y = N_0 - \Delta N_y \end{cases} \quad (y=1) \quad (12)$$

(6) 端部曲げモーメント (M_1) および軸拘束力 (N_1) が端部ひび割れ断面に作用するとし、(2) から (5) までの繰り返し計算を収束するまで行う ($y=1, 2, 3, \dots, z-1, z$)。付加たわみ計算フローチャートを図2に示す。最終端部曲げモーメント (M_z) および軸拘束力 (N_z) について図3に曲げモーメント分布を示す。

2. 2 付加たわみ

端部鉄筋の抜け出しによる付加たわみ δ_z は、2.1 で求めた端部鉄筋の抜け出し量およびひび割れ断面の中立軸深さから (8) 式を用いて端部の回転角 (θ_z) を求め、次式で計算される。

$$\delta_z = \frac{\theta_z \ell}{4} \quad (13)$$

なお、鉄筋コンクリートスラブの長期たわみは、載荷時の瞬時たわみとクリープによるたわみの増加および端部筋の抜け出しによるたわみの増加の和として計算する。

3. スラブ実験

本節では、高強度鉄筋SD490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を使用した実大P R C合成スラブの持続載荷実験結果[7]を用いて上述の解析法の適用性を検討する。

3. 1 実験概要

(1) 試験体の性質

試験体の形状・寸法を図4に示す。試験体はコンクリート製載荷フレーム（反力スラブ部分：幅100cm、厚さ30cm、柱部分：100×50cm）で支えられた両端固定一方向スラブで、長さは450cm（内法寸法）である。スラブ断面形状は、プレキャスト部が中央部：100×10cm、両端部：100×7cmの山形のスラブで、これに後打ちコンクリートが打設され、全せいは15cmである。

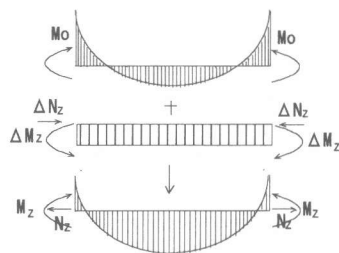


図3 曲げモーメント分布図

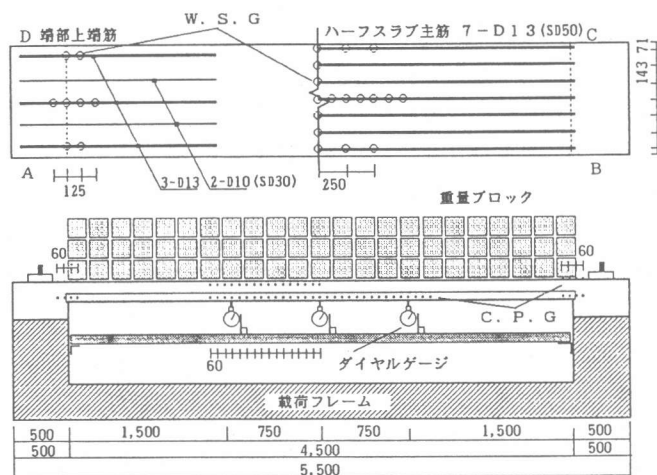


図4 試験体の形状、寸法

(2) 使用材料

ハーフスラブには早強ポルトランドセメントを使用した、呼び強度 270kgf/cm^2 、スランプ 18cm のレディミクストコンクリートを用いた。後打ちコンクリートには、普通ポルトランドセメントを使用した、呼び強度 210kgf/cm^2 、スランプ 18cm 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高強度異形鉄筋SD490のD13を用い、合成スラブ端部上端筋にはSD295のD13とD10を併用した。

(3) 荷重方法および測定方法

試験体の荷重状況は前掲の図4中に示した。荷重は後打ちコンクリート打設後30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、持続荷重荷重は 530kg/m^2 で、コンクリートブロックを3段積みとした。たわみはスラブの中央と中央から両端へ 75cm の位置の3ヶ所においてダイヤルゲージにて測定した。端部ひび割れ幅および端部側面のコンクリートひずみの測定は、検長 6cm のコンタクトストレインゲージで、鉄筋ひずみは鉄筋に貼付した検長 2mm のワイヤーストレインゲージにより測定した。

(4) コンクリートの乾燥収縮およびクリープ性状

図5にコントロール試験体（断面 $10\times 10\text{cm}$ ）にて測定したハーフスラブのコンクリートと後打ちコンクリートの乾燥収縮ひずみおよびクリープ係数を示す。

