

複合断面照査システムの開発

Development of Verification System for Hybrid Section Design

山野 長弘
Nagahiro YAMANO

川田テクノシステム(株)開発部
開発二課課長

工藤 克士
Katsushi KUDO

川田テクノシステム(株)開発部
開発二課

初鹿 明
Akira HATSUSHIKA

川田テクノシステム(株)開発部
開発二課

近年、構造物の長寿命化や耐久性能、耐震性能向上を目的に補修・補強を施す場合が多くなっている。この場合、材料の長所を生かし複合的に断面を構成する構造形式が多く用いられる。複合構造物の設計では、経時変化の影響評価および材料特性を反映した応力計算を行う必要がある。この種の問題ではFEMが用いられているが、モデルを作成するにも解析結果の評価にもFEMに関する専門知識を必要とする。一方、市販の断面計算ソフトを用いれば簡易的に照査できるが、その際には多くの仮定条件を伴い、そのために計算結果の評価を難しくしている。本文では、複合構造物を対象に計算精度を確保し、効率良く断面照査が行えるシステムについて述べるものである。

キーワード：補修補強，新工法，新材料，断面計算，耐力，複合構造

1. はじめに

近年、高度経済成長期にストックされた膨大な社会資本の老朽化、社会的要請などにより、構造物の長寿命化や耐久性能、耐震性能向上を目的に補修・補強を施す場合が多くなっている。構造物の補修補強にあたっては、材料の長所を生かし複合的に断面を構成する構造形式が多く用いられる。このような構造物を設計する場合、一般には市販されている断面計算ソフトを用いることになるが、これらのほとんどは適用断面形状、適用材料および計算可能な応力状態などに制約を設け、使用性に重点を置いたものとなっている。したがって、構造物の応力状態を評価するためには、種々の仮定により断面計算ソフト適用のためのモデル化を行わなければならない。

そのため、複合材料で構成された断面構造、腐食などにより経時的に断面形状や材料強度が変化するような断面構造、複合材料それぞれにクリープの影響を考慮する場合など、断面諸量を換算するなどにより形状や材料特性値を近似的にモデル化し応力評価することになる。これは結果として、入力のための作業効率悪化やモデル化によるミスの可能性とともに、複合構造を単純化して得られた計算結果の評価を難しくしている。

現在、このような構造物を実際と同等の断面構成で応力評価する手法としてFEMが多用されおり^{1), 2)}、補強断

面の設計法²⁾としても用いられている。しかしながら、FEMを適用する場合には鉄筋や新素材のモデル化法、材料非線形特性の評価法など、解析結果を適正に評価するためにはFEMに関する十分な知識が必要であり、設計費用も高いものとなる。

そこで、複合材料で構成される断面を忠実に反映できること、計算結果を容易に評価できること、維持補修補強分野において効果的に活用できること、などを目的に複合断面照査システムを開発した。複合材料で構成される構造物を忠実な断面モデルを用いて応力計算することは、その断面構成で耐久性能や耐荷性能に関する要求性能を満足しているかどうかを確実に評価でき、経済設計の観点においても重要である。さらには、従来の断面計算と同様の方法で容易に応力計算ができるので、それと等価な断面へのモデル化時に生じる種々のミスによる不適切な設計を防止する上でも有効である。

なお、本文中の図式等に使用している記号の説明は文末にまとめて掲載している。

2. 複合断面照査システムの概要

本システムの適用範囲を表1に、処理の流れを図1に示す。本システムは性能設計や補修補強設計に用いることができるように、適用可能な断面形状・材料特性の多様性、経時変化への対応、付着状態、さらに材料特性や照査条

件がユーザーが新たに追加できるように、以下の機能を有している。

- 任意の断面形状および材料配置に対応している。
- 様々な異種材料および強度の異なる材料を多種類扱える。
- 施工状態に応じて変化する断面形状について連続的な断面照査が可能である。
- 材料の付着性状を考慮した断面照査が可能である。
- 腐食の状態を表現できる。
- クリープによる影響を考慮できる。

表1 本システムの適用範囲

区分	適用例
補修・補強	施設の現況把握 ひび割れ状態を考慮した構造物の耐力照査 様々な材料により補強した構造物の耐力照査 新材料の採用に伴う耐力照査 経時変化に伴うクリープ断面力
新設構造物	新材料を用いた断面照査 新工法を用いた断面照査 合成断面を要する断面照査 付着性状を考慮した断面照査 引張軟化特性を考慮した断面照査

