

平面構造物のクリープ解析 解析法と長大免震プレストレストプレキャストコンクリート構造物についての 解析・計測結果比較

中山 昌尚

概 要

物流倉庫などで、長大なプレストレスト免震構造物が建設されるようになって来ている。長いものでは桁行き300mに及ぶものも出現しつつある。こうした構造物では、梁に導入されるプレストレス力(以降PS力)および梁部材の乾燥収縮、温度荷重により、梁の軸方向のクリープ現象が発生しうる。その結果、免震装置への偏芯載荷、最外縁柱に大きな部材角を発生させ、外装材への過度の負担から漏水を引き起こす可能性がある。この現象の詳細な情報を得るための予測手段として、平面フレームについて、クリープ係数法と有限要素法を組み合わせた解析手段を開発した。この方法では、施工順序および施工時調整機能も考慮できる。例題として、長さ280m4階建プレストレスト・プレキャストコンクリート構造物を対象に、柱梁交点の水平変位について、解析結果と計測結果を比較した。その結果、次の結果が得られた。1)適切にパラメーターを設定することにより、解析結果と実測結果は概ね一致させることができる。計測結果を説明するためのパラメーターの設定目安がついた。2)今後、この解析による予測精度を上げるためには、実測データの収集が是非とも必要である。

A Creep Analysis of Plane frames — Comparison of Field Measured Displacements and Numerical Analysis for a 300m Long Base-Isolated Pre-stressed Pre-cast Concrete Structure —

Abstract

Very long base-isolated pre-stressed concrete structures have recently begun to be built in Japan. These structures are mainly used as warehouses. The length of some of them reaches as much as 300m. In these structures, large displacement caused by the phenomenon of girder creep is anticipated. This could cause problems such as excessive horizontal displacement of rubber bearings, excessive frame deformation and leakage of water through faults of which develop in the exterior finishing. In order to predict these effects quantitatively in detail, a numerical method for a two dimensional frame has been developed by the combination of a creep coefficient technique and a FEM (Finite Element Method) technique which has input parameters including construction procedure, temperature load and also dehydration shrinkage of structural members. As a numerical example, frame deformation of a 280m long and 4-story base-isolated pre-stressed pre-cast concrete warehouse is discussed. Simulated results are compared with field-measured ones. Through this study, the following conclusions are made.

- 1) When the parameters are properly set, the simulated results agree closely with the measured data. From this point, it can be said that a method to set the necessary parameters is established.
- 2) Accumulation of data on these parameters through more field measurements is strongly needed to increase the accuracy of prediction by numerical analysis.

キーワード: クリープ プレストレス 免震構造
クリープ係数法 数値解析

§1. はじめに

物流倉庫などで、多スパンのプレストレスト免震構造物が建設されるようになって来ている。長いものでは桁行き300m に及ぶものも出現しつつある。こうした構造物では、主として梁に導入されるプレストレス力(以降 PS 力)により、梁の軸方向のクリープ現象が発生しうる。その結果、免震装置への偏芯載荷、最外縁柱に大きな部材角を発生させる可能性がある。免震装置への負荷に着目し、解析手法は異なるが、同種の問題を扱ったものとしては能森¹⁾がある。そこでは、免震装置に発生する水平変位の算定を目的として上部構造をブロック化し分布せん断バネを持つ小自由度系として検討している。本報では、このようなクリープ現象が問題になる構造物について、施工手順を考慮したより解析結果の評価自由度の高い検討を可能にするために、クリープ係数²⁾³⁾を用いた有限要素法による数値解析を行う。そのモデル化を含めた推定精度を桁行280m のプレストレスト免震構造物の水平変位計測を検討した結果を報告する。本解析方法は、超高層 RC 建物下層部柱のクリープ現象にも全く同様に適用できる。なお、本報の大筋は文献⁴⁾に記述されているが、ここでは、紙面の関係上詳しくは説明されていない解析方法に焦点を当てて丁寧に記述する。

