

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2004-151015
(P2004-151015A)

(43) 公開日 平成16年5月27日(2004.5.27)

(51) Int. Cl. ⁷	F I	テーマコード (参考)
GO 1 N 33/38	GO 1 N 33/38	2 D O 5 9
EO 1 D 1/00	EO 1 D 1/00	H
GO 1 L 1/00	GO 1 L 1/00	M

審査請求 有 請求項の数 15 O L (全 27 頁)

(21) 出願番号	特願2002-318476 (P2002-318476)	(71) 出願人	503359832 J I Pテクノサイエンス株式会社 東京都江東区東陽二丁目4番24号
(22) 出願日	平成14年10月31日 (2002.10.31)	(71) 出願人	591030178 ドービー建設工業株式会社 東京都豊島区北大塚1丁目16番6号
		(74) 代理人	100084375 弁理士 板谷 康夫
		(74) 代理人	100110847 弁理士 松阪 正弘
		(72) 発明者	富田 耕司 大阪府中央区備後町1丁目5番2号 日本 構研情報株式会社内

最終頁に続く

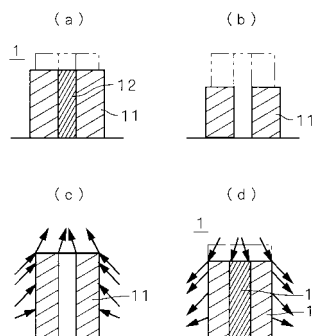
(54) 【発明の名称】 コンクリートの3次元解析方法、3次元解析装置およびプログラム

(57) 【要約】

【課題】コンクリート構造物を架設段階を考慮しつつ迅速に3次元解析する。

【解決手段】コンクリート11および鋼材12からなる構造物を弾性解析し、コンクリート11の各要素の3次元の弾性歪みベクトルにクリープ係数を乗じてクリープに対する自由歪みベクトルを求める。その後、コンクリート11に関するレストレインカベクトルを求めて構造物にレストレインカを作用させ、3次元有限要素解析を行うことによりクリープの影響による応力度変化ベクトルを求める。架設段階ごとに応力度変化ベクトルを求める際には、以前の架設段階におけるクリープの影響が考慮された自由歪みベクトルが求められる。これにより、架設段階を考慮しつつ迅速に3次元解析を行うことが実現される。

【選択図】 図2



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

コンクリートを有限要素法を用いて解析する 3 次元解析方法であって、

a) コンクリートを弾性解析して各要素の 3 次元空間における応力度ベクトルを求める工程と、

b) 前記応力度ベクトルから導かれる弾性歪みベクトルにクリープ係数を乗じたベクトルに基づいて応力度によるクリープに対する自由歪みベクトルを求める工程と、

を有することを特徴とする 3 次元解析方法。

【請求項 2】

請求項 1 に記載の 3 次元解析方法であって、

c) 前記クリープに対する自由歪みベクトルに基づいてレストレイン力を求める工程をさらに有し、

前記レストレイン力を求める工程にて使用される弾性係数マトリックス D が、コンクリートの弾性係数マトリックス D_c 、クリープ係数 ρ および所定の係数 ϕ を用いて、

【数 1】

$$D_{\phi} = \frac{D_c}{1 + \rho \cdot \phi}$$

により示されることを特徴とする 3 次元解析方法。

【請求項 3】

請求項 2 に記載の 3 次元解析方法であって、

前記 a) 工程が、コンクリートと他の弾性材料とを有する複合体に対して行われ、

d) 前記弾性係数マトリックス D を利用した前記複合体の全体剛性マトリックス、および、前記レストレイン力に基づいて、前記複合体の各要素のクリープによる応力度変化ベクトルを求める工程をさらに有することを特徴とする 3 次元解析方法。

【請求項 4】

請求項 3 に記載の 3 次元解析方法であって、

e) 前記複合体の構造を変更して前記 a) 工程に戻る工程をさらに有し、

2 回目以降の前記 b) 工程において、前記 d) 工程にて求められた前記クリープによる応力度変化ベクトルが利用されることを特徴とする 3 次元解析方法。

【請求項 5】

コンクリートと他の弾性材料とを有する複合体を有限要素法を用いて解析する 3 次元解析方法であって、

a) 時刻 t_p (ただし、 p は正の整数) における複合体を弾性解析してコンクリートの各要素の 3 次元空間における応力度ベクトル $c_{, p}$ を求める工程と、

b) 時刻 t_k (ただし、 k は正の整数) から存在する要素の時刻 t_{n+1} (ただし、 n は 1 を初期値とする正の整数) 直前のコンクリートの応力度によるクリープに対する自由歪みベクトル $f_{, n}$ を、

時刻 t_n 直後におけるコンクリートの弾性係数マトリックス $D_{c, n}$ 、載荷材齢 ($t_q - t_k$) および着目材齢 ($t_r - t_k$) (ただし、 q, r は正の整数であり、 $q < r$ である) の関数であるクリープ係数 $(t_r - t_k, t_q - t_k)$ 、時刻 t_s (ただし、 s は正の整数) と時刻 t_{s+1} との間におけるクリープによる応力度変化ベクトル $c_{, s}$ 、および、所定の係数 ϕ_1 を用いて、

【数 2】

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\phi f, n} = & D_{c, n}^{-1} \cdot \left[\sum_{j=k}^{n-1} \sigma_{c, j} \cdot (\phi(t_{n+1} - t_k, t_j - t_k) - \phi(t_n - t_k, t_j - t_k)) \right. \\ & + \sum_{j=k}^{n-1} \Delta \sigma_{c\phi, j} \cdot \rho_1 \cdot (\phi(t_{n+1} - t_k, t_j - t_k) - \phi(t_n - t_k, t_j - t_k)) \\ & \left. + \sigma_{c, n} \cdot \phi(t_{n+1} - t_{n-1}, t_n - t_{n-1}) \right] \end{aligned}$$

10

により求める工程と、

c) 前記クリープに対する自由歪みベクトル $f_{\phi, n}$ に基づいてレストレイン力を求める工程と、

d) クリープの影響を考慮した前記複合体の全体剛性マトリックス、および、前記レストレイン力に基づいて、時刻 t_n から時刻 t_{n+1} までに前記複合体の各要素のクリープによる応力度変化ベクトル $c_{\phi, n}$ を求める工程と、

e) 前記 a) ないし d) 工程を、 n をインクリメントしつつ所定回数繰り返す工程と、を有することを特徴とする 3 次元解析方法。

【請求項 6】

請求項 5 に記載の 3 次元解析方法であって、

前記 c) 工程にて使用される弾性係数マトリックス $D_{c, n}$ が、所定の係数 ρ_2 を用いて、

20

【数 3】

$$D_{\phi, n} = \frac{D_{c, n}}{1 + \rho_2 \cdot \phi(t_{n+1} - t_k, t_n - t_k)}$$

により示されることを特徴とする 3 次元解析方法。

【請求項 7】

請求項 1 ないし 6 のいずれかに記載の 3 次元解析方法であって、

前記クリープ係数として、縦歪みに関するクリープ係数とせん断歪みに関するクリープ係数とが設定されることを特徴とする 3 次元解析方法。

30

【請求項 8】

コンクリートと他の弾性材料とを有する複合体を有限要素法を用いて解析する 3 次元解析方法であって、

a) コンクリートの 3 次元空間における体積変化に対する自由歪みベクトルを求める工程と、

b) コンクリートの弾性係数マトリックス D_c 、クリープ係数 ϕ および所定の係数 ρ により、

40

【数 4】

$$D_{\phi} = \frac{D_c}{1 + \rho \cdot \phi}$$

にて求められる弾性係数マトリックス D_{ϕ} および前記体積変化に対する自由歪みベクトルに基づいてレストレイン力を求める工程と、

c) 前記弾性係数マトリックス D_{ϕ} を利用した前記複合体の全体剛性マトリックス、および、前記レストレイン力に基づいて、前記複合体の各要素のクリープによる応力度変化

50

ベクトルを求める工程と、
を有することを特徴とする 3次元解析方法。

【請求項 9】

請求項 8 に記載の 3次元解析方法であって、

d) 前記複合体の構造を変更して前記 a) 工程に戻る工程ををさらに有し、2回目以降の前記 b) 工程において、前記 c) 工程にて求められた前記クリープによる応力度変化ベクトルが利用されることを特徴とする 3次元解析方法。

【請求項 10】

請求項 8 または 9 に記載の 3次元解析方法であって、

前記体積変化が、コンクリートの乾燥収縮または温度変化による膨張もしくは収縮であることを特徴とする 3次元解析方法。 10

【請求項 11】

コンクリートと他の弾性材料とを有する複合体を有限要素法を用いて解析する 3次元解析方法であって、

a) 時刻 t_k (ただし、 k は正の整数) から存在する要素の時刻 t_n (ただし、 n は 1 を初期値とする正の整数) から時刻 t_{n+1} までのコンクリートの体積変化に対する自由歪みベクトル $\varepsilon_{f,n}$ を、

時刻 t_n 直後におけるコンクリートの弾性係数マトリックス $D_{c,n}$ 、時刻 t_p (ただし、 p は正の整数) と時刻 t_{p+1} との間におけるクリープによる応力度変化ベクトル

$c_{c,p}$ 、所定の係数 ρ_1 、載荷材齢 ($t_q - t_k$) および着目材齢 ($t_r - t_k$) (ただし、 q, r は正の整数であり、 $q < r$ である) の関数であるクリープ係数 $(t_r - t_k, t_q - t_k)$ 、および、時刻 t_n から時刻 t_{n+1} までのクリープの影響を無視した自由歪みベクトル $\varepsilon_{f,n}$ を用いて、 20

