

プレストレストコンクリート造多層架構の 応力解析における一考察

野 沢 正*

1. はじめに

プレストレストコンクリート構造（PC 構造）の多層架構の応力解析において、現在一般に採られている解析方法は、PC 構造学会規準の設計例 1 に見られるように、施工順序に従い各層の PC 梁緊張時の構造系によってプレストレスおよび自重による応力解析を各層それぞれについて行い、次に完成時の構造系により、仕上げおよび積載荷重による応力解析を行い、最後にそれらの応力解析結果をすべて加え合せて設計荷重時の応力を算出するというのが通例である（図-4 参照）。

この施工順序をさらに厳密に考えるなら、PC 梁緊張時に PC 梁はサポートから浮き上がるであろうから、その後上階の床梁のコンクリートを打設した時点で、上階の床梁の荷重が作用し、さらにまた上階の PC 梁を緊張した時点で上階の荷重が解除される、という施工順序をも考慮する必要も生じ、応力解析はさらに複雑となる（図-5 参照）。

しかし、このように施工時の応力状態のみを厳密に考慮して応力解析をしたとしても、建物は時の経過とともに、コンクリートのクリープ変形・乾燥収縮の影響による 2 次応力により、応力状態が大きく変化することが考えられるので、必ずしも適切な設計荷重時応力が得られるとはいえない。

多層建築架構において、このようなクリープ変形・乾燥収縮の影響を、施工順序に従って逐次考慮して応力解析を行うことは、計算量が非常に膨大となるため、実際の設計においてはなかなか困難であり、またこれらの影響を厳密に考慮した設計例もあまり見かけない。

最近当社においては、施工順序に従いクリープ変形・乾燥収縮による影響を考慮した応力解析のできるプログラムを開発し、比較的たやすく、これらの影響を考慮した応力解析が可能となった。そこで、このプログラムを用いて算出した、比較的厳密なクリープ変形・乾燥収縮の影響を考慮した解析例を紹介し、あわせて従来行われてきた種々な解析方法と比較検討することとする。

2. 解析する建物の概要

図-1 で示すような 4 層 1 スパンの現場打ち PC 造建物を設計例として解析する。

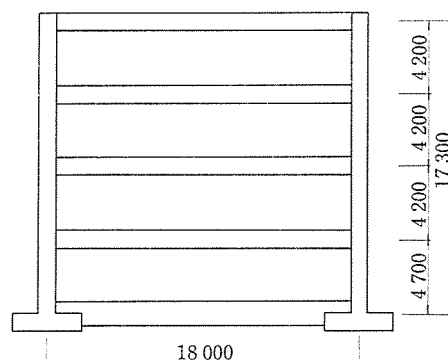


図-1 建物の形状

使用コンクリートの性質は次のように仮定する。

- 設計基準強度 $F_c = 300 \text{ kg/cm}^2$
- 弾性係数 $E_c = 27 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$
- 線膨張係数 $\alpha = 1 \times 10^{-5}$
- クリープ基準フロー値（一般部材） $\varphi_{f_0} = 2.0$
- （地中梁） $\varphi_{f_0} = 1.3$
- 乾燥収縮度（一般部材） $\varepsilon_{s_0} = 2.5 \times 10^{-4}$
- （地中梁） $\varepsilon_{s_0} = 1.0 \times 10^{-4}$

部材の断面形状および断面諸定数を表-1 に示す。固定荷重・積載荷重を表-2 に、 M_0 を表-3 に示す。

PC 鋼材は図-2 で示すような配置とし、プレストレス導入時緊張力は 330 ton とする。

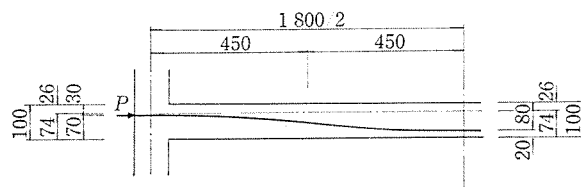


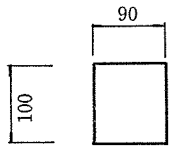
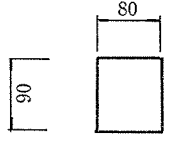
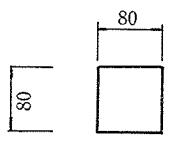
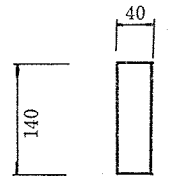
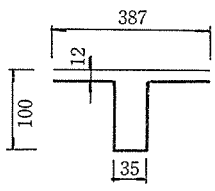
図-2 PC 鋼材の配置