§2. 解析方法概要

2.1 クリープ現象

クリープ現象は、持続的な軸力の作用により軸歪が時間とともに増大する現象をいう。この現象を扱う時、線形バネと線形ダッシュポットの組み合わせモデル⁵⁾の方法があるが、RC 部材に一般的に認められるクリープ変位の載荷時期依存性(クリープ係数曲線における垂直方向の“平行移動則”³⁾)を反映しにくいので、ここではクリープ係数法を採用する。クリープ係数は、一定軸荷重が作用し続ける場合、生じる軸歪/弾性歪と一定軸荷重作用時間との関数関係である。クリープ係数法では、ある時間区間で問題としている材のクリープ係数の増大を $\Delta \phi$ とする時、その区間では軸剛性が弾性軸剛性の $1/(1 + \Delta \phi)$ 倍であるとみなす現象論的な方法である。荷重が一定である限り、時間区間は必ずしも微小である必要はない。考えているモデル化されたクリープ現象の扱いを付録1に示した。クリープ係数は文献⁶⁾などによる一般的な次式を採用する。

$$\phi(t) = \phi_{\infty} \left(\frac{t - t_0}{\beta_c + t - t_0} \right)^{\alpha_c} \quad (1)$$

ϕ_{∞} 、は時間が十分長くなった場合の収束値、 t は解

析上共通の時間、 t_0 はクリープの開始日である。

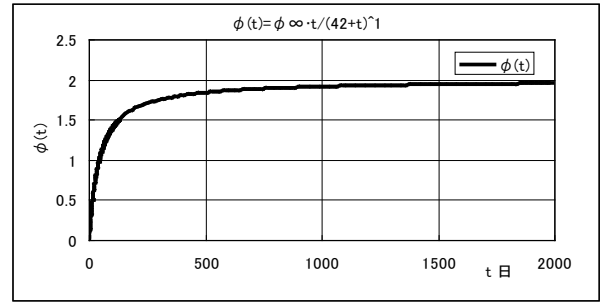


図1 想定するクリープ係数イメージ (1)式 $\beta_c=42$ $\alpha_c=1$ の場合を例示

2.2 FEM で扱う時の要点

以下に、通常の FEM による扱いをまとめる。

通常の Beam 要素を用いた平面骨組として扱う。但し、免震装置には、弾性バネ要素を用いる。水平梁に取り付くスラブの剛性効果は、その有効幅に応じて、梁の軸剛性増大効果および梁の曲剛性増大効果: ϕ_b を持つものとする。クリープ効果は Beam 要素軸剛性にのみみるとみなす。これは、曲げ剛性は通常の弾性剛性とみなすということである。クリープ係数法は現象論的な解析手法であるので、ここではこの様に単純化している。

部材が組みあがってゆく施工過程の表現については、柱梁部材の架構への導入日、 P_s 導入日、スラブ打設日を指定し、ある時間区間で存在している架構を確定する。プレストレスト構造の場合、 P_s 力導入時の施工上の最大長さの制約から、ムーブメント部分と呼ばれる緩衝部分を設けるのが一般的である。これはまた、変形抑制効果があるが、その効果の定量化例を、自由支持された 1 本棒モデルとして付録2に示した。

2.3 考慮する荷重

クリープを発生させる外力としては、一般的には、自重・積載荷重、PS 力、スラブ乾燥収縮力、柱梁部材の乾燥収縮力を扱う。更に、施工時期と連動して、代表的部材温度の変化に伴う温度荷重も考慮する。以下に要点を列挙する。

PS力: P_s 力は導入後は一定値を保持する。

乾燥収縮力

梁、スラブ別々に、乾燥収縮に伴う荷重は考えている時間区間中に、一定で圧縮側に作用し次とみなす。

$$F_{sh} = E \cdot A \cdot \Psi(t) \quad (2)$$

Ψ は乾燥収縮歪で(3)式。E、Aはヤング率、関与する断面積、 t は考えている時間区間の終わりの時間

$$\psi(t) = \psi_{\infty} \left(\frac{t-t_0}{\beta_s + t-t_0} \right)^{\alpha_s} \quad (3)$$

ψ_{∞} は収束値、 t は時間、 t_0 は乾燥収縮の開始日である
スラブ乾燥収縮歪に伴う外力は、スラブ打設とともにコンクリート設計強度 F_c に応じた名目上のヤング率と関与断面積の積が圧縮力として発生するものと扱っている。