なお、実験の詳細は文献[7]に参照されたい。

3. 2 実験結果および解析結果

(1) 解析に用いた基本条件

a) スラブの乾燥収縮による収縮は、次のような根拠からコントロール試験体の実測値の $1/3$ としている。スラブとコントロール試験体との寸法の差違、スラブの収縮変形を拘束する荷重フレーム自体の乾燥収縮による収縮変形およびコンクリートの打設時期の違いを考慮すると、文献[8]よりスラブおよび荷重フレームの乾燥収縮はそれぞれコントロール試験体の約 0.778 倍と 0.454 倍となり、その差 $(0.324 \div 1/3)$ が解析の対象となるスラブの収縮となる。

b) τ - S 関係モデルは文献[4]の結果を参照し鉄筋およびコンクリートの種類を考慮して、 $K = 10700\text{kgf/cm}^3$ 、 $\tau_y = 36\text{kgf/cm}^2$ とする。

c) 端部筋の鉄筋応力については、端部に荷重時からひびわれが発生したものとして計算する。

(2) 端部上端鉄筋ひずみ

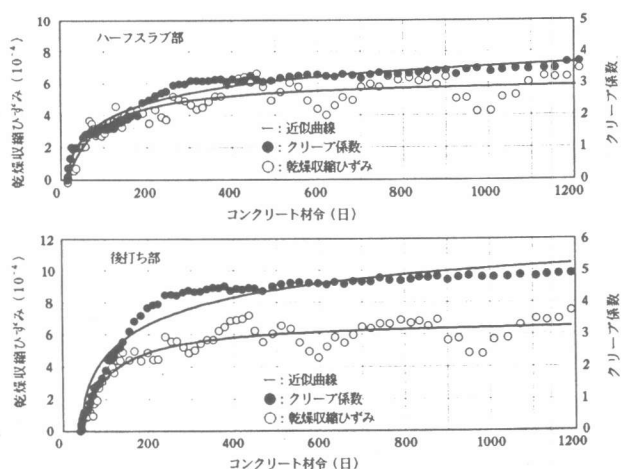


図5 コンクリートの乾燥収縮、クリープ形状

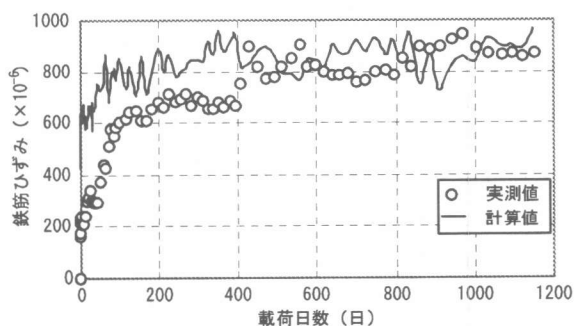


図6 上端鉄筋ひずみの経時変化

図6に端部上端の鉄筋ひずみ実測値および計算値の経時変化を示す。鉄筋のひずみが材令20日頃から急増するのは、ひび割れの発生およびその進展にともなうものと考えられる。その後載荷材令200日頃にひび割れ幅の増加が緩やかになっていることに同調した形で端部上端鉄筋ひずみは若干の増加傾向にあるものの、その増加量は少ない。計算値は前述の解析法を用いて求めたもので、載荷時にひび割れが発生したとして解析しているため最初の部分は実測値と異なっているが、その後はほぼ実測値を捉えている。

(3) ひび割れ幅

図7にスラブ端部上端のひび割れ幅と載荷経過日数の関係を示す。ひび割れ幅は端部上面で連続した後、急激な増加傾向を示し、その後載荷材令200日頃に1つ目のピークをむかえ、以後若干の増加傾向を示しているが、増加量は少ない。載荷材令1153日における端部ひび割れ幅はAおよびD端では0.51mmで、BおよびC端では0.33mmである（A～D端の位置については図4中に示す）。ひび割れ幅

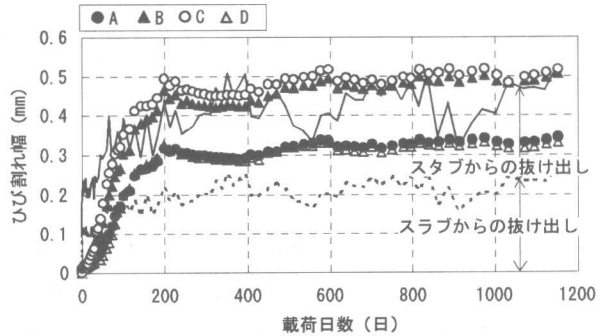


図7 ひび割れ幅の経時変化

は、スタブ部分とスラブ部分両方からの抜け出し量の和とし、前述の解析法を用いて算出した解析値を図中に実線で示す。なお、スラブからの抜け出し量は破線で示している。計算値は、鉄筋ひずみ計算値の動きに対応して変動してはいるが、ほぼ実測値を捉えている。