3. 各種の解析方法

次に示すように、施工順序を考慮しない同時打ち同時緊張の仮定による一体解析、一般の施工順序を考慮した応力解析、より厳密な施工順序を考慮した応力解析、お

* ビー・エス・コンクリート（株）技術部

表-1 部材の断面形状および断面諸定数

名称	断面形状	断面積 A (cm ²)	断面2次モーメント I (cm ⁴)	自重 w (t/m)	有効部材厚の算出 (cm)		
					周長* S	有効厚に関する係数 k _w	有効部材厚 d _w = k _w · 2A/S
柱 C ₁		9 000	7 500 000	2.16	380	1.5	71.05
柱 C ₂		7 200	4 860 000	1.73	340	1.5	63.53
柱 C ₃		6 400	3 413 000	1.54	320	1.5	60.00
地中梁 B ₁		5 600	9 147 000	1.34	320	5.0	175.00
PC梁 B ₂		7 724	6 673 000 (y _上 = 25.94)	0.74	563	1.5	41.16

* 乾燥にさらされる断面の周長

表-2 荷 重

階	梁スラブ自重			仕上げ積載荷重			全荷重 (t/m)
	梁自重 (t/m)	スラブ自重 (t/m)	合 計 (t/m)	仕上げ荷重 (t/m)	積載荷重 (t/m)	合 計 (t/m)	
一般階	0.74	1.74 (290)	2.48	0.54 (90)	1.50 (250)	2.04 (340)	4.52
R 階	0.74	1.74 (290)	2.48	1.53 (255)	0.78 (130)	2.31 (385)	4.79

() 内は kg/m²

表-3 M₀

階	梁スラブ自重 (t·m)	仕上げ積載荷重 (t·m)	全 荷 重 (t·m)	プレストレス* (t·m)	合 計* (t·m)
一般階	100.44	82.62	183.06	-165.0 -140.25	18.06 42.81
R 階	100.44	93.56	194.00	-165.0 -140.25	29.00 53.75

* 上段の値はプレストレス導入時、下段は設計荷重時

よび前記の各々の施工順序に、クリープ変形・乾燥収縮の影響を考慮した応力解析の合計5種類の応力解析を行

うこととする。

各々の解析方法について次に説明する。

(1) 施工順序を考慮しない一体解析 (解析1)

施工順序を考慮せず、構造体が完成した後に自重・積載荷重・プレストレスが同時に作用するものとして図-3 に示すような荷重条件で解析する。

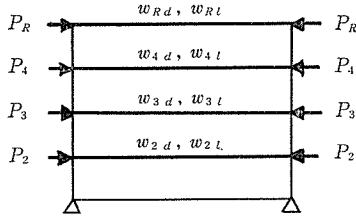


図-3 施工順序を考慮しない一体解析

なお、本解析ではプレストレスによる応力を、梁端部の軸力と偏心モーメントおよび次式で求めるけん垂力からなる外力として解析するものとする。

$$w_p = \frac{2Pe}{l^2} = \frac{2 \times 330 \times 10^3 \times 25}{450^2} = 81.48 \text{ kg/cm}^2$$

上記の w_p によって算出した、プレストレスによる M_0 を参考として表-3 に掲げてある。

(2) 一般の施工順序を考慮した応力解析 (解析2)

各階の施工終了後にプレストレスを導入し、その時点で床梁自重が作用するものとして解析する。

なお積載荷重はすべての施工が終了した後に作用するものとする。すなわち、図-4 で示す各施工段階の構造系について、図示する荷重が作用するものとして応力解析をし、それらの結果をすべて加え合わせることで、設計荷重時応力を求めるものである。

本解析方法は、現在最も一般的に採られている方法である。

(3) より厳密な施工順序を考慮した応力解析 (解析3)

3)

各階の施工終了後にプレストレスを導入し、その時点で自重が作用するものとする。さらに直上階のコンクリートを打設した時点で上階の床梁の荷重が作用し、その後上階のプレストレスを導入した時点で、その上階の荷重が解除される施工順序を考慮する。積載荷重はすべての施工が終了した後に作用するものとする (図-5)。

(4) 施工順序に従いクリープ変形・乾燥収縮の影響を考慮した応力解析 (解析4, 解析5)