温度荷重

部材温度は、各時間区間で全部材共通とし、日平均外気温に関係付けられ、日平均外気温の年平均からの偏差の μ 倍とみなしフーリエ級数展開による(4)式で表現する。 A_0 は年平均気温、 $k=1$ は1年周期成分を意味する。日平均気温を基本に考えることは、部材を含む建物の熱容量に伴う時間的な時間平均効果を考慮してのことである。

$$T(t) = A_0 + \mu \sum_{k=1}^2 \left(A_k \cos \frac{2\pi kt}{365} + B_k \cos \frac{2\pi kt}{365} t \right) \quad (4)$$

考えている時間区間中に作用する、温度変化に伴う荷重増分は引張力で一定とし次とみなす。

$$F_{temp} = E \cdot A \cdot \Delta T \quad (5)$$

ΔT は考えている区間中の温度増分、

2.4 各時間区間での釣合い式と変形の累積

前節までの扱いで、ある時間区間で、架構および荷重が確定する。考えている時間区間で存在する部材の集合体について次の釣合い方程式を解く。

$$[K(\Delta\phi)]\Delta u = b \quad (6)$$

b : 荷重ベクトル Δu : 増分変位

$[K(\Delta\phi)]$ 全体剛性マトリックス $\Delta\phi$ は各部材の考えている時間区間でのクリープ係数増分の関数であることを意味する。 $\Delta\phi=0$ 時は弾性剛性を意味する。次表のケースの変位増分解を求める。

表 1 各時間区間で求める変位増分解

ind	軸剛性への $\Delta\phi$	方程式の荷重項 b	変位増分解の名称
1	$\Delta\phi=0$	Δf	Δu_a
2	$\Delta\phi \neq 0$	$f_0 + \Delta f (=f_1)$	Δu_b
3	$\Delta\phi=0$	$f_0 + \Delta f (=f_1)$	Δu_c

f_1 : 今の区間での荷重 f_0 : 前の区間での荷重

Δf : 前の Step からの荷重増分 $=f_1 - f_0$

以上の変位増分解を用いて次のようにこの区間までの総(累積)変位を算定する。

$$\text{弾性(総)変位 } u_{e1} = u_{e0} + \Delta u_a \quad (7)$$

$$\text{塑性(総)変位 } u_{p1} = u_{p0} + \Delta u_b - \Delta u_c \quad (8)$$

$$\text{総変位 } u_{t1} = u_{e1} + u_{p1} = u_{t0} + \Delta u_a + \Delta u_b - \Delta u_c \quad (9)$$

全く同様に、増分変位解 $\Delta u_a, \Delta u_b, \Delta u_c$ に対して各々定まる増分部材力から、弾性部材力、塑性部材力、総部材力が定められる。最初の区間で、 u_{e0}, u_{p0}, u_{t0} は 0 である。弾性変位についても、施工手順を考えた場合、増分解析が必要である簡単な例を付録 3 に示している。

2.5 施工過程での調整作用の考慮

施工過程を考えた場合の調整作用は二つある。

- 1) 柱を立てる場合に、基本的には下の階の既に変位を生じた節点位置に合わせて建てる調整機能。
- 2) 梁へ P_s 力を導入する際、梁の弾性変形による柱の倒れ込みを小さくする調整機能。

最初の項の意味は次である。前節までの解析で求まる総変位は、無荷重時の初期形状での節点位置を基準にした、節点が発現してからの累積総変位なので、出現するまでの下階の節点の変位が含まれていない。そのため、下階の節点の変位を含んだ総変位に変換する必要がある。2 番目の項については、梁に P_s 力を導入する場合、弾性変位が生じるが、それを吸収できるように、 P_s 導入に伴い梁に弾性変位が生じた結果、柱が鉛直になるように施工時調整を行うのが一般的である。この状況を図 2 に示す。こうした施工時の調整に基づいた結果生じる節点変位については、前節までの解析で求まる総変位出力に別途修正を加えることにしている。

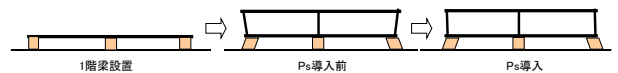


図2 施工時の調整機能の概念的な説明図

§3. 例題 対象構造物とパラメーター設定

図 3 に示す長さ 280m(10m*28 スパン)4 階建て(各階高 6.6m)構造物を対象とする。表 2,3 に部材断面定数を示す。同表に示されていない情報として次がある。