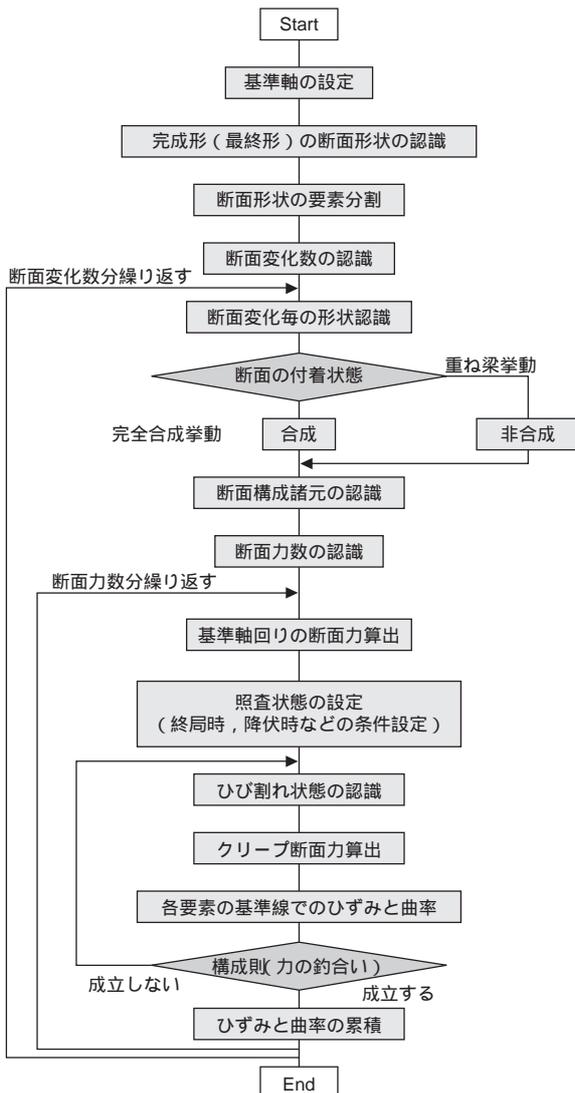


図1 計算の流れ

3. 複合断面照査システムの機能

(1) 複合断面のモデル化

本システムでは、図2 (a) に示すように断面を矩形または三角形のファイバー要素として自動的にモデル化する。一般に従来の断面照査システムでは、図2 (b) に示すように断面を帯状の微小要素でモデル化し、数百～数万回の数値積分を行う。計算精度は帯状要素の密度に依存するので、精度と計算時間の点で問題があった。本システムでは、単純な形状の集合体として断面全体をモデル化するので、短時間で精度のよい結果を得ることができる。なお、要素分割時の使用性を考え、簡単に形状入力ができるように配慮している。

また、鉄筋、PC鋼材およびシート部材なども構成要素として扱うことができる。施工ステップを追った断面照査では、各要素ごとに各施工段階における強度特性、変形特性、力学特性を設定できるようにしている。

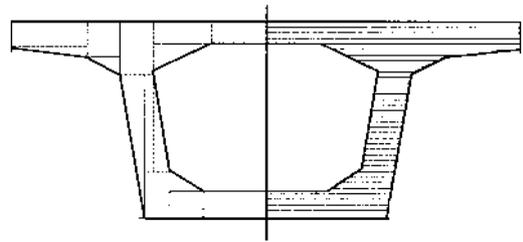


図2 要素分割方法

一方、応力度 - ひずみ関係の設定では多種多様な材料のモデル化に対応するために、要素ごとに応力度 - ひずみ曲線を設定できるようにしている。これにより、コンクリートや鉄筋の他、炭素繊維、アラミド繊維などが混在した場合でも断面照査が可能となる。応力度 - ひずみ曲線の設定は、数点の応力度とひずみの関係を数値入力するとともに、降伏点応力とひずみ、終局点応力とひずみを条件として与え、フーリエ級数により近似する。