前記の解析2・解析3における施工順序に、クリープ変形・乾燥収縮による2次応力の影響を考慮して応力解析をする。

クリープ変形・乾燥収縮による2次応力解析においては、持続荷重を取り除くと時間の経過とともに回復する、いわゆる遅れ弾性ひずみの影響も考慮するものとする。ただし鉄筋およびPC鋼材がクリープ変形・乾燥収縮に与える影響は無視するものとする。

以下、クリープ変形・乾燥収縮による2次応力解析の概要を説明する。なお解析方法についての詳細は、文献2)を参照していただきたい。

クリープ係数は次式で求めることとする。

$$\varphi(t, \tau) = \varphi_{f_0} [k_f(t) - k_f(\tau)] + 0.4 k_v(t - \tau)$$

ここで、

$\varphi(t, \tau)$: 材令 τ で持続荷重が載荷されたときの時間 t におけるクリープ係数

φ_{f_0} : 環境条件とコンクリートのコンシステンシーに関する係数。フロー値。一般部材は2.0, 地中梁は1.3とする。

k_f : フロー値の進行度を表す有効部材厚 d_w と

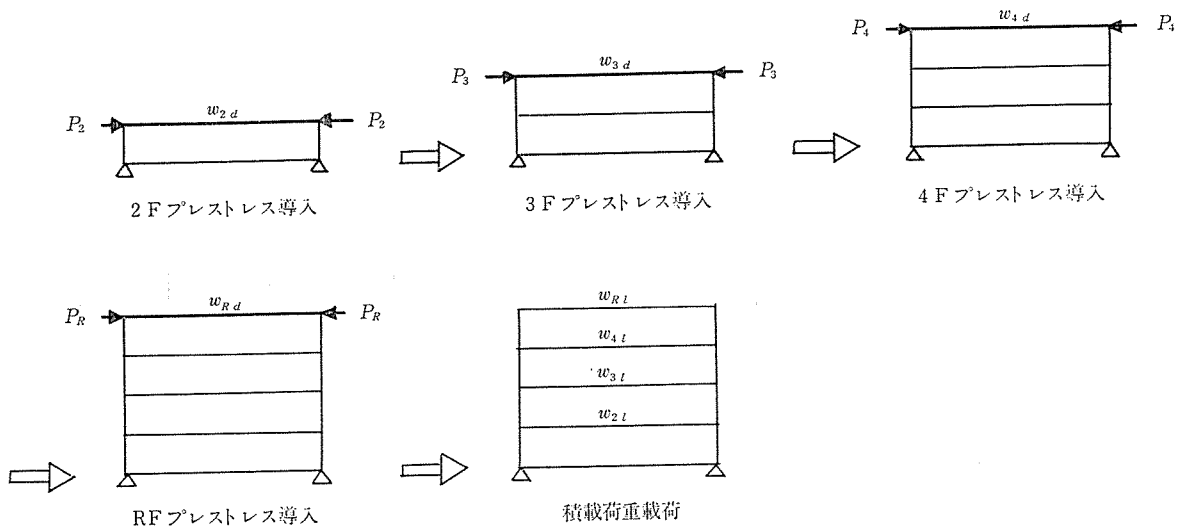


図-4 一般的な施工順序による解析手順

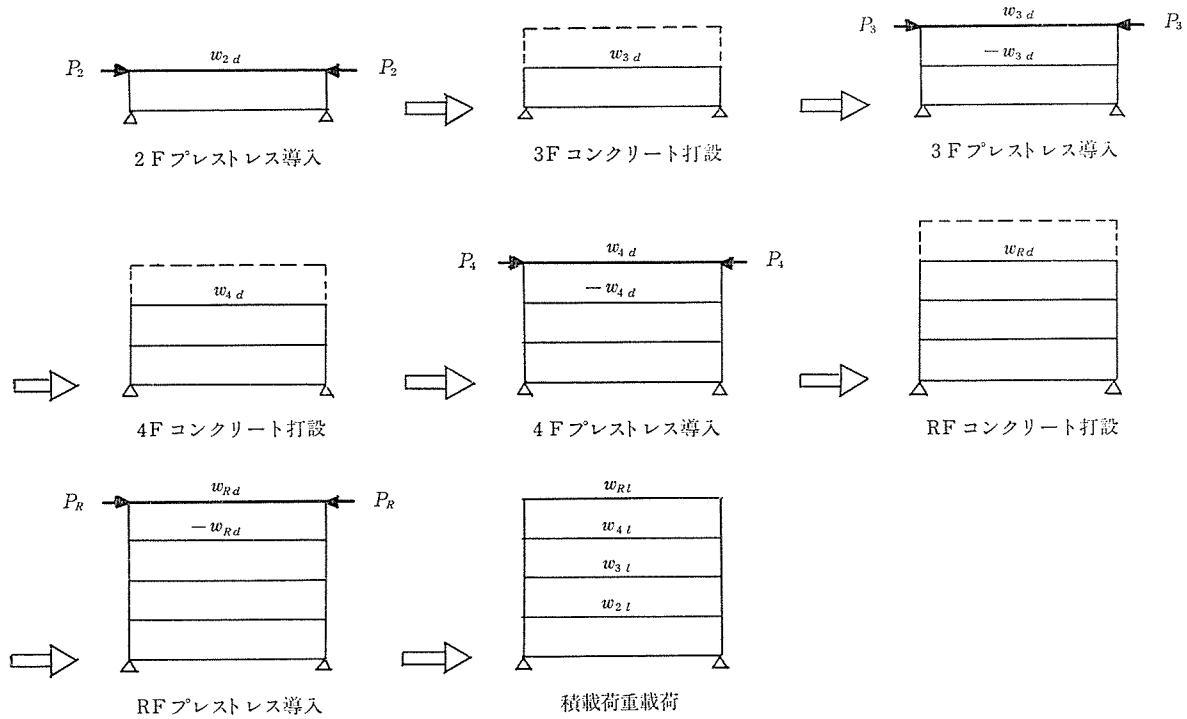
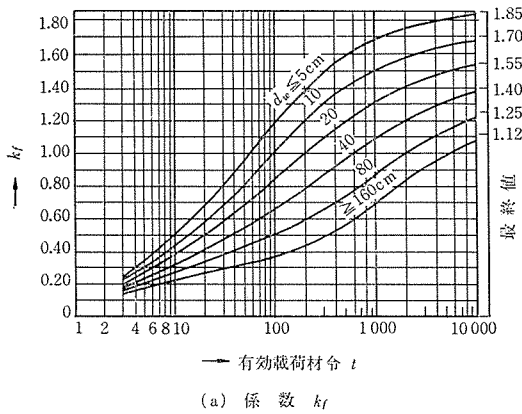


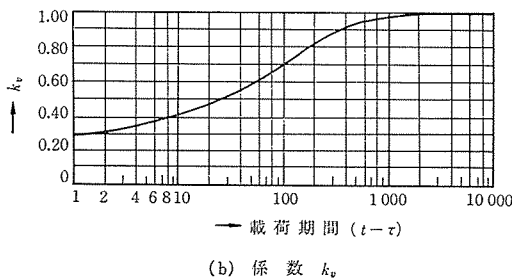