1 階梁は現場打、1 階梁以外はプレキャスト部材である。1 階免震装置の水平剛性 1.0Tonf/cm(第 2 勾配)、また、コンクリートの線膨張率は 10-5/°C、比重 2.4 とした。

本報で扱うクリープ現象を問題にする構造物について関係する重要なパラメーターを具体的に設定する際に、困難があった。クリープ係数の時間変化、乾燥収縮の時

間変化およびそれに伴う荷重発生の扱いです。材料工学的に小試験体で多くのデータはあるが、実大規模の部材についての情報が少ないためであった。ここでは、解析結果が、計測結果と大きな差が生じない程度の値を探索的に設定することにした。

本解析にあたっては、柱のクリープ、梁・柱の乾燥収縮はないものとした。(1)式の梁のクリープ係数について、 ϕ_{∞} は1階で3その他は2、 $\beta_c=42$ 日、 $\alpha_c=1$ とした。各階スラブの乾燥収縮については文献⁷⁾を参考に、 $\beta_s=527$ 日、 $\alpha_s=0.622$ とし、多少の試行の末 $\phi_{\infty}=100\mu$ とした。施工時の調整については、図2に示した様に、梁にPS導入を行う際に、PS導入後に支える柱には、梁のPS導入に伴う弾性変形が課されないものとした。

施工過程のモデル化にあたっては、部材1本ずつのモデル化は煩雑すぎて現実的ではないので、複数日にわたる一連の作業(一般部、ムーブメント部それぞれの区域での部材架設、スラブコンクリート打設、PS導入)の代表日はその一連作業期間の中央日とみなすことにした。

スラブの有効幅については、梁に直交するスラブのスパンの軸剛性の50%が梁軸剛性に加算され、また、梁曲げ剛性を1.5倍に割増させるものとみなした。温度伸縮荷重に関係するスラブの有効幅は、梁に直交するスラブスパンの半(50%)とした。(4)式の A_k, B_k は最寄の測候所のアメダスデータより定めた。日平均外気温の1年周期成分(片)振幅は 10.63°C となった代表部材温度については、(4)式で $\mu=0.5$ とした。その意味は4.で触れる。1階梁設置代表日から1日単位で解析を行った。解析例として図4に1170日目(冬)の水平変位の解析結果を示す。ムーブメント位置で変位が急変し施工手順反映が垣間見られる。

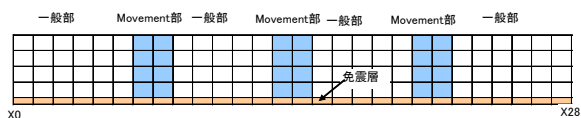


図3 対象構造物 左端がX0通り

表2 部材断面定数(梁)

位置	B cm	D cm	Fc N/mm ²	Ec tonf/cm ²	Ps Tonf	一般部Ps導入(日)	Movement部Ps導入(日)
1階梁	100	80	50	315	384	26	63
2階梁	100	60	50	315	380	66	88
3階梁	100	60	50	315	380	109	119
4階梁	100	60	50	315	380	137	148
R階梁	100	60	50	315	380	145	150

表3 部材断面定数(柱、スラブ)

位置	t cm	Ec tonf/cm ²	B軸 cm	B輪 cm	Fc N/mm ²	位置	B cm	D cm	Fc N/mm ²	Ec tonf/cm ²
1階スラブ	18	282	330	500	36	1階柱	90	90	50	315
2階スラブ	18	282	330	500	36	2階柱	90	90	50	315
3階スラブ	18	282	330	500	36	3階柱	90	90	50	315
4階スラブ	18	282	330	500	36	4階柱	90	90	50	315
R階スラブ	15	257	330	500	33					

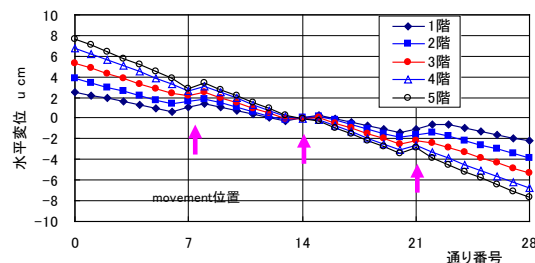


図4 解析による水平総変位分布例(1170日目、冬)