【数 5】

$$\varepsilon_{\phi f, n} = D_{c, n}^{-1} \cdot \left[\sum_{j=k}^{n-1} \Delta \sigma_{c, \phi, j} \rho_1 \cdot (\phi(t_{n+1} - t_k, t_j - t_k) - \phi(t_n - t_k, t_j - t_k)) \right] + \varepsilon_{f, n}$$

30

により求める工程と、

b) 前記体積変化に対する自由歪みベクトル $\varepsilon_{f,n}$ に基づいてレストレイン力を求める工程と、

c) クリープの影響を考慮した前記複合体の全体剛性マトリックス、および、前記レストレイン力に基づいて、時刻 t_n から時刻 t_{n+1} までに前記複合体の各要素のクリープによる応力度変化ベクトル $c_{c,n}$ を求める工程と、

d) 前記 a) ないし c) 工程を、 n をインクリメントしつつ所定回数繰り返す工程と、
を有することを特徴とする 3次元解析方法。

【請求項 12】

請求項 11 に記載の 3次元解析方法であって、

前記 c) 工程にて使用される弾性係数マトリックス $D_{\phi, n}$ が、所定の係数 ρ_2 を用いて、 40

【数 6】

$$D_{\phi, n} = \frac{D_{c, n}}{1 + \rho_2 \cdot \phi(t_{n+1} - t_k, t_n - t_k)}$$

により示されることを特徴とする 3次元解析方法。

【請求項 13】

50

コンピュータにコンクリートと他の弾性材料とを有する複合体を有限要素法を用いて解析させるプログラムであって、前記プログラムのコンピュータによる実行は、前記コンピュータに、

- a) コンクリートを弾性解析して各要素の3次元空間における応力度ベクトルを求める工程と、
- b) 前記応力度ベクトルから導かれる弾性歪みベクトルにクリープ係数を乗じたベクトルに基づいて応力度によるクリープに対する自由歪みベクトルを求める工程と、
- c) コンクリートの弾性係数マトリクス D_c 、クリープ係数 および所定の係数 により、

【数7】

$$D_{\phi} = \frac{D_c}{1 + \rho \cdot \phi}$$

にて示される弾性係数マトリクス D および前記クリープに対する自由歪みベクトルに基づいてレストレイン力を求める工程と、

- d) 前記弾性係数マトリクス D を利用した前記複合体の全体剛性マトリクス、および、前記レストレイン力に基づいて、前記複合体の各要素のクリープによる応力度変化ベクトルを求める工程と、
- を実行させることを特徴とするプログラム。

【請求項14】

コンピュータにコンクリートと他の弾性材料とを有する複合体を有限要素法を用いて解析させるプログラムであって、前記プログラムのコンピュータによる実行は、前記コンピュータに、

- a) コンクリートの3次元空間における体積変化に対する自由歪みベクトルを求める工程と、
- b) コンクリートの弾性係数マトリクス D_c 、クリープ係数 および所定の係数 により、

【数8】

$$D_{\phi} = \frac{D_c}{1 + \rho \cdot \phi}$$

にて求められる弾性係数マトリクス D および前記体積変化に対する自由歪みベクトルに基づいてレストレイン力を求める工程と、

- c) 前記弾性係数マトリクス D を利用した前記複合体の全体剛性マトリクス、および、前記レストレイン力に基づいて、前記複合体の各要素のクリープによる応力度変化ベクトルを求める工程と、
- を実行させることを特徴とするプログラム。

【請求項15】

コンクリートと他の弾性材料とを有する複合体を有限要素法を用いて解析する3次元解析装置であって、

請求項13または14に記載のプログラムを記憶する記憶部と、

前記プログラムを実行し、実行結果からコンクリートの各要素に生じる応力度ベクトルを求める演算部と、

を備えることを特徴とする3次元解析装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

10

20

30

40

50

【発明の属する技術分野】

本発明はコンクリートを有限要素法を用いて解析する技術に関する。

【0002】

【従来の技術】

コンクリート構造物、例えば、コンクリート床版と鋼桁からなる連続合成桁橋において、コンクリートの乾燥収縮やクリープ（自重，プレストレスおよびセメントの水和熱による残留応力等に起因するクリープ）による収縮歪みを床版の鉄筋および鋼桁が拘束することにより、床版にひび割れが生じることがある。

【0003】

そのため、床版に有害なひび割れが懸念される場合には、施工上、床版のコンクリートに膨張剤を使用したりするとともに、施工に先だってコンクリートの乾燥収縮やクリープに関する応力度解析を行い、応力度並びにそれに伴うひび割れ発生予測を施工段階ごとに把握する必要がある。

【0004】

乾燥収縮やクリープの解析を行うにあたり、従来は、ビーム要素モデルの微分方程式を応用した手法（非特許文献1参照）や汎用FEM解析ソフトで採用されている粘性非線形解析法（クリープ速度法とも呼ばれる。）による手法が採用されている。

【0005】

【非特許文献1】

富田 耕司、外1名、“若材令での遅れ弾性成分を考慮したコンクリート斜張橋のクリープ解析”、構造工学論文集、土木学会、1993年3月、Vol.39A、p.1197-1210

【0006】

【発明が解決しようとする課題】

ところで、コンクリート構造物、特に連続合成桁において鋼桁設置完了後に打設施工されるコンクリート床版の長期的なひびわれ要因をできるだけ正確に予測するには、コンクリートの自重やプレストレス等に起因する応力度によるクリープ歪み、コンクリートの乾燥収縮歪み、膨張剤の使用の有無、年間を通しての気温の変化による影響、構造系変化を考慮した解析（すなわち、架設段階を追った解析）等を適切にモデル化することが必要となる。さらに、局部的なひびわれ現象を把握するため立体的な連続体要素としてモデル化することにも必要となっている。

【0007】

ところが、従来用いられてきた微分方程式に基づく実用式は主として建築物のビーム要素に対するもの（すなわち、1軸の応力歪み関係式）であり、そのままでは一般的なコンクリート構造物の局部的な評価に応用することができない。

【0008】

一方、粘性非線形解析法を用いる汎用ソフトでは連続体要素での解析が可能であるが、構造系変化や載荷材齢が異なる複数のクリープ係数が取り扱えず、また、時刻歴に応じて変化するコンクリートの弾性係数や種々の要因による膨張歪みなどを適切に評価することができない。さらに、粘性非線形解析法では膨大な繰返し演算を行う必要があり、演算結果を得るまでに時間を要することとなる。

【0009】

本発明は、上記課題に鑑みなされたものであり、コンクリート構造物を3次元的に解析して適切な評価結果を得ることを第1の目的とし、架設段階も考慮した解析を迅速に行うことを第2の目的としている。

【0010】

【課題を解決するための手段】

請求項1に記載の発明は、コンクリートを有限要素法を用いて解析する3次元解析方法であって、a) コンクリートを弾性解析して各要素の3次元空間における応力度ベクトルを求める工程と、b) 前記応力度ベクトルから導かれる弾性歪みベクトルにクリープ係

数を乗じたベクトルに基づいて応力度によるクリープに対する自由歪みベクトルを求める工程とを有する。

【0011】

請求項2に記載の発明は、請求項1に記載の3次元解析方法であって、c) 前記クリープに対する自由歪みベクトルに基づいてレストレイン力を求める工程をさらに有し、前記レストレイン力を求める工程にて使用される弾性係数マトリックスD が、コンクリートの弾性係数マトリックスD_c、クリープ係数 および所定の係数 を用いて、

【0012】

【数9】

$$D_{\phi} = \frac{D_c}{1 + \rho \cdot \phi}$$

10

【0013】

により示される。

【0014】

請求項3に記載の発明は、請求項2に記載の3次元解析方法であって、前記a)工程が、コンクリートと他の弾性材料とを有する複合体に対して行われ、d)前記弾性係数マトリックスD を利用した前記複合体の全体剛性マトリックス、および、前記レストレイン力に基づいて、前記複合体の各要素のクリープによる応力度変化ベクトルを求める工程をさらに有する。

20

【0015】

請求項4に記載の発明は、請求項3に記載の3次元解析方法であって、e) 前記複合体の構造を変更して前記a)工程に戻る工程をさらに有し、2回目以降の前記b)工程において、前記d)工程にて求められた前記クリープによる応力度変化ベクトルが利用される。

【0016】

請求項5に記載の発明は、コンクリートと他の弾性材料とを有する複合体を有限要素法を用いて解析する3次元解析方法であって、a) 時刻t_p (ただし、pは正の整数)における複合体を弾性解析してコンクリートの各要素の3次元空間における応力度ベクトルc_{c,p}を求める工程と、b) 時刻t_k (ただし、kは正の整数)から存在する要素の時刻t_{n+1} (ただし、nは1を初期値とする正の整数)直前のコンクリートの応力度によるクリープに対する自由歪みベクトルφ_{f,n}を、時刻t_n直後におけるコンクリートの弾性係数マトリックスD_{c,n}、載荷材齢(t_q - t_k)および着目材齢(t_r - t_k) (ただし、q, rは正の整数であり、q < rである)の関数であるクリープ係数φ(t_r - t_k, t_q - t_k)、時刻t_s (ただし、sは正の整数)と時刻t_{s+1}との間におけるクリープによる応力度変化ベクトルc_{c,s}、および、所定の係数ρ₁を用いて、

30

【0017】

【数10】

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\phi f, n} = & D_{c, n}^{-1} \cdot \left[\sum_{j=k}^{n-1} \sigma_{c, j} \cdot (\phi(t_{n+1} - t_k, t_j - t_k) - \phi(t_n - t_k, t_j - t_k)) \right. \\ & + \sum_{j=k}^{n-1} \Delta \sigma_{c \phi, j} \cdot \rho_1 \cdot (\phi(t_{n+1} - t_k, t_j - t_k) - \phi(t_n - t_k, t_j - t_k)) \\ & \left. + \sigma_{c, n} \cdot \phi(t_{n+1} - t_{n-1}, t_n - t_{n-1}) \right] \end{aligned}$$