図-5 より厳密な施工順序による解析手順

時間 t に関する係数で図-6 (a) による。
 k_v : 遅れ弾性値の進行度を表わす持続荷重の載荷後の時間 $(t-\tau)$ に関する係数で図-7 (b) による。

乾燥収縮度は次式で求めることとする。



(a) 係数 k_f



(b) 係数 k_v

図-6 クリープの進行に関する係数

$$\varepsilon_s(t, \tau) = \varepsilon_{s0} [k_s(t) - k_s(\tau)]$$

ここで、

$\varepsilon_s(t, \tau)$: 材令 τ で乾燥収縮の影響を受け始めた時の時間 t における乾燥収縮度。

ε_{s0} : 環境条件とコンクリートのコンシステンシーに関する係数。基準乾燥収縮度。一般部材は 2.0×10^{-4} 、地中梁は 0.5×10^{-4} とする。

k_s : 乾燥の進行度を表わす有効部材厚 d_w と時間 t に関する係数で図-7 による。

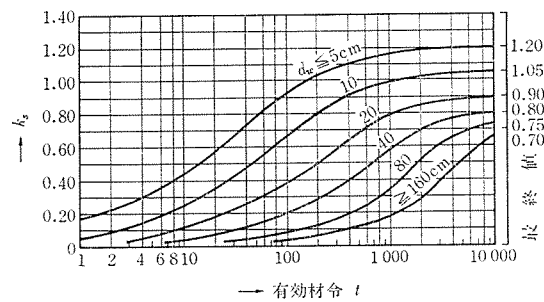


図-7 乾燥収縮の進行に関する係数

材令 τ で持続荷重が載荷された時の時間 t におけるコンクリートのひずみ $\varepsilon(t)$ は、持続荷重の載荷による弾性ひずみと、時間の経過に伴って発生してくるクリープひずみ、および乾燥収縮ひずみを合計することにより、次式で求めることができる。