§4. 実解析結果および計測結果との比較

実測で得られる変位は次の意味である。1階部分の変位は、免震装置の水平変位より得られるもので、2階以上の変位は1階柱脚部を基準にした上階の相対変位に、1階部分の変位を加えた量である。2階以上の1階に対する相対変位は、高所作業車で標点スケールを当て、トランシットにより相対変位を読みとることによって得た。つまり、解析と同様、免震装置の基礎は不動とみなしている。計測時期は竣工時(220日目)、および480日目から夏冬5回分である。夏は8月終旬、冬は2月初旬である。

図5にX0通りの水平総変位を示す。合わせて1階5階の計測結果(中央X14通りを中心とする3次奇関数近似結果)も示している。時間原点は11月20日、竣工は220日目である。夏冬の1階と5階(R階)の変位差(約30mm)に経年的な大きな変化は認められず、建物全体が単に温度伸縮しているだけの様子が窺える。計測結果をみると竣工から約2年程度で概ね収束しているように見える。また、各階での夏冬の変位差は概ね15mm程度であり、この事実が(4)式における $\mu=0.5$ の想定を支持している。 μ が0.5程度と1より小さいことは、空調影響や倉庫内の貯蔵物の熱容量影響と考えられる。総じて、設定した条件で解析は計測結果を概ね説明できていることがわかる。

図6には、X0通りの水平変位の解析と計測結果の比較を示す。図5で述べた傾向がこの図でも再び確認できる。

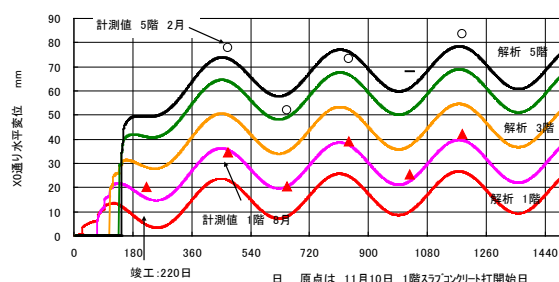


図5 X0通りの総変位の経時変化 計測・解析比較

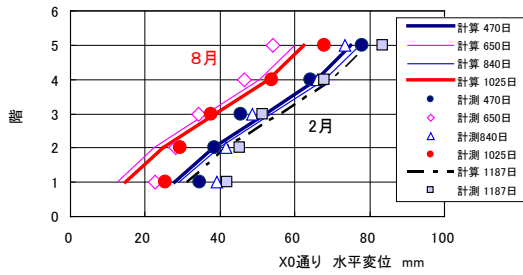


図6 X0通りの総変位分布 解析値と計測値比較

§5. まとめ

施工手順を考えた平面フレームのクリープ問題のクリープ係数法を用いた FEM 解析法を具体的に示した。問題には多くのパラメーターが含まれているが、適当なパラメーターの値設定により、計測結果を概ね説明できることがわかった。計測事例からは、部材温度変化は日平均外気温変化の約 1/2 程度、架構のクリープは着工後 2 年程度でほぼ収束すると考えられることがわかった。ここで示した方法による予測精度を上げるためには、実測結果が是非とも必要である。

参考文献

- 1) 能森雅巳:長大な免震建物の自己歪を拘束する免震装置の変形状に関するクリープ解析, 日本建築学会大会梗概集(東北), No21379, 2000.
- 2) 村田次郎・岡田清:フレッシュコンクリートのレオロジー・コンクリートの弾性とクリープ, 最新コンクリート技術選書1), 山海堂, 1981.
- 3) 岡田清・六車熙編集:コンクリート工学ハンドブック, 朝倉書店, 1991.
- 4) 中山昌尚:長大免震プレストレスト構造物のクリープ解析, 日本建築学会大会梗概集(中国), No23418, 2008.
- 5) 鷲津久一郎他:有限要素法ハンドブックⅡ, 培風館, 1988
- 6) 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, 1998.
- 7) 日本建築学会:鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針(案)・同解説, 2006.



