

既設下水道管渠の更生設計用ソフトウェアの開発

～「管更生の手引き(案)」に基づく構造計算～

SUPPORTING SYSTEM FOR RENOVATION DESIGN OF AGING REINFORCED CONCRETE SEWAGE STRUCTURES

川瀬貴行*・中野雅章**・師 自海**・杉山仁実***・出口敏行****
Takayuki KAWASE, Masaaki NAKANO, Zihai SHI, Hitomi SUGIYAMA and Toshiyuki DEGUCHI

The renovation design of aging RC sewers using the sewage pipe renewal (SPR) method takes into account both the maximum load-carrying capacities of the existing and the renovated sewers. To facilitate the design practice, a user-friendly, high-performance computing system has been developed, aiming at reducing the computational time and cost. The computational concept, which is based on a separate evaluation method for analyzing RC structures, and verification with experimental studies are reported.

Key Words : *aging RC sewage structures, renovation, ultimate load-carrying capacity, separate evaluation method, SPR method*

1. はじめに

近年、耐用年数を超過した老朽下水道管渠の増加に伴い、数多くの更生技術の開発・実用化が進められている中、更生管の設計法や耐荷能力の評価について統一的な見解が示されつつある。「管更生の手引き(案)」¹⁾の中では、“複合管の構造計算は、既設管の劣化状態等を反映し、複合管の終局耐荷力を評価できる限界状態設計法により行うことを原則とする”と記述されている。その実現のためには、RC 構造物のひび割れの発生・進展を考慮し、終局耐荷力を評価できる非線形解析技術が不可欠である。

上記技術は目覚ましい発展により実務レベルで適用され、当社においては、自社開発した非線形ひび割れ解析ツール²⁾(以下、従来ツール)を用いて上記原則に準じた、複合更生管(例えば、SPR 工法³⁾による更生管)の設計を行っている。しかし、従来ツールは、

☞ 汎用性が高い反面高度な技術力が要求され、一般設計者には使いこなすことが困難であること

☞ 入力データ作成・解析の所要時間が長時間になることなど、実務設計に最適とは言えない面があり、操作性に優れ簡便に計算できるツールが望まれている。

また一方で、維持管理業務の現状は苦情や事故が発生してから処理する「発生対応型」が主体であり、「予防保全型」

の維持管理がされていない⁴⁾。「予防保全型」維持管理の実現には現状の健全度を定量的に評価することが重要であるが、現在はひび割れ・鉄筋錆の有無などによる定性的な判断によりなされている。そのため、長距離におよぶ下水道管渠を効率よく、定量的に健全度を評価できるツールが求められる。

そこで、筆者らは東京都下水道サービス㈱、積水化学工業㈱、足立建設工業㈱と共同で、一般設計者に向けた SPR 工法設計支援システム(SPRANA)を開発し、2002 年 4 月より販売を開始している。SPRANA は操作の簡便性や効率性を重視し、コストパフォーマンスに優れ、以下の特徴を有する。

- ☞ 管更生の手引き(案)に準じた構造計算
- ☞ 定量的な健全度診断
- ☞ スピーディに解析

本稿は SPRANA および解析手法の概要を示すものである。

2. SPR 工法設計支援システムの概要

(1) 概要

「大口径 SPR 工法設計マニュアル」⁵⁾では、限界状態設計法に基づき、以下の照査で断面設計を行うとされている。

- ☞ 終局限界状態を指標とした検討…更生管の終局耐荷力が、設計荷重に基づく設計耐荷力の 2.5 倍以上の安全率を有することを確認する(付録参照)
- ☞ 使用限界状態を指標とした検討…設計荷重までは新たなひび割れが発生しないことを確認する

* 社会環境エンジニアリング事業部 ライフサイクルマネジメント部
** 中央研究所 総合技術開発部
*** 首都圏事業部 都市基盤部
**** 東京都下水道サービス株式会社

SPRANA は、前者に関して最大耐荷力（終局耐荷力）、後者に関してひび割れ耐荷力を算出するシステムである。

(2) 操作方法

図－1 に SPRANA の解析手順を示す。既設管において、a.設計条件の入力、b.入力条件の確認、c.解析、d.結果出力の順で行い、その結果要求耐荷力を満たさない場合は、SPR 工法により更生した管渠に関して再度解析を行う。