40

50

【0018】

により求める工程と、c) 前記クリープに対する自由歪みベクトル $f_{,n}$ に基づいてレストレイン力を求める工程と、d) クリープの影響を考慮した前記複合体の全体剛性マトリックス、および、前記レストレイン力に基づいて、時刻 t_n から時刻 t_{n+1} までに前記複合体の各要素のクリープによる応力度変化ベクトル $c_{,n}$ を求める工程と、e) 前記 a) ないし d) 工程を、 n をインクリメントしつつ所定回数繰り返す工程とを有する。

【0019】

請求項 6 に記載の発明は、請求項 5 に記載の 3 次元解析方法であって、前記 c) 工程にて使用される弾性係数マトリックス $D_{,n}$ が、所定の係数 ρ_2 を用いて、

10

【0020】

【数 1 1】

$$D_{\phi,n} = \frac{D_{c,n}}{1 + \rho_2 \cdot \phi(t_{n+1} - t_k, t_n - t_k)}$$

【0021】

により示される。

【0022】

請求項 7 に記載の発明は、請求項 1 ないし 6 のいずれかに記載の 3 次元解析方法であって、前記クリープ係数として、縦歪みに関するクリープ係数とせん断歪みに関するクリープ係数とが設定される。

20

【0023】

請求項 8 に記載の発明は、コンクリートと他の弾性材料とを有する複合体を有限要素法を用いて解析する 3 次元解析方法であって、a) コンクリートの 3 次元空間における体積変化に対する自由歪みベクトルを求める工程と、b) コンクリートの弾性係数マトリックス D_c 、クリープ係数 および所定の係数 により、

【0024】

【数 1 2】

$$D_{\phi} = \frac{D_c}{1 + \rho \cdot \phi}$$

30

【0025】

にて求められる弾性係数マトリックス D および前記体積変化に対する自由歪みベクトルに基づいてレストレイン力を求める工程と、c) 前記弾性係数マトリックス D を利用した前記複合体の全体剛性マトリックス、および、前記レストレイン力に基づいて、前記複合体の各要素のクリープによる応力度変化ベクトルを求める工程とを有する。

40

【0026】

請求項 9 に記載の発明は、請求項 8 に記載の 3 次元解析方法であって、d) 前記複合体の構造を変更して前記 a) 工程に戻る工程ををさらに有し、2 回目以降の前記 b) 工程において、前記 c) 工程にて求められた前記クリープによる応力度変化ベクトルが利用される。

【0027】

請求項 10 に記載の発明は、請求項 8 または 9 に記載の 3 次元解析方法であって、前記体積変化が、コンクリートの乾燥収縮または温度変化による膨張もしくは収縮である。

【0028】

請求項 11 に記載の発明は、コンクリートと他の弾性材料とを有する複合体を有限要素法

50

を用いて解析する 3 次元解析方法であって、a) 時刻 t_k (ただし、 k は正の整数) から存在する要素の時刻 t_n (ただし、 n は 1 を初期値とする正の整数) から時刻 t_{n+1} までのコンクリートの体積変化に対する自由歪みベクトル $\varepsilon_{f,n}$ を、時刻 t_n 直後におけるコンクリートの弾性係数マトリックス $D_{c,n}$ 、時刻 t_p (ただし、 p は正の整数) と時刻 t_{p+1} との間におけるクリープによる応力度変化ベクトル $\varepsilon_{c,p}$ 、所定の係数 ρ_1 、載荷材齢 ($t_q - t_k$) および着目材齢 ($t_r - t_k$) (ただし、 q, r は正の整数であり、 $q < r$ である) の関数であるクリープ係数 $\phi(t_r - t_k, t_q - t_k)$ 、および、時刻 t_n から時刻 t_{n+1} までのクリープの影響を無視した自由歪みベクトル $\varepsilon_{f,n}$ を用いて、

【0029】

【数13】

$$\varepsilon_{\phi f,n} = D_{c,n}^{-1} \cdot \left[\sum_{j=k}^{n-1} \Delta \sigma_{c,\phi,j} \rho_1 \cdot (\phi(t_{n+1} - t_k, t_j - t_k) - \phi(t_n - t_k, t_j - t_k)) \right] + \varepsilon_{f,n}$$

10

【0030】

により求める工程と、b) 前記体積変化に対する自由歪みベクトル $\varepsilon_{f,n}$ に基づいてレストレイン力を求める工程と、c) クリープの影響を考慮した前記複合体の全体剛性マトリックス、および、前記レストレイン力に基づいて、時刻 t_n から時刻 t_{n+1} までに前記複合体の各要素のクリープによる応力度変化ベクトル $\varepsilon_{c,n}$ を求める工程と、d) 前記 a) ないし c) 工程を、 n をインクリメントしつつ所定回数繰り返す工程とを有する。

20

【0031】

請求項 1 2 に記載の発明は、請求項 1 1 に記載の 3 次元解析方法であって、前記 c) 工程にて使用される弾性係数マトリックス $D_{c,n}$ が、所定の係数 ρ_2 を用いて、

【0032】

【数14】

$$D_{\phi,n} = \frac{D_{c,n}}{1 + \rho_2 \cdot \phi(t_{n+1} - t_k, t_n - t_k)}$$

30

【0033】

により示される。

【0034】

請求項 1 3 に記載の発明は、コンピュータにコンクリートと他の弾性材料とを有する複合体を有限要素法を用いて解析させるプログラムであって、前記プログラムのコンピュータによる実行は、前記コンピュータに、a) コンクリートを弾性解析して各要素の 3 次元空間における応力度ベクトルを求める工程と、b) 前記応力度ベクトルから導かれる弾性歪みベクトルにクリープ係数を乗じたベクトルに基づいて応力度によるクリープに対する自由歪みベクトルを求める工程と、c) コンクリートの弾性係数マトリックス D_c 、クリープ係数 および所定の係数 により、

40

【0035】

【数15】

$$D_{\phi} = \frac{D_c}{1 + \rho \cdot \phi}$$

【 0 0 3 6 】

にて示される弾性係数マトリックスD および前記クリープに対する自由歪みベクトルに基づいてレストレイン力を求める工程と、d) 前記弾性係数マトリックスD を利用した前記複合体の全体剛性マトリックス、および、前記レストレイン力に基づいて、前記複合体の各要素のクリープによる応力度変化ベクトルを求める工程とを実行させる。

10

【 0 0 3 7 】

請求項14に記載の発明は、コンピュータにコンクリートと他の弾性材料とを有する複合体を有限要素法を用いて解析させるプログラムであって、前記プログラムのコンピュータによる実行は、前記コンピュータに、a) コンクリートの3次元空間における体積変化に対する自由歪みベクトルを求める工程と、b) コンクリートの弾性係数マトリクスD_c、クリープ係数 および所定の係数 により、

【 0 0 3 8 】

【 数 1 6 】

$$D_{\phi} = \frac{D_c}{1 + \rho \cdot \phi}$$

20

【 0 0 3 9 】

にて求められる弾性係数マトリックスD および前記体積変化に対する自由歪みベクトルに基づいてレストレイン力を求める工程と、c) 前記弾性係数マトリックスD を利用した前記複合体の全体剛性マトリックス、および、前記レストレイン力に基づいて、前記複合体の各要素のクリープによる応力度変化ベクトルを求める工程とを実行させる。

【 0 0 4 0 】

請求項15に記載の発明は、コンクリートと他の弾性材料とを有する複合体を有限要素法を用いて解析する3次元解析装置であって、請求項13または14に記載のプログラムを記憶する記憶部と、前記プログラムを実行し、実行結果からコンクリートの各要素に生じる応力度ベクトルを求める演算部とを備える。

30

【 0 0 4 1 】

【 発明の実施の形態 】

< 1 . 解析手法の原理 >

< 1 . 1 クリープ換算弾性係数 >

まず、コンクリートと鋼材等の他の弾性体とを有する構造物に対し3次元有限要素解析を行う場合に用いられる、コンクリートのクリープの影響を考慮した弾性係数について説明する。

40

【 0 0 4 2 】

図1は、材齢 t_0 （以下、「載荷材齢」という。）にてコンクリートに荷重（初期応力度 σ_0 ）が与えられた場合の材齢 t と応力度 $\sigma(t)$ との関係を示すグラフである。ここで、材齢 t における応力度の微小変化 $(\sigma(t) - \sigma(t_0)) / \sigma(t_0) \cdot d$ に着目すると、コンクリートの歪み $\epsilon(t)$ は一般的に数1.7として示される。

【 0 0 4 3 】

【 数 1 7 】

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_c} \cdot (1 + \phi(t, t_0)) + \int_{t_0}^t \frac{\partial \sigma(\tau)}{\partial \tau} \cdot \frac{1}{E_c} \cdot (1 + \phi(t, \tau)) d\tau + \varepsilon_s(t)$$

【0044】

数17において、 E_c はコンクリートの弾性係数、 (t, t_0) は載荷材齢 t_0 および着目材齢 t との関数であるクリープ係数、 $\varepsilon_s(t)$ はコンクリートの乾燥収縮歪みである。

10

【0045】

ここで、数17を直接解析に用いることが困難であることから、遅れ弾性成分を考慮することができる Trost - Bazant 法としてリラクセーション係数（材齢係数とも呼ばれる。） $\rho(t, t_0)$ を導入した数18が提案されている。

【0046】

【数18】

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_c} \cdot (1 + \phi(t, t_0)) + \frac{\sigma(t) - \sigma(t_0)}{E_c} \cdot (1 + \rho(t, t_0) \cdot \phi(t, t_0)) + \varepsilon_s(t)$$