中山 昌尚

ひとこと

未経験のクリープ現象を現象論的に扱ってみました。興味深く、楽しむことができました。現象要因を実測で明確化してゆく必要性を痛感しています。

付録

付録1 想定しているクリープ現象のモデル

時間変化する軸力を受ける 1 本柱(軸弾性剛性 EA、長さ L)を想定する。クリープ係数を(1)式で $\phi \infty=2$ 、 $\beta=42$ 、 $\alpha=1$ を想定(図 A1)し、荷重 P(t)が t=0 から図 A1 に示すようにステップ状に変化する状態を考える。一定荷重が作用した時、弾性変形が瞬時に生じ、クリープ係数増大 $\Delta \phi$ による剛性低下 $EA/(1+\Delta \phi)$ によって塑性変形が進行する。t=t1=14 において荷重がステップ状に変化する時、一旦それまでの荷重を除荷物する仮想的な過程を挿入する。弾性変形は瞬時消滅し、その時点までの塑性変形が残留する。その後、新たな一定荷重のもとで、弾性変形が瞬時に生じ、この時点からのクリープ係数増大 $\Delta \phi = \phi(t) - \phi(t1)$ に伴う塑性変形が生じる。t=t2=28 において、除荷物すると弾性変形が瞬時に消滅し、それまでの塑性変形が残留する。これを図 A2 に示す。

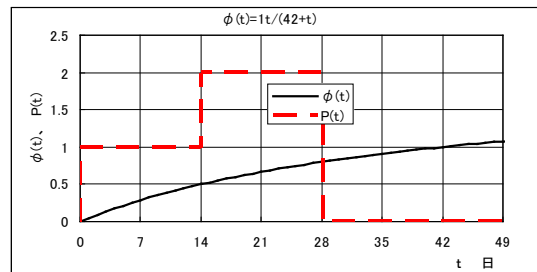


図 A1 想定するクリープ係数と荷重変化

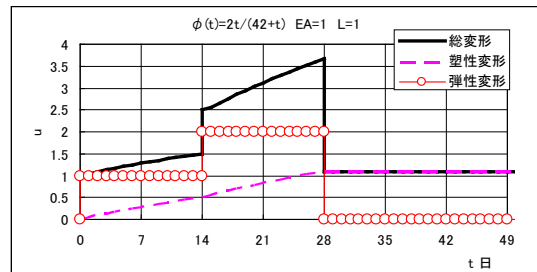


図 A2 柱頂部に生じる変位 (総、弾性、塑性変位)

付録2 ムーブメントの変位抑制効果

簡単化のために、図 A3 に示す、全長 2・L の対称な自由支持棒を考える。長さ L1 部分が一般部でムーブメント部(長さ L2)を 3 箇所設ける。1 クリープ係数特性 $\phi(t)$ は一般部、ムーブメント部共通とする。

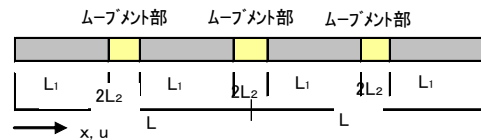


図 A3 対称な自由支持棒

ムーブメントがない場合の最外縁変位は、 ε をプレストレス力により導入される一定の弾性歪として次式。

$$u_0(t) = L \cdot \varepsilon \cdot (1 + \phi(t)) \quad (A1)$$

十分時間がたつと

$$u_0(\infty) = L \cdot \varepsilon \cdot (1 + \phi_\infty) \quad (A2)$$

ムーブメント部の施工時期が一般部に比べて t_1 日遅れる場合クリープ係数法の考え方より t_1 以降の最外縁の変位は次となる。右辺 2,3 項は区分的に軸剛性の異なる弾性柱の先端変位として簡単に求まる。

$$u_1(t) = u_{ap} + u_a' + u_b' \quad (A3)$$

右辺第 1 項は、 $t=t_1$ までの塑性変位、第 2,3 項は、時間 t_1 以降 t までの変位増分である。

$$\left. \begin{aligned} u_{ap}(t) &= \frac{L_1}{2} \varepsilon \cdot \phi(t_1) \\ u_a'(t) &= 2L_1 \varepsilon (\phi(t) - \phi(t_1)) \\ u_b'(t) &= 3L_2 (1 + \phi(t - t_1)) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