1) 設計条件の入力

5 つのタブ（構造形式、物性値、荷重、鉄筋、情報）の各項目に数値を入力する。以下に各タブごとの入力項目を示す。

- 構造形式タブ（図－2）

管渠形状（矩形、蓋掛け、円形、馬蹄形から選択）、部材寸法（原管寸法、更生部材寸法、ハンチ寸法）を入力する。

- 物性値タブ（図－3）

既設部材のコンクリート、更生部材のモルタルに関して、諸物性値（弾性係数、強度等）を入力する。

- 荷重タブ（図－4）

設計荷重（死荷重、活荷重）を入力する。

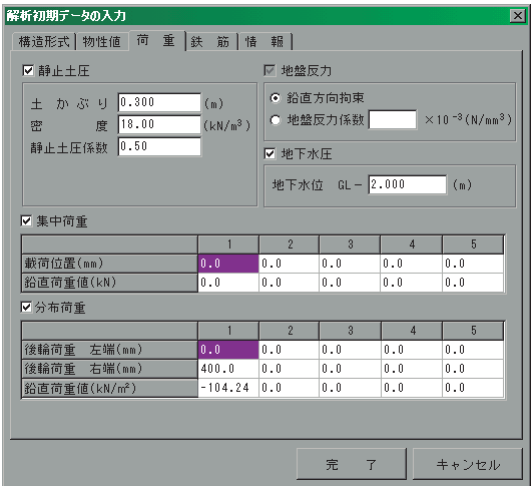
- 鉄筋タブ（図－5）

頂版および底版の配筋状況を設定する。断面状況（標準

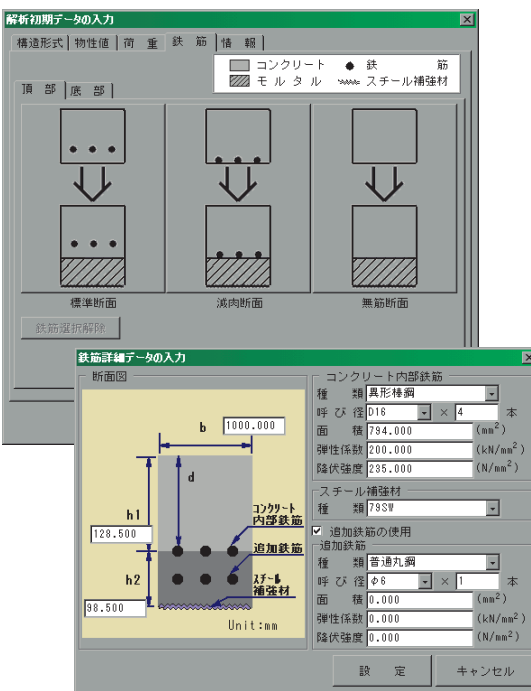
断面、減肉断面、無筋断面から選択）を選択することで既設管の劣化状態を表現できる。