20

【0047】

なお、リラクセーション係数 $\rho(t, t_0)$ は、数19として示されるが、本実施の形態では、予め設定された値または簡易な関数とされる。

【0048】

【数19】

$$\rho(t, t_0) = \int_{t_0}^t \frac{\frac{\partial \sigma(\tau)}{\partial \tau} \cdot \phi(t, t_0) d\tau}{[\sigma(t) - \sigma_0] \cdot \phi(t, t_0)} < 1$$

30

【0049】

数18において、右辺の第1項および第3項はクリープの影響を無視した場合の初期応力度および乾燥収縮による自由歪みに相当し、第2項はクリープによる応力度変化に起因する歪みに相当する。

【0050】

ここで、本実施の形態では数18を連続体の3次元有限要素解析に応用するために数20へと発展させる。

40

【0051】

【数20】

$$\{\varepsilon\}(t) = \frac{\{\sigma_0\}}{[D_c]} \cdot (1 + \phi(t, t_0)) + \frac{\{\sigma\}(t) - \{\sigma\}(t_0)}{[D_c]} \cdot (1 + \rho(t, t_0) \cdot \phi(t, t_0)) + \{\varepsilon_s\}(t)$$

【0052】

50

数 2 0 において、 $\{\ \ \ \ \} (t)$ 、 $\{\ \ \ \ \}_0$ 、 $\{\ \ \ \ \} (t)$ 、 $\{\ \ \ \ \}_s (t)$ は、それぞれ、数 1 8 における $\ \ \ \ (t)$ 、 $\ \ \ _0$ 、 $\ \ \ \ (t)$ 、 $\ \ \ _s (t)$ を 3 次元に拡張したベクトルであり、具体的には、 $\ \ \ \ (t)$ 、 $\ \ \ \ (t)$ 、 $\ \ \ _s (t)$ は数 2 1 にて示される。

【 0 0 5 3 】

【 数 2 1 】

$$\varepsilon(t) = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix}_{(t)}, \quad \sigma(t) = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}_{(t)}, \quad \varepsilon_s(t) = \begin{Bmatrix} \varepsilon_{s,x} \\ \varepsilon_{s,y} \\ \varepsilon_{s,z} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}_{(t)}$$

10

【 0 0 5 4 】

また、 $[D_c]$ は弾性係数マトリックスであり、数 2 2 により示される。ただし、表現を簡略化しているが、弾性係数マトリックスも時間に依存する関数である。

【 0 0 5 5 】

【 数 2 2 】

$$[D_c] = \begin{bmatrix} D_1 & D_2 & D_2 & & & \\ D_2 & D_1 & D_2 & & & 0 \\ D_2 & D_2 & D_1 & & & \\ \hline & & & D_3 & 0 & 0 \\ & 0 & & 0 & D_3 & 0 \\ & & & 0 & 0 & D_3 \end{bmatrix}$$

30

【 0 0 5 6 】

数 2 2 における D_1 、 D_2 、 D_3 は、コンクリートのポアソン比 ν_c を用いて数 2 3 にて示される。

【 0 0 5 7 】

【 数 2 3 】

$$D_1 = \frac{E_c}{(1+\nu_c)(1-2\nu_c)}, \quad D_2 = \frac{\nu_c E_c}{(1+\nu_c)(1-2\nu_c)}, \quad D_3 = \frac{E_c}{2(1+\nu_c)}$$

40

【 0 0 5 8 】

ここで、本実施の形態では、コンクリートのクリープの影響を考慮したクリープ換算弾性係数マトリックスとして、数 2 4 に示す $[D]$ が採用される。

【 0 0 5 9 】

【 数 2 4 】

$$[D_\phi] = \frac{[D_c]}{1 + \rho(t, t_0) \cdot \phi(t, t_0)}$$

【 0 0 6 0 】

すなわち、クリープの影響を考慮した解析を行うために、3次元有限要素解析における要素剛性マトリックス [K] として、数 2 5 に示すものが用いられる。

【 0 0 6 1 】

【 数 2 5 】

10

$$[K_\phi] = \iiint [B]^T [D_\phi] [B] dx dy dz$$

【 0 0 6 2 】

数 2 5 において、[B] は変位 - 歪み変換マトリックスである。

【 0 0 6 3 】

数 2 4 から判るように、本実施の形態では、クリープの影響を考慮する際に、縦弾性係数とせん断係数とに同様の係数を乗じている。なお、クリープの影響をより柔軟に反映するために弾性係数マトリックス [D_c] に乗じられる係数内のクリープ係数は、縦歪みに
20

関するクリープ係数とせん断歪みに関するクリープ係数として個別に設定されてもよい。

【 0 0 6 4 】

< 1 . 2 解析の基本手法 >

図 2 (a) ないし (d) は、本実施の形態における解析の基本手法を説明するための図である。解析に際して、コンクリートの応力度によるクリープに対する自由変形量は、弾性
変形量 (縦弾性変形およびせん断変形) にクリープ係数を乗じた値になると仮定される。

【 0 0 6 5 】

まず、図 2 (a) に示すように、コンクリート 1 1 と鋼材 1 2 の複合体 1 を弾性体とみなし、初期応力 (外力、自重、プレストレスおよびセメントの水和熱による残留応力等による初期の
応力) を用いて複合体 1 を弾性解析し、複合体 1 の変形量が求められる。すなわち、全要素に関する力ベクトル { F_a }、弾性体とみなしたときの全体剛性マトリックス
30 [K_{ae}]、全要素に関する変形量ベクトル { U_{ae} } を用いて数 2 6 に示す方程式を作成して解くことにより、変形量ベクトル { U_{ae} } が求められる。

【 0 0 6 6 】

【 数 2 6 】

$$\{F_a\} = [K_{ac}]\{U_{ae}\}$$

【 0 0 6 7 】

次に、数 2 7 に示すように変形量ベクトル { U_{ae} } のうちコンクリートに関する部分 { U_{cae} } にクリープ係数を乗じてコンクリートに関する初期応力によるクリープに対する自由変形量 { U_{caf} } が求められる。図 2 (b) はクリープによるコンクリート 1
40

【 0 0 6 8 】

【 数 2 7 】

$$\{U_{caf}\} = \{U_{cae}\} \cdot \phi$$

50

【 0 0 6 9 】

その後、図 2 (c) 中に矢印にて示すように、クリープに対する自由変形量を相殺するレストレイン力 $\{ F_{c a r} \}$ が、クリープ換算弾性係数マトリックスを用いて生成されたコンクリートの全体剛性マトリックス $[K_{c a}]$ を用いて数 2 8 により求められる。

【 0 0 7 0 】

【 数 2 8 】

$$\{ F_{c a r} \} = - [K_{c a \phi}] \{ U_{c a f} \}$$

10

【 0 0 7 1 】

なお、数 2 7 および数 2 8 は演算処理全体の概念を示す式にすぎず、実際にはコンクリートの要素ごとに演算が行われる。

【 0 0 7 2 】

最後に、図 2 (d) に示すように、複合体 1 にレストレイン力を逆向きに作用させた場合の変位ベクトル $\{ U_{a \phi} \}$ および力の変化ベクトル $\{ F_{a \phi} \}$ を、クリープを考慮したコンクリートの要素剛性マトリックスおよび鋼材の要素剛性マトリックスを合成した全体剛性マトリックス $[K_{a \phi}]$ を用いて変位および力の拘束条件を適用しつつ数 2 9 を解くことにより求める。

【 0 0 7 3 】

【 数 2 9 】

$$\{ F_{a \phi} \} = [K_{a \phi}] \{ U_{a \phi} \} + \{ F_{c a r} \}$$

20

【 0 0 7 4 】

以上の処理により、クリープによるコンクリートの断面力の変化が $(\{ F_{c a} \} + \{ F_{c a r} \})$ (ただし、 $\{ F_{c a} \}$ は $\{ F_{a \phi} \}$ のコンクリートに関する部分) として求められる、鋼材の断面力の変化が $\{ F_{s a} \}$ (ただし、 $\{ F_{s a} \}$ は $\{ F_{a \phi} \}$ の鋼材に関する部分) として取得される。なお、後述するように実際の演算では変形量に代えて歪みが用いられ、力に代えて応力が用いられる。

30

【 0 0 7 5 】

本実施の形態では、後述するように図 2 (a) ないし (d) に示す解析の基本手法を、コンクリート構造物の架設段階ごとに適用することにより、膨大な繰り返し演算を行うことなく架設段階を考慮した迅速な 3 次元解析を実現している。

【 0 0 7 6 】

< 2 . 解析装置による解析 >

図 3 はコンクリート構造物の 3 次元解析を行う 3 次元解析装置 2 の構成を示すブロック図である。3 次元解析装置 2 は、各種演算処理を行う CPU 2 0 1、基本プログラムを記憶する ROM 2 0 2 および各種情報を記憶する RAM 2 0 3 をバスラインに接続した一般的なコンピュータシステムの構成となっている。

40

【 0 0 7 7 】

バスラインにはさらに、情報記憶を行う固定ディスク 2 0 4、各種情報の表示を行うディスプレイ 2 0 5、操作者からの入力を受け付けるキーボード 2 0 6 a およびマウス 2 0 6 b、並びに、光ディスク、磁気ディスク、光磁気ディスク等のコンピュータ読み取り可能な記録媒体 9 1 から情報の読み取りを行う読取装置 2 0 7 が、適宜、インターフェイス (I / F) を介する等して接続される。

【 0 0 7 8 】

コンピュータである 3 次元解析装置 2 には、事前に読取装置 2 0 7 を介して記録媒体 9 1

50

からプログラムが読み出され、固定ディスク204に記憶される。そして、プログラム241がRAM203にコピーされるとともにCPU201がRAM203内のプログラム241に従って演算処理を実行することにより（すなわち、コンピュータがプログラムを実行することにより）、3次元解析装置2がコンクリート構造物を有限要素解析法により3次的に解析する。そして、実行結果からコンクリートの各要素に生じる応力度ベクトルが求められる。なお、3次元解析装置2は専用の装置として構築されてもよい。