これにより力の釣合い状態を式 (1) の形状関数と式 (2) の応力度 - ひずみ曲線関数の積で算出することができる (式 (3))。

$$g(y) = A \cdot y + b \quad (1)$$

$$\sigma(\varepsilon) = a_0 / 2 + a_1 \cdot \text{Cos}x + a_2 \cdot \text{Cos}2x + a_3 \cdot \text{Cos}3x + a_4 \cdot \text{Cos}4x + b_1 \cdot \text{Sin}x + b_2 \cdot \text{Sin}2x + b_3 \cdot \text{Sin}3x + a_4 \cdot \text{Sin}4x \cdots \quad (2)$$

$$C = \sum_{n=1}^{n=N} \int g(y) \cdot \sigma(\varepsilon(y)) dy, \quad \varepsilon(y) = \varepsilon_0 - \text{Tan}\psi_0 \cdot y \quad (3)$$

(2) クリープの影響

本システムは、断面構成要素のクリープ特性が要素それぞれで異なる場合にも断面に発生するクリープ変形とクリープ拘束力を算出することができる³⁾。また、クリ

ープが時間の経過とともに徐々に進行する現象を表現するため、数回の計算ステップに分けて算出している。クリープ係数は、コンクリート標準示方書に示されている値を参考に使用者が設定できるようにしている。また、本システムでは遅れ弾性による影響を別途考慮することが可能である。

ところで、不静定構造物の場合にはクリープ2次力の影響も考慮する必要がある。クリープ2次力の算出は、適切なクリープ進行度を設定し、骨組解析により逐次解析を行う。

以下、**図3**を参照しクリープによる拘束力とひずみの算出法について説明する。

作用荷重により各要素に発生しているひずみおよび曲率を設定する。

1回の計算あたりのクリープ量を設定する。

各要素が自由にクリープ変形を生じた場合の断面軸図心位置のひずみと曲率を算出する。

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{cr} &= \Delta\phi \cdot (\varepsilon(t_0) + \psi(t_0) \cdot y) \\ \psi_{cr} &= \Delta\phi (\psi(t_0) + \varepsilon(t_0) \cdot y_c / r_c^2) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式(4)で求めたクリープひずみを拘束する断面力を求める。

$$\begin{bmatrix} N_{cr} \\ M_{cr} \end{bmatrix} = E \cdot \sum \begin{bmatrix} A_c & B_c \\ B_c & I_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\phi (\varepsilon(t_0) + \psi(t_0) / y) \\ \Delta\phi (\psi(t_0) + \varepsilon(t_0) \cdot y_c / r_c^2) \end{bmatrix} \quad (5)$$

ここで、断面諸値は材齢修正したものをを用いる。

式(5)で求めた拘束力を全要素で算出しし合わせた後、換算断面に対しひずみと曲率を算出する。

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{cr} \\ \psi_{cr} \end{bmatrix} = \frac{1}{E(AI - B^2)} \cdot \sum \begin{bmatrix} I & -B \\ -B & A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_{cr} \\ M_{cr} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式(6)で求めたクリープによるひずみと曲率を初期のひずみと曲率に加算する(式(7))。この状態を初期状態として から までを繰り返す。

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon(t_1) &= \varepsilon(t_0) + \varepsilon_{cr} \\ \psi(t_1) &= \psi(t_0) + \psi_{cr} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

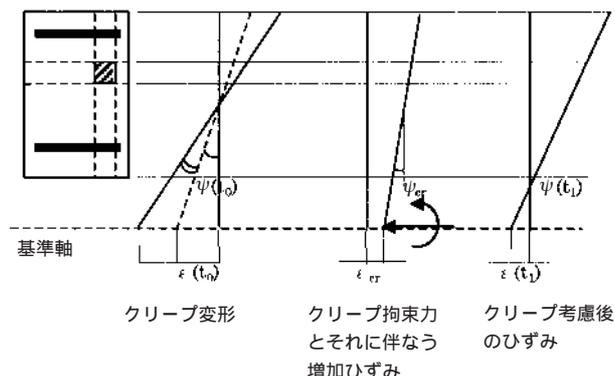


図3 クリープの影響

(3) 非合成構造への対応

例えば、鋼とコンクリートが柔合成または弾性合成される場合、あるいはコンクリートひび割れの制御を行う場合など、不完全合成構造が用いられるケースがある。通常、ずれ(付着状態)を考慮した断面照査を行う場合、FEM解析などが用いられる。しかし、FEM解析はデータ作成が煩雑であり、モデル化および結果評価に解析に関する十分な知識を必要とする。また、ずれを正確に評価するためには部材軸方向の構造解析を行う必要があり、断面計算だけでは不十分である。