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_e(\tau) + \frac{\sigma_e(\tau)}{E_c} \cdot \varphi(t, \tau) + \frac{\sigma_{k_s}(t)}{E_\varphi}$$

$$+ \varepsilon_s(t, \tau)$$

ここで、

$$E_{\varphi} = \frac{E_c}{1 + \rho(t, \tau) \cdot \varphi(t, \tau)}$$

$\varepsilon_e(\tau)$: 持続荷重の荷重による弾性ひずみ

$\sigma_e(\tau)$: 持続荷重の荷重による弾性応力度

E_c : コンクリートの弾性係数

$\sigma_{hs}(t)$: クリープと乾燥収縮により生じた応力度

$\rho(t, \tau)$: H. Trost の累加原則ならびに D. Schade

が与えた材令係数 (文献 2) 参照)

以上のクリープ変形・乾燥収縮についての基本式をもとに、変位法により電子計算機を用いて応力解析を行う。

上記の計算をするに当たって、構造体の施工工程は図-8 に示すように仮定することとした。積載荷重については便宜上 R 階のプレストレス導入後 7 日目に載荷するものとした。

以上 5 種類の解析方法により求めた設計荷重時応力を、応力図にして図-9 に示す。

図-10, 図-11 は、解析 4 および解析 5 による各施工段階時の応力図である。

なお、設計荷重時の応力解析においては、プレストレスの有効率が初めから 0.85 であるものとして解析して



図-8 施工工程

いる。各施工段階時の応力解析においては、プレストレスの減少は考慮していない。

4. 解析結果の考察

図-9 の各種解析方法による応力解析結果を通覧することにより、施工順序を考慮しクリープ変形・乾燥収縮の影響を考慮した応力 (解析 4, 解析 5), および一体解析による応力は互いに非常に近似しているのに対し、施工順序を考慮しクリープ変形・乾燥収縮の影響を考慮しない応力 (解析 2, 解析 3) は、他の解析結果と非常に異なっているという特徴があることがわかる。