【0079】

図4は、解析対象となる構造物を説明するための図である。時刻 t_1, t_2, \dots, t_{n+1} は、コンクリート構造物の構造が変化する時刻を示しており、各時刻の間が1つの架設段階に相当する。図4では構造物の一例として、時間軸の上方に連続合成桁橋の架設状態を示しているが、3次元解析装置2による解析は、コンクリートと他の弾性体とを有する複合体であれば、任意のコンクリート構造物に適用することができる。以下の説明では、時刻 t_n と時刻 t_{n+1} との間の架設段階をステージ n と呼ぶ。

10

【0080】

図5および図6は、CPU201がプログラム241に従って演算処理を行うことにより実現される3次元解析装置2の動作の流れを示す図である。3次元解析装置2では、各ステージの初期応力度（持続応力度とも呼ばれる。）に対するクリープ解析、乾燥収縮に対するクリープ解析、および、気温の季節変動による温度変化（以下、「温度荷重」という。）に対するクリープ解析が可能とされている。また、初期応力度に対するクリープ解析と温度荷重に対するクリープ解析とは複合的にすることも可能とされている。なお、後述するようにこれらのクリープ解析は全てが複合的に行われてもよい。

20

【0081】

以下、初期応力度に対するクリープ解析について説明を行い、その後、他のクリープ解析について説明する。また、以下の説明では、記号のみを用いてベクトルおよびマトリックスを表記する。

【0082】

初期応力度に対するクリープ解析に際して、まず、着目ステージを示す変数 n が1に初期化される（ステップS11）。そして、ステージ1におけるコンクリートの各要素の弾性係数マトリックス $D_{c,1}$ を求め（ステップS12）、弾性係数マトリックス $D_{c,1}$ を用いてコンクリートおよび鋼材の複合体に対して3次元空間における弾性解析が行われる（ステップS13, S14、図2(a)参照）。これにより、時刻 t_1 におけるコンクリートの各要素に生じる応力度ベクトル $c_{,1}$ が求められる。なお、実際の演算では、各要素の重心における応力度ベクトルがその要素の応力度ベクトルとして採用される。

30

【0083】

図7に示すように、クリープ係数は、載荷材齢および着目材齢の関数として準備されている。例えば、載荷材齢 $t_{c,1}$ 、着目材齢 $t_{c,2}$ に関するクリープ係数は $(t_{c,2}, t_{c,1})$ として求められる。ステージ1の時刻 t_2 直前のクリープ係数は $(t_2 - t_1, 0)$ となることから、数30に示す演算によりコンクリートのクリープ換算弾性係数マトリックス $D_{\phi,1}$ が準備される（ステップS15）。ただし、係数は、数19に示す演算により求められてもよいが、実際の演算では簡略化のために定数（例えば、0.7~0.8の定数）またはクリープ係数を変数とする関数が用いられる。また、数30では載荷材齢を0としているが、実際には所定の養生期間（例えば、3日）を待ってコンクリートが硬化してから載荷が行われることから、正確には、載荷材齢は0ではない。

40

【0084】

【数30】

$$D_{\phi,1} = \frac{D_{c,1}}{1 + \rho \cdot \phi(t_2 - t_1, 0)}$$

【0085】

50

次に、弾性歪みにクリープ係数を乗じて初期応力度によるクリープに対する自由歪みベクトル $f_{\phi,1}$ が求められる（図 2（b）に示す処理に相当）（ステップ S 1 6，S 1 7）。ただし、実際の演算では、数 3 1 に示すように、応力度ベクトル $c_{,1}$ に弾性係数マトリックス $D_{c,1}$ の逆マトリックスを乗算して歪みベクトルが求められた上で自由歪みベクトルが導かれる。すなわち、ステップ S 1 4 において応力度ベクトルを求め、ステップ S 1 7 において応力度ベクトルから自由歪みベクトルを求める演算は、弾性解析により歪みベクトルを求めてクリープに対する自由歪みベクトルを求める演算と等価である。

【 0 0 8 6 】

【 数 3 1 】

$$\varepsilon_{\phi,1} = D_{c,1}^{-1} \cdot \sigma_{c,1} \cdot \phi(t_2 - t_1, 0)$$

10

【 0 0 8 7 】

初期応力度に対するクリープ解析のみの場合は、次にステップ S 2 5 へと移行し、数 3 2 および数 3 3 に示す演算により、各コンクリート要素のステージ 1 におけるレストレイン応力度ベクトル $r_{,1}$ およびレストレイン力ベクトル $f_{r,1}$ が求められる（図 2（c）に相当）。すなわち、図 8 に例示する要素 3 1 が要素 3 2 へと自由歪みにより変形した場合に矢印にて示すように変形を拘束するレストレイン力が求められる。なお、数 3 3 において $K_{\phi,1}$ は、クリープ換算弾性係数マトリックス $D_{\phi,1}$ から導かれる要素剛性マトリックスである（数 2 5 参照）。

20

【 0 0 8 8 】

【 数 3 2 】

$$\sigma_{r,1} = -D_{\phi,1} \cdot \varepsilon_{\phi,1}$$

【 0 0 8 9 】

【 数 3 3 】

$$f_{r,1} = -K_{\phi,1} \cdot B^{-1} \cdot \varepsilon_{\phi,1}$$

30

【 0 0 9 0 】

そして、レストレイン力ベクトル $f_{r,1}$ 、クリープを考慮したコンクリートの要素剛性マトリックス $K_{\phi,1}$ 、鋼材の要素剛性マトリックス、並びに、変位および力に関する各種拘束条件を用いて、数 2 9 に示される全要素に関する方程式を解くことにより、レストレイン力による各要素における変位ベクトル $d_{,1}$ および 2 次応力度ベクトル $s_{,1}$ が求められる（ステップ S 2 6）。なお、正確にはクリープ換算弾性係数マトリックス $D_{\phi,1}$ および変位ベクトル $d_{,1}$ を用いて要素の重心における応力度ベクトル $c_{,1}$ が求められる。

40

【 0 0 9 1 】

レストレイン力による応力度ベクトル $c_{,1}$ が求められると、ステージ 1 におけるクリープによるコンクリートの各要素の応力度変化ベクトル $c_{,1}$ が数 3 4 により求められ、鋼材の各要素の応力度変化ベクトル $s_{,1}$ は数 3 5 に示すように応力度ベクトル $c_{,1}$ と等しいものとして求められる（ステップ S 2 7）。

【 0 0 9 2 】

【 数 3 4 】

$$\Delta\sigma_{c\phi,1} = \sigma_{\phi,1} + \sigma_{r,1}$$

【 0 0 9 3 】

【 数 3 5 】

$$\Delta\sigma_{s\phi,1} = \sigma_{\phi,1}$$

10

【 0 0 9 4 】

ステージ 1 に対する演算が終了すると、次に、変数 n がインクリメントされ、時刻 t_2 から時刻 t_3 間のステージ 2 に対する演算が行われる (ステップ S 2 8 , S 2 9)。

【 0 0 9 5 】

ステージ 2 における演算においても、まず、コンクリートの各要素の弾性係数マトリックス $D_{c,2}$ が求められる。このとき、時刻 t_1 から存在する要素と時刻 t_2 から存在する要素 (すなわち、時刻 t_2 にて架設された構成に係る要素) とは、材齢が異なるため、同一種類のコンクリートであっても異なる弾性係数マトリックスが設定される (ステップ S 1 2)。

【 0 0 9 6 】

その後、ステージ 1 の場合と同様に、弾性解析によりコンクリートの各要素の応力度ベクトル $\sigma_{c,2}$ およびクリープ換算弾性係数マトリックス $D_{c,2}$ の算出が行われる (ステップ S 1 3 ~ S 1 5)。なお、弾性解析における初期応力度は、時刻 t_2 直前と時刻 t_2 直後との間における応力度の変化が用いられ、クリープ換算弾性係数マトリックスの算出に際しては、時刻 t_2 から存在する要素に関してはクリープ係数 $(t_3 - t_2, 0)$ が用いられ、時刻 t_1 から存在する要素に関してはクリープ係数として $(t_3 - t_1, t_2 - t_1)$ が用いられる。

20

【 0 0 9 7 】

次に、コンクリートの各要素の初期応力度によるクリープに対する自由歪みベクトル $\varepsilon_{f,2}$ が、時刻 t_2 から初めて存在する要素に対しては数 3 6 に示す演算により、時刻 t_1 から存在する要素に対しては数 3 7 に示す演算により求められる (ステップ S 1 6 , S 1 7)。

30

【 0 0 9 8 】

【 数 3 6 】

$$\varepsilon_{\phi f,2} = D_{c,2}^{-1} \cdot \sigma_{c,2} \cdot \phi(t_3 - t_2, 0)$$

【 0 0 9 9 】

【 数 3 7 】

40

$$\varepsilon_{\phi f,2} = D_{c,2}^{-1} \cdot \left[\sigma_{c,1} \cdot (\phi(t_3 - t_1, 0) - \phi(t_2 - t_1, 0)) + \Delta\sigma_{c\phi,1} \cdot \rho \cdot (\phi(t_3 - t_1, 0) - \phi(t_2 - t_1, 0)) + \sigma_{c,2} \cdot \phi(t_3 - t_1, t_2 - t_1) \right]$$

【 0 1 0 0 】

数 3 6 は、ステージ 1 における数 3 1 の演算を時刻 t_2 を基準に行うものである。数 3 7 の括弧内の第 3 項に弾性係数マトリックスの逆行列を乗じたものは、時刻 t_2 に生じた応力度ベクトルの変化に起因する自由歪みベクトルであり、第 1 項に弾性係数マトリックス