そこで、要素同士の付着状態が不完全な断面を簡易的に照査する機能として、本システムでは重ね梁のような非合成構造³⁾を採用し、以下の手順により断面力を算出している(図4参照)。

重ね梁のような構造の変形状を仮定しているため、各要素に発生するたわみは同値となる。曲率は、たわみの距離に対する2回微分となるため、結果的に各要素の曲率は同値となる。

$$\left. \begin{aligned} \psi_1 &= \psi_2 L \cdot = \psi_n \\ \psi_1 &= M_1 / (I_1 \cdot E_1), \psi_2 = M_2 / (I_2 \cdot E_2), L \cdot \\ \psi_n &= M_n / (I_n \cdot E_n) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

ここで、 I_n はひびわれなどを考慮したものとする。

各要素が負担する曲げモーメントの合計は作用モーメントとなる。

$$M = M_1 + M_2 L \cdot + M_n \quad (9)$$

各要素が負担する軸力は断面積比となる。

$$\left. \begin{aligned} N_1 &= N \cdot A_1 / (A_1 + A_2 L \cdot + A_n), \\ N_2 &= N \cdot A_2 / (A_1 + A_2 L \cdot + A_n), L \cdot \\ (N &= N_1 + N_2 L \cdot + N_n) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

ここで、 A_n はひびわれなどを考慮したものとする。

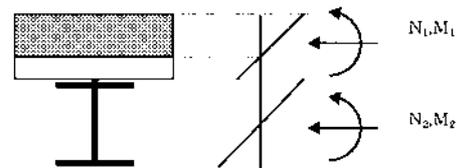


図4 重ね梁の配分断面力

また、ひび割れなどにより抵抗断面が変化する場合、断面力と上記の算出方法が同時に成立するよう収束計算を行う。また、非合成構造の耐力は各断面が有する耐力の重ね合わせが成立するものとして式(11)により算出する。

$$M_u = M_{u1} + M_{u2} L \cdot + M_{un} \quad (11)$$

(4) 初期ひずみの任意設定

本システムでは、要素ごとにひずみ情報を持たせているので、プレテンション部材や温度荷重、温度差荷重などにより断面内でひずみが多次曲線変化する場合の断面力、応力度を算出することが可能である。図5を参照し

算出手順³⁾を説明する。

自由ひずみを設定（例えば以下に示す4次曲線）。

$$T(y) = Ay^4 + By^3 + Cy^2 + Dy + E \quad (12)$$

図心位置の自由ひずみを拘束した断面力（拘束断面力）を次式により算出する。

$$\left. \begin{aligned} N(i) &= \int A(y) \cdot T(y), \quad M(i) = \int I(y) \cdot T(y) \\ N &= \sum N(i), \quad M = \sum M(i) \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

拘束断面力に対して換算断面で抵抗するとし、次式によりひずみを算出する。

$$\begin{bmatrix} \varepsilon \\ \psi \end{bmatrix} = \frac{1}{E(AI - B^2)} \cdot \sum \begin{bmatrix} I & -B \\ -B & A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N \\ M \end{bmatrix} \quad (14)$$