以上の各種解析において、最も実状の仮定に近い解析

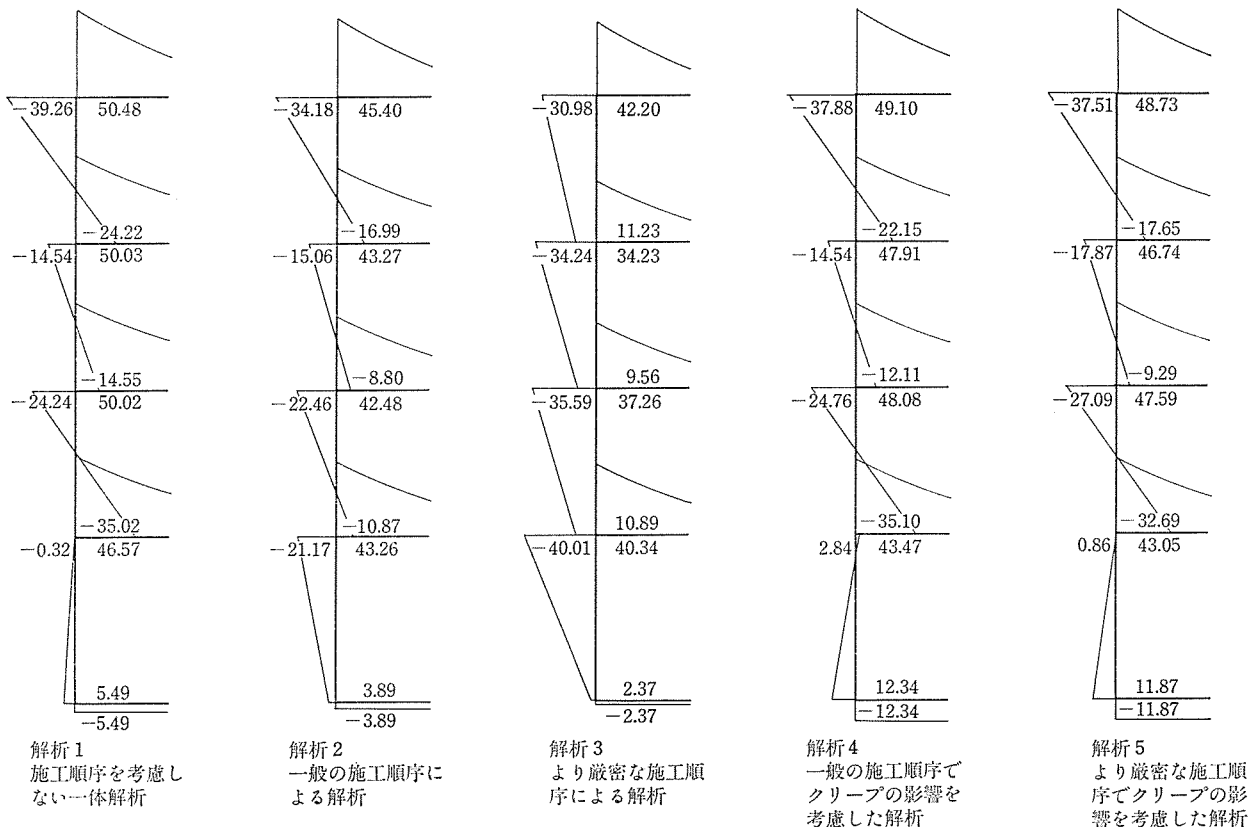


図-9 各種解析方法による応力

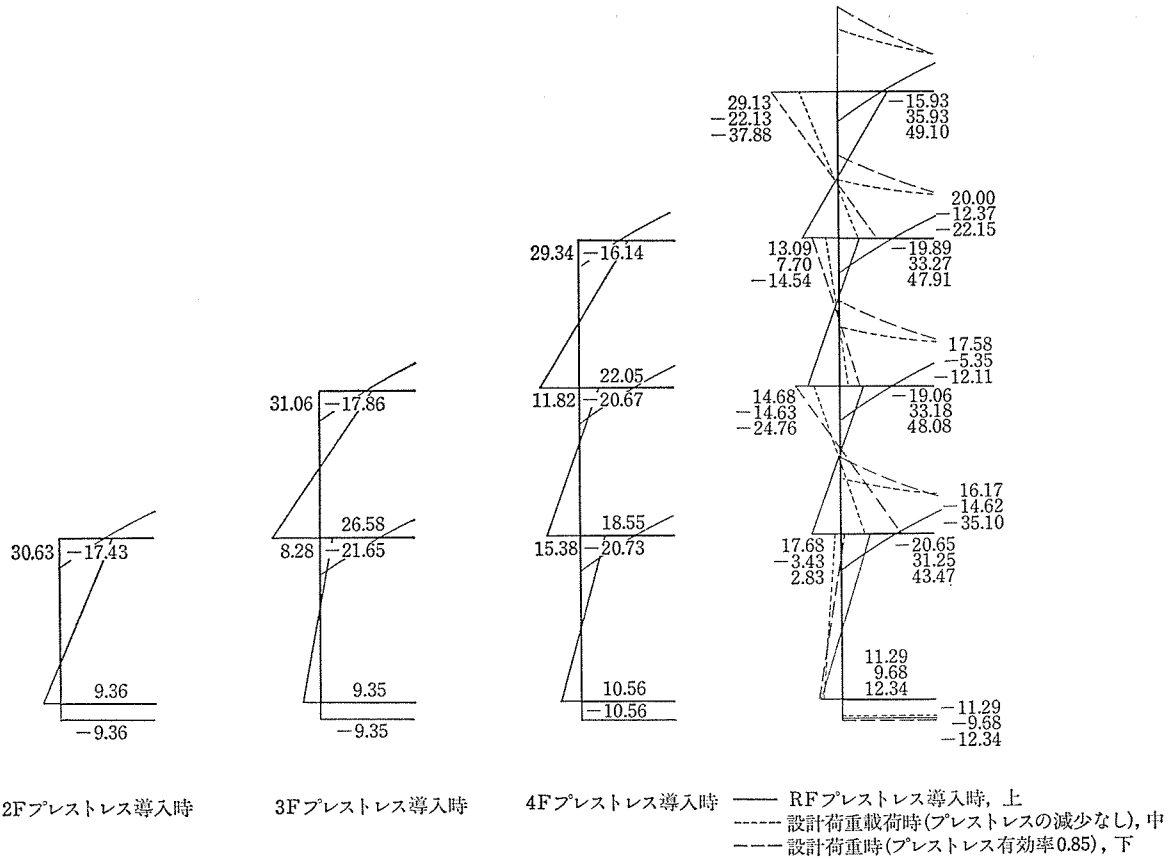


図-10 解析4における施工途中の応力

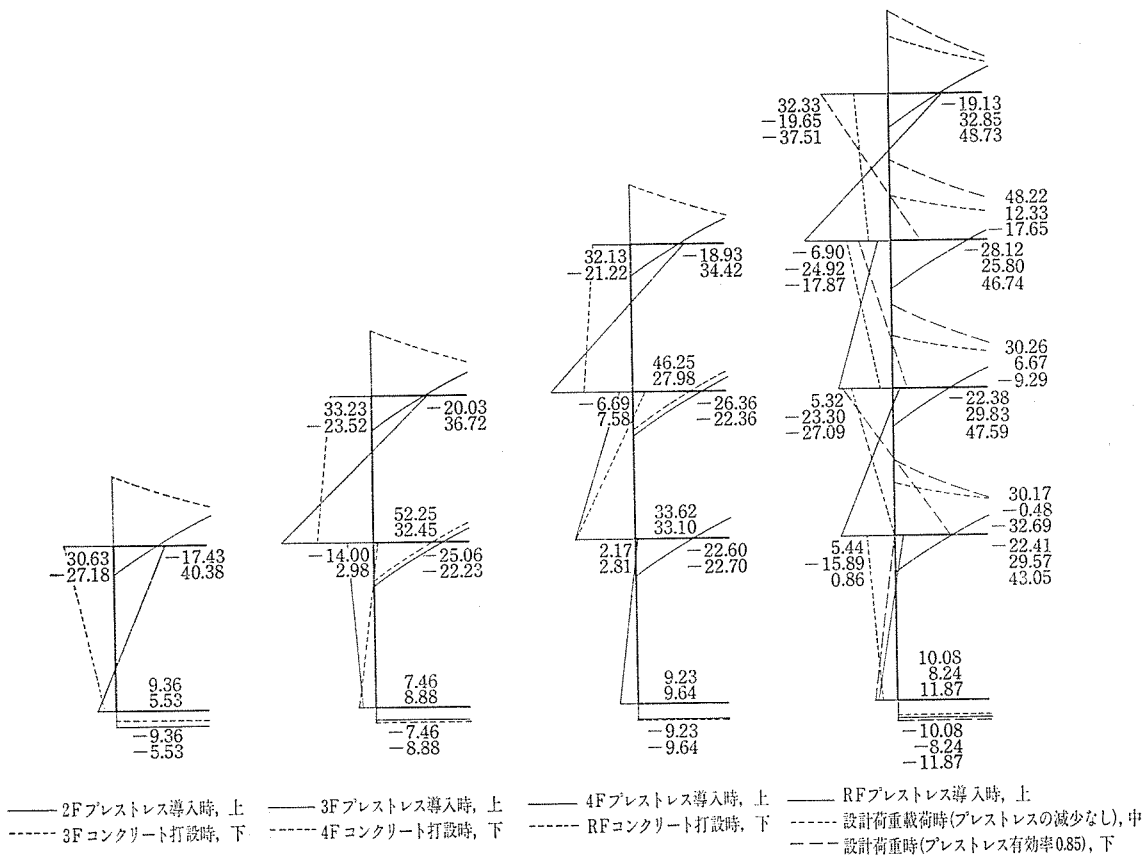


図-11 解析5による施工途中の応力

方法は解析5であるので、解析5の応力が、真の設計荷重時応力に最も近いと考えてよいものと思われる。しかし、PC 鋼線緊張後に梁下のサポートを撤去しない場合には、上階の床梁のコンクリートを打設した時点で、緊張によりサポートから浮き上がった PC 梁が、再びサポートに支持され、上階の床梁の自重がサポートを伝わり、さらに下階の梁にも伝わることとなり、解析5の解析仮定も実際の状態とは異なることとなる恐れもある。

上記のことを考慮した場合の応力は、解析5と解析4の中間の値に近いものと考えられるが、図-9 から明らかかなように、解析2と解析3の応力は大きく異なっているにもかかわらず、解析5と解析4の応力は非常に近似している。このことは、クリープ変形・乾燥収縮の影響を考えると、施工途中の応力状態にかかわらず、設計荷重時応力はほぼ一定の傾向となることを示しているものであり、この問題をあまり厳密に考える必要はないことがわかる。