50

の逆行列を乗じたものは、時刻 t_1 に生じた応力度ベクトルの変化に起因するステージ 2 での自由歪みベクトルである。

【 0 1 0 1 】

第 2 項は、ステージ 1 におけるクリープの進行による応力度変化ベクトルの影響を調整するものであり、クリープの進行により新たに生じた応力度ベクトルの影響は、時刻 t_2 から時刻 t_3 までの間に一律には関与しないため、係数 α を乗じることによりこの影響を緩和している。係数 α は、数 19 に示す演算により求められてもよいが、実際の演算では簡略化のために定数またはクリープ係数を変数とする関数が用いられる。

【 0 1 0 2 】

以上のように、数 37 の右辺の括弧内の 3 つの項は、図 9 に示す時刻 t_2 直後の 3 つの応力度成分 $c_{\phi,1}$ 、 $c_{\phi,1}$ 、 $c_{r,2}$ に起因する自由歪み成分に対応している。 10

【 0 1 0 3 】

その後、ステージ 1 の場合と同様に、ステージ 2 に関するレストレイン応力度ベクトル $r_{r,2}$ およびレストレイン力ベクトル $f_{r,2}$ が数 38 および数 39 により求められ（ステップ S 25）、クリープの影響を考慮した有限要素解析により応力度ベクトル $c_{r,2}$ が求められる（ステップ S 26）。

【 0 1 0 4 】

【数 38】

$$\sigma_{r,2} = -D_{\phi,2} \cdot \varepsilon_{\phi f,2}$$

20

【 0 1 0 5 】

【数 39】

$$f_{r,2} = -K_{\phi,2} \cdot B^{-1} \cdot \varepsilon_{\phi f,2}$$

【 0 1 0 6 】

さらに、数 40 および数 41 により、コンクリートのクリープによる応力度変化ベクトル $c_{s,2}$ および鋼材の応力度変化ベクトル $s_{s,2}$ が求められる（ステップ S 27）。 30

【 0 1 0 7 】

【数 40】

$$\Delta\sigma_{c\phi,2} = \sigma_{\phi,2} + \sigma_{r,2}$$

【 0 1 0 8 】

【数 41】

$$\Delta\sigma_{s\phi,2} = \sigma_{\phi,2}$$

40

【 0 1 0 9 】

求められた変化応力度ベクトルは次のステージに関する演算に利用するために図 3 中の RAM 203 や固定ディスク 204 等に保存される。以後、変数 n が最終段階のステージまでインクリメントされつつ、すなわち、複合体の構造を変更しつつステップ S 12 へと戻り、ステージ 2 に準じた演算が繰り返される（ステップ S 28、S 29）。

【 0 1 1 0 】

50

ここで、ステップ S 1 5 における演算を一般化した場合、ステージ n において、時刻 t_k (ただし、k は正の整数) から存在する要素のクリープ換算弾性係数マトリックス $D_{\phi, n}$ は、材齢 $(t_n - t_k)$ の弾性係数マトリックス $D_{c, n}$ を用いて数 4 2 にて示す演算により求められる。

【 0 1 1 1 】

【 数 4 2 】

$$D_{\phi, n} = \frac{D_{c, n}}{1 + \rho \cdot \phi(t_{n+1} - t_k, t_n - t_k)}$$

10

【 0 1 1 2 】

また、ステップ S 1 7 における演算を一般化した場合、ステージ n において、時刻 t_k (ただし、k は正の整数) から存在する要素の時刻 t_{n+1} (ただし、n は 1 を初期値とする正の整数) 直前のコンクリートの応力度によるクリープに対する自由歪みベクトル $f_{\phi, n}$ は、時刻 t_n 直後におけるコンクリートの弾性係数マトリックス $D_{c, n}$ 、載荷材齢 $(t_q - t_k)$ および着目材齢 $(t_r - t_k)$ (ただし、q, r は正の整数であり、 $q < r$ である) の関数であるクリープ係数 $(t_r - t_k, t_q - t_k)$ 、時刻 t_s (ただし、s は正の整数) と時刻 t_{s+1} との間におけるクリープによる応力度変化ベクトル $c_{\phi, s}$ 、および、所定の係数 ρ を用いて、数 4 3 として示される。

20

【 0 1 1 3 】

【 数 4 3 】

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\phi, n} = & D_{c, n}^{-1} \cdot \left[\sum_{j=k}^{n-1} \sigma_{c, j} \cdot (\phi(t_{n+1} - t_k, t_j - t_k) - \phi(t_n - t_k, t_j - t_k)) \right. \\ & + \sum_{j=k}^{n-1} \Delta \sigma_{c, \phi, j} \cdot \rho \cdot (\phi(t_{n+1} - t_k, t_j - t_k) - \phi(t_n - t_k, t_j - t_k)) \\ & \left. + \sigma_{c, n} \cdot \phi(t_{n+1} - t_{n-1}, t_n - t_{n-1}) \right] \end{aligned}$$

30

【 0 1 1 4 】

ただし、数 4 3 において k が $(n - 1)$ の場合には、式 (4.3) 中の演算は行われぬものとする。数 4 3 では、クリープ歪みと弾性歪みとが線形関係にあるという仮定と重ね合わせの原理とを用いたものとなっており、さらに、ステージ n の演算ではステージ n までに既に求められた応力度変化ベクトルが利用されることとなる。

【 0 1 1 5 】

ステージ n における数 3 2 ないし数 3 5、数 3 8 ないし数 4 1 に対応する演算は、添え字が n とされる点を除いて同様である。

40

【 0 1 1 6 】

最終ステージまで演算が繰り返されると、コンクリートの各要素に関して各時刻に生じた初期応力度ベクトルおよびクリープによる応力度変化ベクトルが累計され、コンクリートの各要素に最終的に生じる応力度ベクトルが求められる (ステップ S 3 0)。そして、最終的な応力度ベクトルの大きさがコンクリートの強度と比較され、コンクリート構造物の応力度によるクリープを考慮した強度の確認が行われる。

【 0 1 1 7 】

上記説明では、縦歪みおよびせん断歪みに対するクリープは、弾性変形による縦歪みおよびせん断歪みに所定のクリープ係数を乗じたものとして扱っているが、より精度を高めるために縦歪みに対するクリープ係数とせん断歪みに対するクリープ係数とが個別に設定さ

50

れてもよい。逆に、構造上の特徴からせん断歪みを考慮しなくても精度よく演算を行うことができる場合には、せん断歪みに対するクリープが無視されてもよい（すなわち、せん断に関するクリープ係数が 0 とされる。）。

【 0 1 1 8 】

次に、乾燥収縮に対するクリープ解析について説明する。乾燥収縮に対するクリープ解析の場合も、初期応力度に対するクリープ解析と同様に、まず、着目ステージ n におけるコンクリートの各要素の弾性係数マトリックス $D_{c,n}$ が求められ（ステップ S 1 2）、乾燥収縮用のクリープ係数 ν を用いてクリープ換算弾性係数マトリックス $D_{f,n}$ が求められる（ステップ S 1 5）。その後、ステージ（ $n - 1$ ）までの乾燥収縮によるクリープの影響を考慮したステージ n における乾燥収縮による自由歪みベクトル $\varepsilon_{f,n}$ が求められる（図 6：ステップ S 2 1, S 2 2）。

10

【 0 1 1 9 】

例えば、ステージ 1 の場合、全てのコンクリート要素は時刻 t_1 から初めて存在するため、乾燥収縮による自由歪みベクトル $\varepsilon_{f,1}$ は数 4 4 に示すように、時刻 t_1 から時刻 t_2 までの間におけるクリープの影響を無視した自由歪みベクトル $\varepsilon_{f,1}$ に等しくなる。

【 0 1 2 0 】

【 数 4 4 】

$$\varepsilon_{\phi f,1} = \varepsilon_{f,1}$$

20

【 0 1 2 1 】

なお、コンクリート要素が乾燥収縮により自由に（無拘束で）収縮する場合はせん断歪みは生じないものとして取り扱われ、自由歪みベクトル ε_f は数 4 5 に示す要素により構成される。図 1 0 は乾燥収縮前の要素 3 1 と乾燥収縮後の要素 3 2 との関係を例示する図である。

【 0 1 2 2 】

【 数 4 5 】

$$\varepsilon_f = \begin{Bmatrix} \varepsilon_{fx} \\ \varepsilon_{fy} \\ \varepsilon_{fz} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

30

【 0 1 2 3 】

また、乾燥収縮による歪みは、図 1 1 に示すようにコンクリートの材齢 t_c の関数 $\varepsilon_{sh}(t_c)$ として与えられ、例えば、時刻 t_k から存在するコンクリートの時刻 t_n から時刻 t_{n+1} までの間における（クリープの影響を無視した）自由歪み $\varepsilon_{f,n}$ は、数 4 6 にて求められる。

40

【 0 1 2 4 】

【 数 4 6 】

$$\varepsilon_{f,n} = \varepsilon_{sh}(t_{n+1} - t_k) - \varepsilon_{sh}(t_n - t_k)$$

【 0 1 2 5 】

50

ステージ 2 の場合、時刻 t_2 から初めて存在するコンクリート要素の自由歪みベクトル $\varepsilon_{f,2}$ は、数 47 に示すように時刻 t_2 から時刻 t_3 までの間におけるクリープの影響を無視した自由歪みベクトル $\varepsilon_{f,2}$ に等しくなる。

【 0 1 2 6 】

【 数 4 7 】

$$\varepsilon_{\phi f,2} = \varepsilon_{f,2}$$

【 0 1 2 7 】

一方、ステージ 2 において、時刻 t_1 から存在するコンクリート要素の自由歪みベクトル $\varepsilon_{f,2}$ は、数 48 により求められる。

【 0 1 2 8 】

【 数 4 8 】

$$\varepsilon_{\phi f,2} = D_{c,2}^{-1} \cdot \Delta\sigma_{c\phi,1} \cdot \rho_v \cdot (\phi_v(t_3 - t_1, 0) - \phi_v(t_2 - t_1, 0)) + \varepsilon_{f,2}$$