次式により発生応力を算出する。

$$\sigma(y) = T(y) \cdot E - (\varepsilon - \psi \cdot y) \cdot E \quad (15)$$

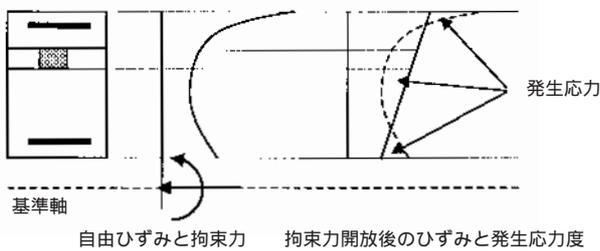


図5 各要素に発生する応力度

(5) 照査状態の設定

新材料や新工法により製作される構造物は、断面耐力の算出において様々な照査条件が要求される可能性が

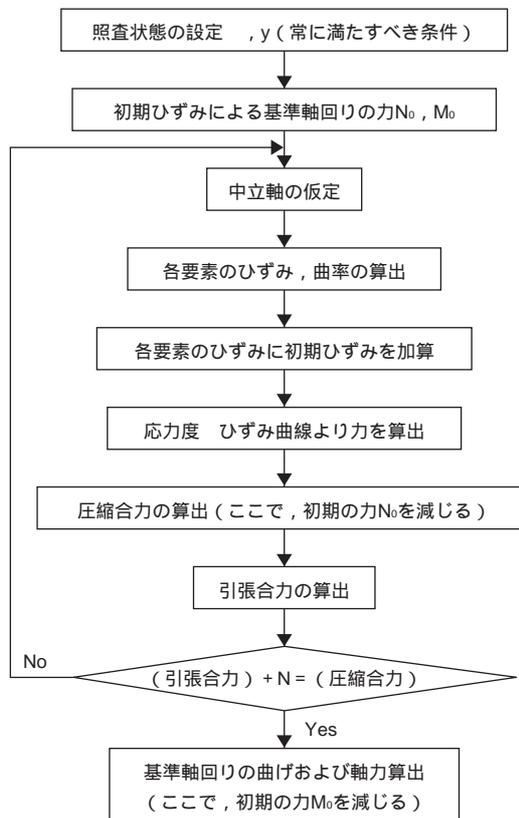


図6 力の釣合いの計算フロー

る。現在の仕様規定に準ずる構造物においても、動的解析に用いられる降伏時や終局時の定義などは、その構造物の環境条件やその重要度により異なっている。本システムでは照査条件を任意に与えることができる。

照査条件（終局時や降伏時など）を与える要素とその位置を設定する。

照査条件をひずみで設定する。

力の釣合い条件を満たし、照査する位置が設定したひずみになるよう収束計算を行う。収束計算は図6に示す手順にて行う。

4. 本システムと従来システムとの結果比較

本システムと従来システムとの間でどの程度の差が生じるかを比較検討した。以下にその結果を示す。なお、図7に検討モデル、表2に断面諸量を示す。

《施工ステップ》

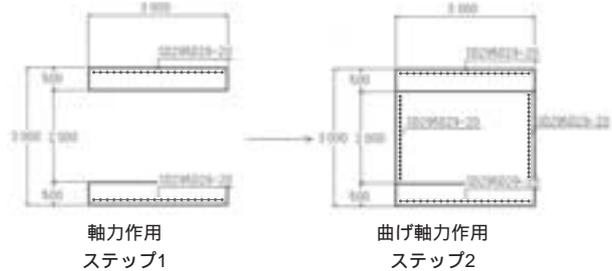


図7 検討モデル

表2 検討モデルの諸値

		単位		
ステップ1	上スラブ	断面寸法	B (mm)	3 000
			H (mm)	500
		設計基準強度	f_{ck} (N/mm ²)	50
		ヤング係数	E_c (N/mm ²)	3.3×10^4
		鉄筋降伏点	f_{sy} (N/mm ²)	295
		ヤング係数	E_s (N/mm ²)	2.0×10^5
		初期軸ひずみ	ε_0	変動
		初期曲率	ψ_0	0
		配置鉄筋量		D29 20本
	ステップ2	下スラブ	断面寸法	B (mm)
			H (mm)	500
		設計基準強度	f_{ck} (N/mm ²)	50
		ヤング係数	E_c (N/mm ²)	3.3×10^4
		鉄筋降伏点	f_{sy} (N/mm ²)	295
		ヤング係数	E_s (N/mm ²)	2.0×10^5
		初期軸ひずみ	ε_0	変動
		初期曲率	ψ_0	0
		配置鉄筋量		D29 20本
ステップ2		ウェーブ	断面寸法	B (mm)
			H (mm)	2 000
		設計基準強度	f_{ck} (N/mm ²)	21
		ヤング係数	E_c (N/mm ²)	2.35×10^4
		鉄筋降伏点	f_{sy} (N/mm ²)	295
		ヤング係数	E_s (N/mm ²)	2.0×10^5
		初期軸ひずみ	ε_0	0
		初期曲率	ψ_0	0
	配置鉄筋量		D29 40本	