したがって、解析5あるいは解析4のいずれかの方法によって、設計荷重時応力を求めれば良いものと思われるが、クリープ変形・乾燥収縮の影響を考慮した応力解析は非常に煩雑であり、実際の設計において用いるにはあまり実用的な方法とはいえない。

また、建築構造物のように不静定次数の高い構造物の場合には、温度変形・地盤沈下あるいは間仕切り壁や建具等、非構造要素による影響等、建物の応力に影響を与える不明確な因子が多く、一部の影響のみをいたずらに厳密に考えて解析をしたとしても、全体としての計算精度が必ずしも上がるとはいえない。

同時打ち同時緊張の仮定による一体解析である解析1の方法は、精算解である解析5および解析4の応力に非常に近似しており、また極めて簡便な解析方法でもあり、本計算例における程度の誤差であるならば、実際の設計における設計荷重時応力として用いるには、十分な精度のある解析方法であるものと思われる。

1例の計算例から、これを一般に当てはめることは早急であるかもしれないが、文献1)においても、クリープ変形の影響を考慮すると、最終の構造形によって一体解析をした応力に近づく、という傾向があることが指摘されており、また本解析例からも少なくとも従来とられていた解析2、あるいは解析3の方法よりも、解析1の一体解析による方が望ましいということは確認できるのではないと思われる。

施工途中の応力については 図-10 および 図-11 より、解析4の場合には、柱においては当該階梁のプレストレス導入時応力および設計荷重時応力が最大応力となり、梁においては、直上階のプレストレス導入時応力お

よび設計荷重時応力が最大応力となる。解析5の場合には、柱においては主として当該階梁のプレストレス導入時応力、直上階のコンクリート打設時および設計荷重時応力が最大応力となり、梁においては直上階梁のプレストレス導入時応力および設計荷重時応力が最大応力となっている。

上記における直上階のプレストレス導入時の梁の応力と、当該階のプレストレス導入時の梁の応力とは、あまり大きな差異がないこと、また当該階のプレストレス導入から直上階のプレストレス導入までの期間に実際にはプレストレスの損失が生じること、また施工途中の応力は比較的短期間の、一時的な応力であること等の理由により、上階の床梁のコンクリート打設時に、下階梁のサポートを在置させる等の考慮をほらうならば、施工途中の応力検討としては、当該階のプレストレス導入時応力についてのみ検討をしておけば、安全上ほぼ支障ないのではないと思われる。

5. おわりに

PC 造多層架構の応力解析で現在とられている方法は、本解例の解析2・解析3のように、施工順序を考慮した解析、梁の軸変形による柱の荷重項の計算にのみ施工順序を考慮して、応力解析は最終構造系で一体解析とする方法、本解析例の解析1のように、同時打ち同時緊張の仮定による一体解析、あるいはクリープ変形を考慮した解析等、非常に様々なようである。

本解析例からも明らかかなように、これら解析方法の差により、設計荷重時応力は非常に異なったものになっており、設計者の判断により、かなり大きな変動幅のある設計が行われていることがわかる。

建築構造物のように不静定次数の高い建物の場合、ひたすらに厳密な解を求めることにも限界があり、いずれにしても設計者が構造系のモデル化、積載荷重、解析方法等の仮定を行って近似解としなければならないものと思われる。

本報告が、PC 造多層架構の構造設計をするうえで何らかの参考になれば幸いである。

参 考 文 献

- 1) 日本建築学会関東支部：プレストレストコンクリート 構造の設計、構造計算のすすめ方・5
- 2) 佐藤素啓、渡辺実、佐藤昇：変位法によるコンクリート構造物のクリープ・乾燥収縮解析の基礎理論、プレストレストコンクリート、Vol. 22, No. 2, Apr. 1980
- 3) H. Rüschi, D. Jungwirth: Stahlbeton-Spannbeton Band 2., Werner-Verlag, 1976, 百島祐信訳：コンクリート構造物のクリープと乾燥収縮、鹿島出版会
- 4) 六車照：プレストレストコンクリート不静定架構のクリープ応力解析、プレストレストコンクリート、Vol. 7, No. 5, Oct. 1965~Vol. 8, No. 2, Apr. 1966

【昭和 57 年 7 月 13 日受付】