【 0 1 2 9 】

数 48 において、右辺の第 1 項はステージ 1 における乾燥収縮によるクリープ歪みの影響を示しており、数 37 における右辺の括弧内の第 2 項に対応する。数 48 における $\varepsilon_{c,1}$ は、ステージ 1 における後述するステップ S 27 において求められたコンクリートの応力度変化ベクトルである。また、 ρ_v は乾燥収縮に対する演算用の係数である。 ρ_v は定数であってもよく、クリープ係数 ρ_v の関数であってもよい。

【 0 1 3 0 】

ステージ n におけるコンクリート要素の自由歪みベクトル $\varepsilon_{f,n}$ は、一般的には、時刻 t_n 直後におけるコンクリートの弾性係数マトリックス $D_{c,n}$ 、時刻 t_p (ただし、 p は正の整数) と時刻 t_{p+1} との間におけるクリープによる応力度変化ベクトル $\varepsilon_{c,p}$ 、所定の係数 ρ_v 、載荷材齢 ($t_q - t_k$) および着目材齢 ($t_r - t_k$) (ただし、 q, r は正の整数であり、 $q < r$ である) の関数であるクリープ係数 $\rho_v(t_r - t_k, t_q - t_k)$ 、および、時刻 t_n から時刻 t_{n+1} までのクリープの影響を無視した自由歪みベクトル $\varepsilon_{f,n}$ (時刻 t_k に依存する。) を用いて、数 49 により求められる。

【 0 1 3 1 】

【 数 4 9 】

$$\varepsilon_{\phi f,n} = D_{c,n}^{-1} \cdot \sum_{j=k}^{n-1} [\Delta\sigma_{c\phi,j} \cdot \rho_v \cdot (\phi_v(t_{n+1} - t_k, t_j - t_k) - \phi_v(t_n - t_k, t_j - t_k))] + \varepsilon_{f,n}$$

【 0 1 3 2 】

ただし、数 49 において、 k が $(n - 1)$ である場合には、 $\varepsilon_{c,p}$ 中の演算は行われぬものとする。数 49 に示すようにステージ n における自由歪みベクトルを求める際には、ステージ n までに求められた応力度変化ベクトルが利用される。

【 0 1 3 3 】

乾燥収縮による自由歪みが求められると、初期歪みに関するクリープ解析と同様に、自由歪みに対するレストレイン応力度ベクトル ε_r,n およびレストレイン力ベクトル f_r,n が求められ (ステップ S 25) (数 32 および数 33 参照)、クリープの影響を考慮した有限要素解析により応力度ベクトル $\varepsilon_{f,n}$ が求められる (ステップ S 26)。さらに、数 34 および数 35 に準じた演算により、コンクリートの乾燥収縮に伴うクリープによ

10

20

30

40

50

る応力度変化ベクトル $c_{,n}$ および鋼材の応力度変化ベクトル $s_{,n}$ が求められる (ステップ S 2 7)。

【0134】

以後、変数 n が最終段階のステージまでインクリメントされつつ上記演算が繰り返される (ステップ S 2 8, S 2 9)。最終ステージまで演算が繰り返されると、コンクリートの各要素に関して各ステージで生じたクリープの影響を考慮した応力度変化ベクトルが累計され、コンクリートの各要素に最終的に生じる応力度ベクトルが求められる (ステップ S 3 0)。そして、最終的な応力度ベクトルの大きさがコンクリートの強度と比較され、コンクリート構造物の乾燥収縮によるクリープを考慮した強度の確認が行われる。

【0135】

ところで、コンクリート床版のひび割れに対処するために、コンクリートに膨張剤が混入される場合が多くある。そこで、3次元解析装置 2 では膨張剤を考慮した解析も可能とされている。3次元解析装置 2 では、予め、膨張剤の膨張による歪みが材齢 t_c の関数 $b(t_c)$ として準備されている。図 1 2 (a) はコンクリートの乾燥収縮による歪みを示すグラフ 4 1 と膨張剤によるコンクリートの膨張による歪みを示すグラフ 4 2 とを示す図である。

【0136】

なお、コンクリートの膨張剤による歪みは、膨張剤を含むコンクリートを暴露試験して得られる図 1 2 (b) に示すグラフからグラフ 4 1 を減算して求められる。また、膨張剤による歪みも乾燥収縮による歪みと同様にせん断歪みは存在しないものとして取り扱われる。

【0137】

膨張剤が混入されたコンクリートに対して乾燥収縮に関するクリープ解析が行われる場合には、時刻 t_k から存在するコンクリート要素のクリープの影響を無視したステージ n における自由歪み $f_{,n}$ として、数 4 6 に代えて数 5 0 にて求められるものが用いられる。すなわち、収縮の程度が変更された上でクリープ解析が行われる。

【0138】

【数 5 0】

$$\varepsilon_{f,n} = \varepsilon_{sh}(t_{n+1} - t_k) - \varepsilon_{sh}(t_n - t_k) + \varepsilon_b(t_{n+1} - t_k) - \varepsilon_b(t_n - t_k)$$

【0139】

次に、温度荷重 (温度変化) に対するクリープ解析について説明する。例えば、コンクリート床版と鋼桁からなる連続合成桁橋では、床版、鋼桁、橋脚が気温変化により膨張または収縮し、膨張または収縮による歪みは長期に亘って変化してコンクリートにクリープ現象が生じる。そこで、3次元解析装置 2 では温度変化に起因するクリープの影響を考慮した解析が可能とされている。

【0140】

温度荷重に対するクリープ解析は、クリープの影響を無視した自由歪み $f_{,n}$ が異なるという点を除いて乾燥収縮に対するクリープ解析と同様である。すなわち、図 6 においてステップ S 2 2 に代えてステップ S 2 4 が実行されるという点のみ相違する。乾燥収縮や温度荷重に対するクリープ解析はコンクリートの体積変化に対するクリープ解析と捉えることができる。数 4 9 にて用いられる係数 v およびクリープ係数 v は温度荷重に対するクリープ解析専用のもの (または、初期応力度に対するクリープ解析にて用いられてもの) が利用される。

【0141】

3次元解析装置 2 では、図 1 3 に示すように季節 (時刻に対応する。) と気温との関係が固定ディスク等に準備されており、ステージ n における演算に際して、時刻 t_n の気温 T_n と時刻 t_{n+1} の気温 T_{n+1} とが準備される。そして、コンクリートの線膨張係数

10

20

30

40

50

c を用いてステージ n におけるクリープの影響を無視した自由歪みベクトル $f_{f,n}$ が数 5 1 により求められる。数 5 1 に示すように、温度荷重に対する自由歪みにはせん断歪みが存在しないものとして取り扱われる。

【 0 1 4 2 】

【 数 5 1 】

$$\varepsilon_{f,n} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_{fx,n} \\ \varepsilon_{fy,n} \\ \varepsilon_{fz,n} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \alpha \cdot (T_{n+1} - T_n) \\ \alpha \cdot (T_{n+1} - T_n) \\ \alpha \cdot (T_{n+1} - T_n) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

10

【 0 1 4 3 】

なお、鋼材にも温度荷重に応じて膨張または収縮が生じるため、実際の演算ではステップ S 2 6 における有限要素解析において鋼材の線膨張係数 α_s を考慮した演算が行われる。また、より精度よく演算を行うために、実際には、コンクリートの非定常熱伝導解析結果を用いてコンクリート構造物の内部の温度が求められた上で有限要素解析が行われる。

20

【 0 1 4 4 】

既述のように、3次元解析装置 2 では初期応力度に対するクリープ解析と温度荷重に対するクリープ解析とを複合的に行うことが可能とされている（ステップ S 1 6 , S 2 3 ）。この場合、初期応力度に対するクリープ解析と温度荷重に対するクリープ解析とは同様のクリープ係数およびリラクセーション係数を利用することが可能であり、これらの解析における応力度変化ベクトルがまとめて求められる。

【 0 1 4 5 】

具体的には、図 5 中のステップ S 1 7 において数 4 3 により初期応力度に対する自由歪みベクトル $f_{f,n}$ が求められ、図 6 中のステップ S 2 4 においてクリープの影響を無視した温度荷重による自由歪みベクトル $f_{f,n}$ が自由歪みベクトル $f_{f,n}$ に加算され、最終的な自由歪みベクトルとされる。これにより、ステップ S 2 5 ~ S 2 7 において初期応力度によるクリープおよび温度荷重の双方の影響を考慮した応力度変化ベクトルが求められる。

30

【 0 1 4 6 】

一方、初期応力度に対するクリープ解析、乾燥収縮に対するクリープ解析、および、温度荷重に対するクリープ解析が個別に行われ、最終段階で各解析結果が任意に加算されることによりコンクリートに作用する応力度ベクトルが求められてもよい。これにより、3種類のクリープ解析の全てまたはいずれか 2 つを複合的に考慮したクリープ解析を行うことが実現される。

【 0 1 4 7 】

以上のように、3次元解析装置 2 では、ステージごとの有限要素解析（ステップ S 2 6 ）により、コンクリート要素に生じる最終的な応力度ベクトルを求めることができる。その結果、従来の粘性非線形解析のように 1 つのステージにおいて有限要素解析を多数回繰り返す必要がなくなり、速やかに架設段階を考慮した解析結果を得ることができる。

40

【 0 1 4 8 】

また、解析は 3 次元的に行われることから、複雑な立体的複合構造に対しても適切な解を得ることができる。さらに、3次元解析装置 2 による演算は、演算が簡素化されているため、粘性非線形解析では解析結果が収束困難な場合であっても的確に解析結果を得ることができる。