(4) たわみ

図8に中央たわみの経時変化を示す。持続荷重載荷時の瞬時たわみは1.0mmで、端部上端および中央部下端にもひび割れは生じず、両端固定として計算した弾性たわみ0.83mmとほぼ等しかった。持続載荷中のたわみの増加傾向はひび割れ幅の進展にほぼ同調した形となっており、載荷期間1153日における総たわみは11.2mmで、瞬時たわみの11.2倍である。

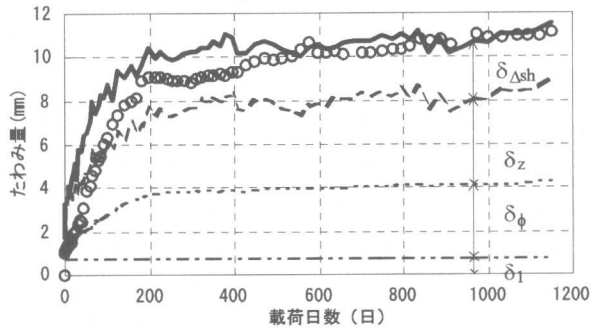


図8 たわみの経時変化

図中の曲線はたわみの計算値で、次のように計算している。

a) 荷重による瞬時たわみ (δ_1)

載荷時にひび割れが生じていないため、全断面有効の両端固定部材とし、次式で計算した。

$$\delta_1 = \frac{w\ell^4}{384E_cI_0} \quad (14)$$

E_c , I_0 : コンクリートのヤング係数、全断面有効断面二次モーメント

b) クリープによるたわみの増加 (δ_ϕ)

端部ひび割れ以外にひび割れが生じていないため、瞬時たわみのクリープ係数倍（ハーフスラ

ブと後打ちコンクリートの平均値)として計算している。

$$\delta_{\phi} = \phi \delta_1 \quad (15)$$

ϕ : クリープ係数

c) 端部鉄筋の抜け出しによるたわみの増加 (δ_z)

端部ひび割れ以外にひび割れが発生していないので、全断面有効の断面剛性を用い、前述の解析法を用いて算出している。

d) 新旧コンクリートの収縮差によるたわみの増加 ($\delta_{\Delta sh}$)

弾性理論[9]に基づいて収縮差によって生じる曲率の増加を求めて計算している。

長期たわみ (δ) はこれらのたわみを加算して、次式から求まる。

$$\delta = \delta_1 + \delta_{\phi} + \delta_z + \delta_{\Delta sh} \quad (16)$$

4. まとめ

両端固定の鉄筋コンクリートスラブの端部筋の抜け出しは鉄筋とコンクリート間の付着クリープおよびコンクリートの乾燥収縮に支配され、またスラブの軸方向の収縮により増大させる。これらの影響を考慮した端部筋の抜け出しによる付加たわみの計算法を提案した((1)~(13)式)。また、高強度鉄筋を用いプレストレスを導入した型枠兼用プレキャスト板を用いた実大P R C 合成スラブの持続荷重実験を3年間行い、長期たわみ性状を調べるとともに、提案した長期たわみ計算法の適合性を持続荷重実験結果により検証した(図6~図8)。

謝辞：本研究の一部は日本スパンクリート協会研究助成金を得て実施したもので謝意を表します。

参考文献：

- 1) 田中恭哉・小森清司・原田哲夫：プレストレスを導入した合成床スラブのたわみ性状に関する研究、日本建築学会構造系論文集、N0.466、pp.125-134、1994.12
- 2) 武田寿一・中根 淳・小柳光生：鉄筋コンクリート床スラブの長期たわみに関する研究、日本建築学会論文報告集、N0.365、pp.165-173、1986.7. 23.
- 3) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説、pp.510-512、1988
- 4) 大野義昭・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へすべり関係、日本建築学会構造系論文集、No.459、pp.111-120、1994.5
- 5) 鈴木計夫・大野義昭・李振宝・鍋沢斤吾：R C 片持ち梁の長期たわみと付着解析、コンクリート年次論文報告集、第14巻第2号、pp.57-62、1992.6
- 6) 大野義昭・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、No.467、pp.115-122、1995.1
- 7) 堀 裕弘・鈴木計夫・大野義昭・中川隆夫・斉藤駿三・鳥居 洋：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年間の持続荷重実験)、日本建築学会大会学術講演梗概集C(関東)、pp.1085-1086、1993.9
- 8) CEB/FIP：コンクリート構造物設計施工国際指針(1970年版)、鹿島出版会、pp.54-56、1971
- 9) 坂静雄・岡田清・六車照：プレストレストコンクリート、朝倉書店、pp.403-406、1962.