《照査モデル》

- Model1：断面分割を無視（全断面同材料）
- Model2：断面分割を無視（断面の材料の違い考慮）
- Model3：断面分割を考慮（本システム）
- Model4：断面分割を無視（終局時＝断面1のコンクリート最外縁）
- Model5：断面分割を無視（終局時＝鉄筋位置）
- Model6：断面分割を無視（終局時＝断面2のコンクリート最外縁）
- Model7：断面分割を考慮（ $\epsilon_0 = 0.00035$ ）
- Model8：断面分割を無視（ $\epsilon_0 = 0.00100$ ）
- Model9：断面分割を無視（ $\epsilon_0 = 0.00175$ ）

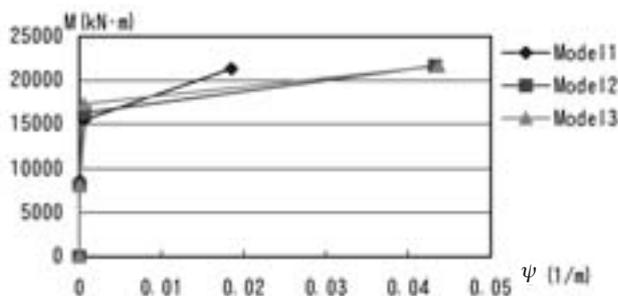


図8 Model1～Model3の結果比較

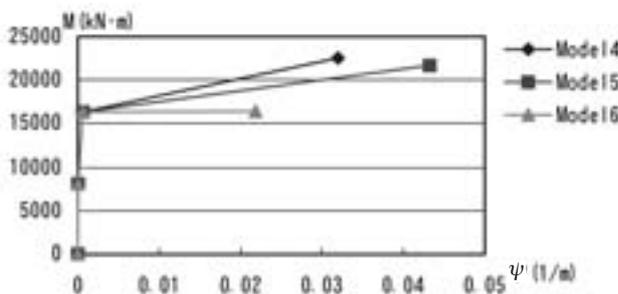


図9 Model4～Model6の結果比較

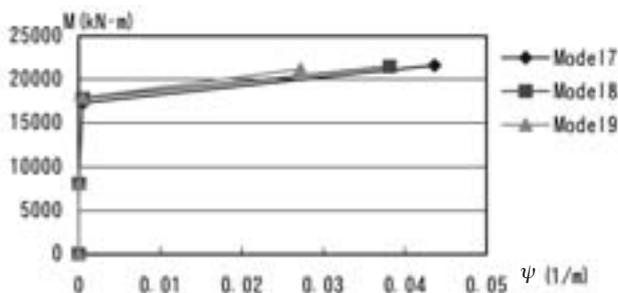


図10 Model7～Model9の結果比較

Model1～Model3では、施工ステップや異種材料の混在する構造断面を対象に結果を比較した（図8）。Model4～Model6では、構造物により異なる照査条件（終局時位置の違い）の影響を比較した（図9）。Model7～Model9

では、ステップごとに作用する断面力の大きさが耐力にどの程度影響するかを比較した（図10）。なお、各図は横軸を曲率、縦軸を曲げモーメントとしている。

図8～図10より以下のことがいえる。

図8の結果を見ると、各モデルの終局曲げモーメントは大差ないが、曲率はModel1とModel2，Model3の間で約2倍程度の差が生じている。これは終局時の断面剛性も同様に2倍程度の差が生じることを意味しており、非線形解析や靱性の照査において、忠実にモデル化を図る必要があることを示している。図9の結果を見ると、各モデルの終局時は、照査位置の違いにより大きな差が生じている。終局時を照査する場合、照査位置ごとに耐力を計算する必要があるが、構造物の種類や環境条件、構成材料などの影響を考慮し、的確な照査条件を見極める必要がある。したがって、照査条件を設定できるシステムが必要であるといえる。

図10の結果を見ると、初期ひずみの変動は、次の施工ステップでの終局耐力に影響を与える。作用する断面力が大きくなるにつれ耐力へ与える影響が大きくなるため、プレストレスなど大きい圧縮力を受ける部材を照査する場合、適切な評価をする必要があるといえる。

上記～の条件が混在する場合、終局耐力は一層複雑な挙動を示すことが考えられる。

5. 今後の展開

本システムを用いれば、複雑化、多様化する構造物の断面照査を容易に行うことができる。複合構造物や新材料を用いた構造物は、コスト縮減や構造の合理化といった点から一層増加する。その中で、今後のシステムは汎用性と使用性を両立させたものが要求される。本システムにおいても、この点を踏まえたシステムを構築していくことを考えている。