【 0 1 4 9 】

50

【発明の効果】

請求項 1 の発明では、コンクリートの 3 次元解析に際して応力度によるクリープに対する自由歪みベクトルを求めることができ、請求項 3 の発明では、クリープによる応力度変化ベクトルを求めることができる。

【0150】

また、請求項 4 および 5 の発明では、架設段階を考慮した 3 次元のクリープ解析を迅速に行うことができ、請求項 2 および 6 の発明では、クリープを考慮した 3 次元解析のための弾性係数マトリックスを導くことができ、請求項 7 の発明では、縦歪みおよびせん断歪みに対して個別のクリープ係数を設定することにより解析精度を高めることができる。

【0151】

請求項 8 の発明では、コンクリートの体積変化に対するクリープを 3 次元解析することができ、請求項 9 の発明では、架設段階を考慮した解析を迅速に行うことができる。

【図面の簡単な説明】

【図 1】材齢と応力度との関係を示す図である。

【図 2】(a)ないし(d)は、解析の基本手法を説明するための図である。

【図 3】3次元解析装置の構成を示すブロック図である。

【図 4】解析対象となる構造物を説明するための図である。

【図 5】3次元解析装置の動作の流れを示す図である。

【図 6】3次元解析装置の動作の流れを示す図である。

【図 7】クリープ係数を示す図である。

【図 8】要素の変形を例示する図である。

【図 9】応力度の変化を示す図である。

【図 10】要素の変形を例示する図である。

【図 11】乾燥収縮による歪みと材齢との関係を示す図である。

【図 12】(a)は、乾燥収縮による歪みおよび膨張剤による歪みと材齢との関係を示す図であり、(b)は、乾燥収縮および膨張の双方を考慮した歪みと材齢との関係を示す図である。

【図 13】季節と気温との関係を示す図である。

【符号の説明】

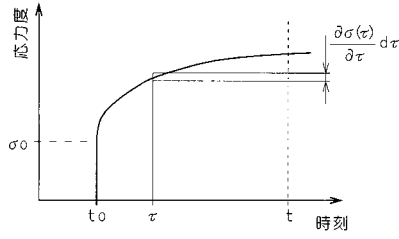
- 1 複合体
- 2 3次元解析装置
- 11 コンクリート
- 12 鋼材
- 201 CPU
- 203 RAM
- 241 プログラム
- S14, S17, S22, S24, S25, S27~S29 ステップ

10

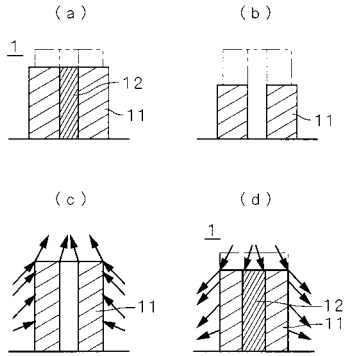
20

30

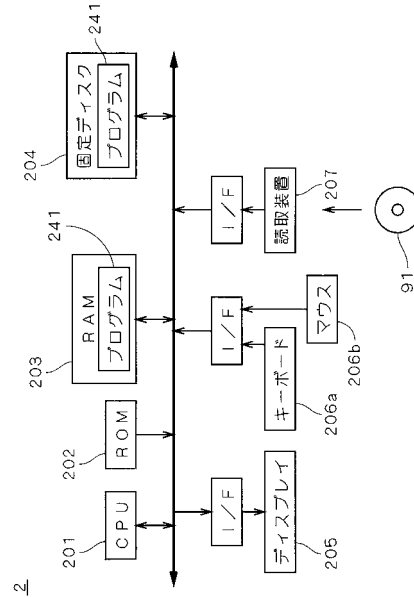
【 図 1 】



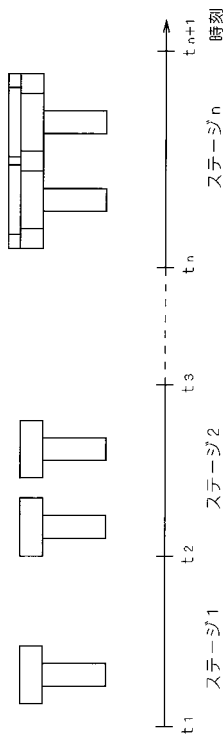
【 図 2 】



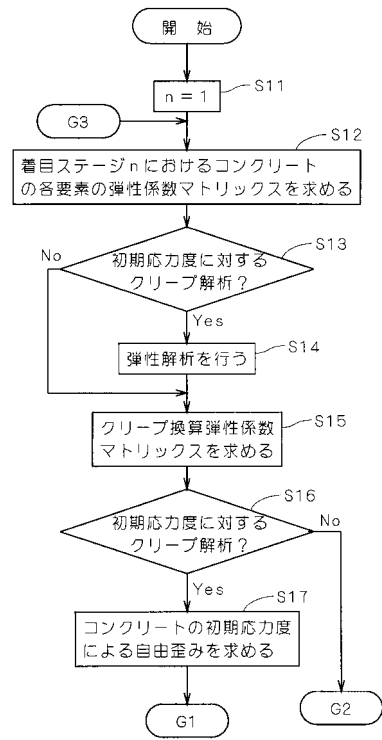
【 図 3 】



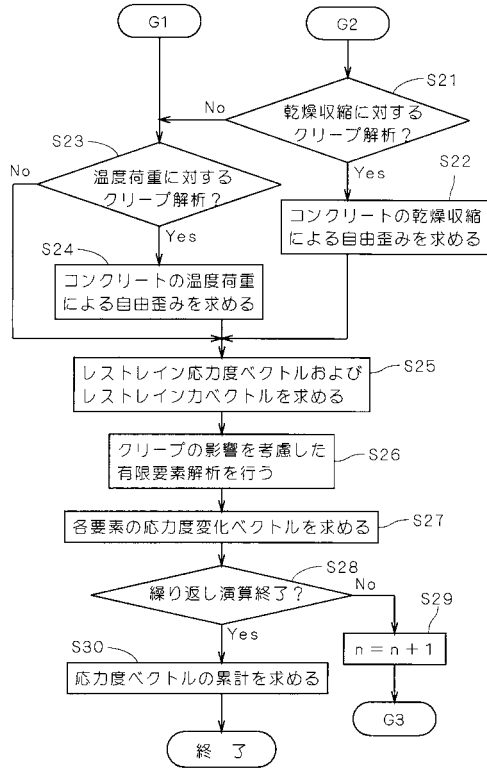
【 図 4 】



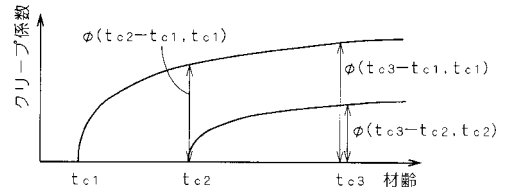
【 図 5 】



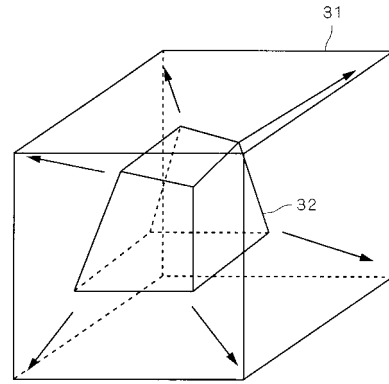
【 図 6 】



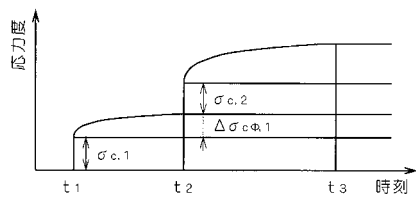
【 図 7 】



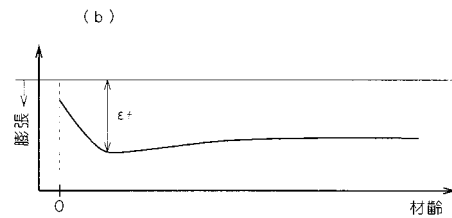
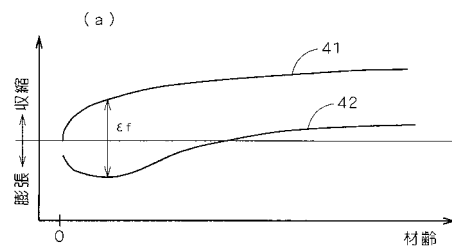
【 図 8 】



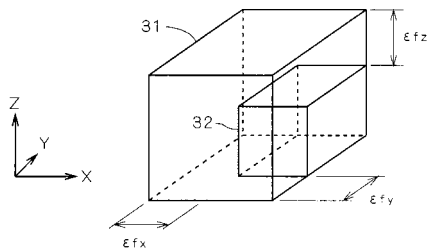
【 図 9 】



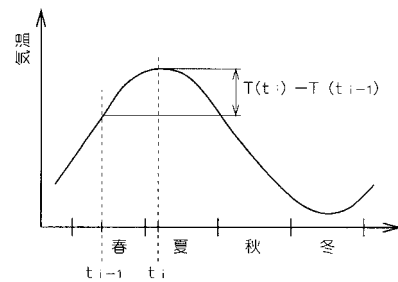
【 図 1 2 】



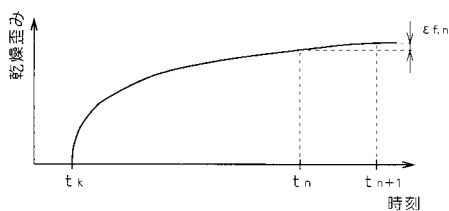
【 図 1 0 】



【 図 1 3 】



【 図 1 1 】



フロントページの続き

(72)発明者 上平 謙二

東京都豊島区北大塚1丁目16番6号 ドービー建設工業株式会社内

(72)発明者 角 昌隆

東京都千代田区霞が関3丁目3番2号 日本道路公団内

Fターム(参考) 2D059 AA05 AA11 AA14