十分時間がたつと

$$u_1(\infty) = L_1 \varepsilon \left(\frac{1}{2} \phi(t_1) + 2(\phi_\infty - \phi(t_1)) + 3L_2 \varepsilon (1 + \phi_\infty) \right) \quad (A5)$$

ムーブメントの効果は、直感的には、クリープを生じる部材長さが短くなることによる。数値例を次に示す。 $L_1=60\text{m}$ $L_2=10\text{m}$ $2L=300\text{m}$ の場合を考える。クリープ係数は付録1と同じとして、 t_1 を変えた場合の最外縁変位のムーブメントありなしの比: u_1/u_0 場合の例を図 A4 に示す。 t_1 が 2 週間で、 $\phi_\infty=1$ の場合 12%程度、 $\phi_\infty=3$ の場合 20%程度最外縁変位を減少することになる。図 A5 には $\phi_\infty=2$ の場合について、十分時間が経過した後の変位分布例を示す。ムーブメントがある場合、ムーブメント部で変位勾配が小さくなっている。実際には、本報の例題のごとく、建物は複数階になり、導入された P_s 力は、柱を介して下層階の梁へ軸力として分配されることになるので事態はこれほど単純ではない。

付録 3 施工手順を考える必要性

弾性解といえども施工手順を考える必要性がある最も簡単な例を図 A6 に示す。

過程は、1)最初に剛性 K の部材(自重 0)に軸力 P が作用し、2)部材が変形した状態で剛性 ΔK を付加する。3)その後、軸力増分 ΔP を作用させる。注意すべきは、2)の過程において、既に生じている変形を変化させないまま

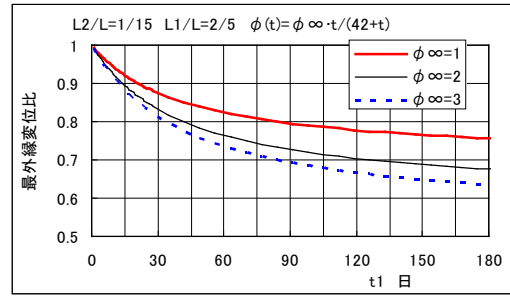


図 A4 $u_1(\infty)/u_0(\infty)$ と t_1 の関係 u_0 : Movement なし u_1 : Movement あり

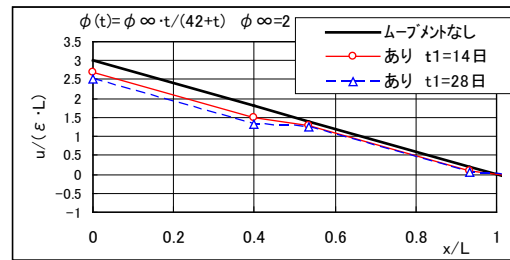


図 A5 十分時間が経過した後の際外縁変位 ムーブメントありなしの違い 図 A1 の左側部分のみ

部材剛性を増大させたと考える点である。単なる弾性解析であれば、最終剛性が $K + \Delta K$ で荷重が $P + \Delta P$ であるから、 u_1 の変位が(A6)のようになる。

一方、施工過程を考慮すると、1)で P/K の変位が生じ、次に 3)で $\Delta P/(K + \Delta K)$ の変位が生じるから、結果として u_2 の変位が生じる。 $u_2 > u_1$ であり その差は(A7)ある。

$$u_1 = \frac{P + \Delta P}{K + \Delta K} \quad (A6)$$

$$u_2 = \frac{P}{K} + \frac{\Delta P}{K + \Delta K} \quad (A7)$$

$$u_2 - u_1 = P(1/K + 1/(K + \Delta K)) \quad (A8)$$

この簡単な例から、施工過程を考慮する場合には、弾性変形の評価においても、増分荷重に対する増分変位の累積によって求めることが必要であることがわかる。

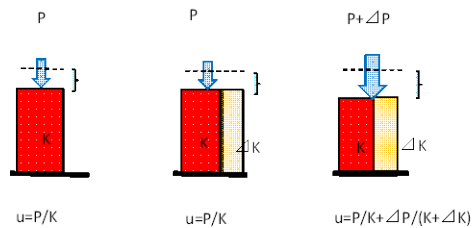


図 A6 施工手順影響を考える簡単な例題