そこで、今後の展開は、本システムを既存のパッケージシステムの計算コアとして組み込み、複合構造物または補強・補修の設計が容易に可能なシステム群を構築する（図11）。

また、骨組解析システムと連動を図ることで、今後さらに様々な照査や解析を可能にする。例えば、

ひび割れによる剛度低下や幾何学的非線形を考慮した構造解析を使用者の手間を必要とせずに解析可能できる。

異種材料で構成される構造物のクリープ不静定力の算出ができる。

変形量やたわみ量を与えることで構造物の劣化状況の評価が可能な逆解析システムへの発展。

施工ステップをおった骨組解析モデルを簡単な入力で作成することができ、応力度の算出を設計者の手を煩わすことなく算出できる。

などが考えられる。

このように、将来的には構造解析システムと結合させ、汎用性の高い高機能な断面照査システムとする。

最後に、本システムの企画計画に際し、ご指導を賜りました関係者各位に心より感謝いたします。

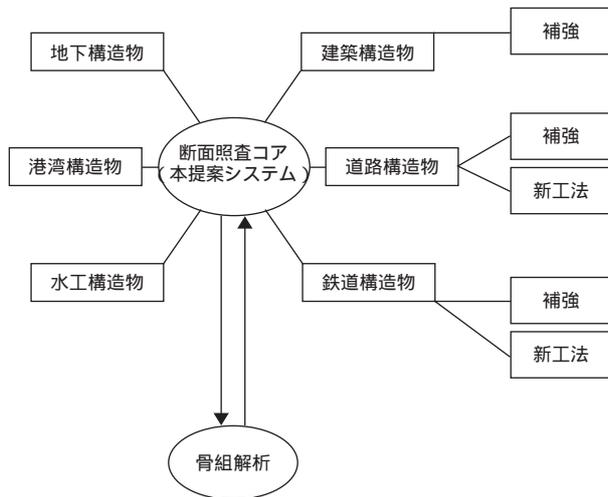


図11 本システムの将来像

参考文献

- 1) (社)プレストレストコンクリート技術協会：プレストレストコンクリートVol.43，プレストレストコンクリート技術協会，pp.31-35，2001.
- 2) (社)日本下水道協会：管更正の手引き（案），日本下水道協会，pp.参14-参27，2001.
- 3) 土木学会：鋼・コンクリート複合構造の理論と設計（1）基礎編 理論編，土木学会，pp.79-99，1999.
- 4) A.Ghali, Rfavre, 川上 洵, 櫻福 浄 他訳：コンクリート構造物の応力と変形 [クリープ・乾燥収縮・ひび割れ]，技報堂出版，pp.23-36，1995.

記号説明

- t：時間（施工ステップ） i：要素番号
- f_k ：基準強度 f_u ：終局強度 f_y ：降伏点強度
- f_b ：曲げ強度
- E：ヤング係数 G：せん断弾性係数
- ν ：ポアソン比 ϕ ：クリープ係数 ε ：ひずみ
- ψ ：曲率 $S(l_{ip}, x)$ ：応力度 - ひずみ曲線
- r_c ：断面二次半径 A：断面積 I：断面二次
- $x_1, x_2, x_3, x_4, y_1, y_2, y_3, y_4$ ：要素座標
- N_x, M_x, S_x ：X軸方向の基準軸における断面力
- N_y, M_y, S_y ：Y軸方向の基準軸における断面力
- x：要素図心からX軸方向の基準軸までの距離
- y：要素図心からY軸方向の基準軸までの距離
- l_{comp} ：合成状態のスイッチ
- $\sigma(x)$ ：応力度 $\varepsilon(x)$ ：ひずみ C：合力
- d(x)：要素の形状関数 ε_0 ：初期ひずみ
- ψ_0 ：初期曲率 θ ：たわみ角 M_u ：曲げ耐力
- T(x)：温度等により断面に発生するひずみ
- N_{cr} ：クリープ変形を拘束する軸力
- M_{cr} ：クリープ変形を拘束する曲げモーメント
- $A_c I_c$ ：要素毎の基準軸回りの断面諸値
- ε_{cr} ：クリープによるひずみ
- ψ_{cr} ：クリープによる曲率