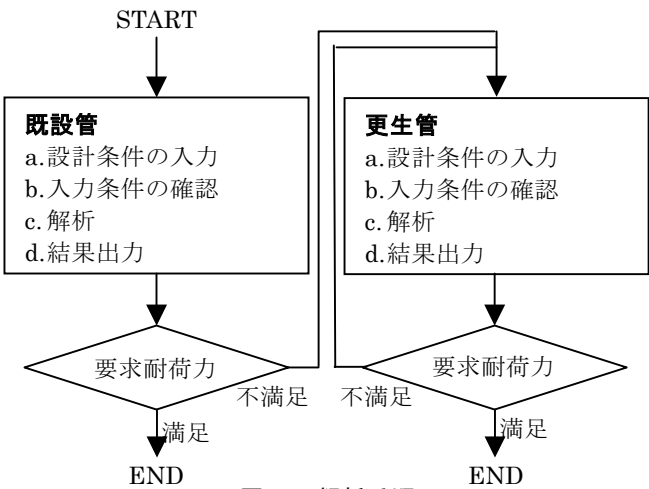
図－3 物性値タブ



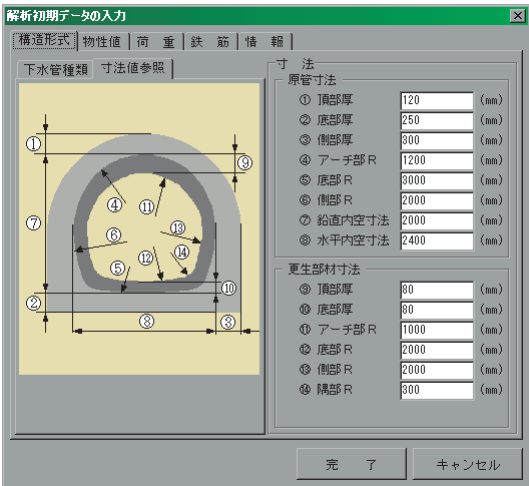
図－4 荷重タブ



図－5 鉄筋タブ



図－1 解析手順



図－2 構造形式タブ



図-6 情報タブ

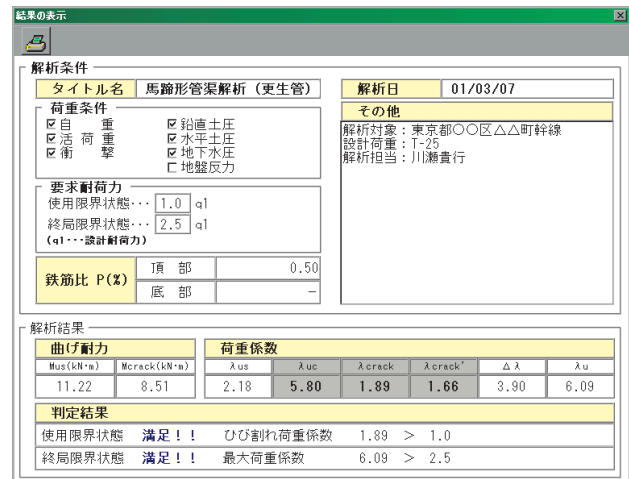


図-8 解析結果

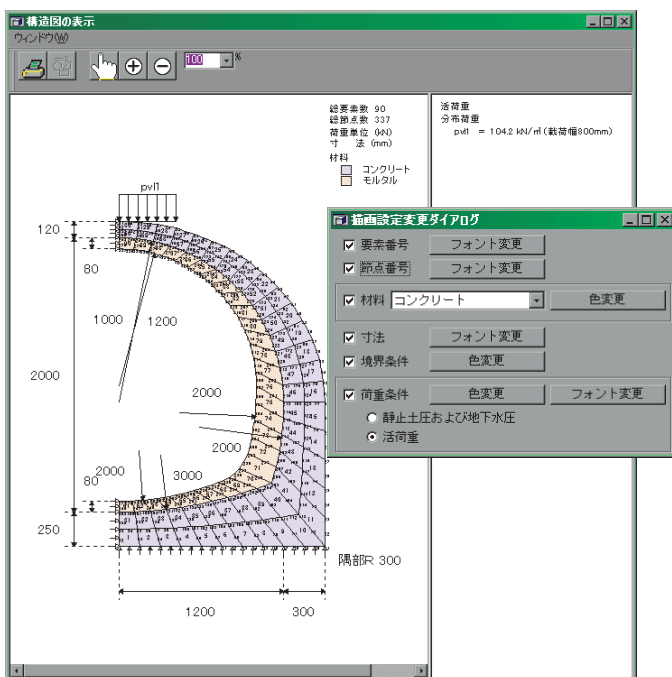


図-7 入力条件の確認画面

● 情報タブ(図-6)

解析タイトル、日時、解析メモ、解析条件(荷重条件および要求耐荷力)を入力する。

2) 入力条件の確認

1)設計条件の入力において各タブの項目に設計条件を入力後、「完了」ボタンをクリックすると、図-7 のように描画出力される。ここで、入力した設計条件を確認する。

3) 解析の実行

入力条件を確認後、解析を実行する。

4) 解析結果の表示

解析が終了すると、図-8 のように解析結果が表示される。解析結果には、判定結果として各限界状態(使用、終局)での照査結果が示される。要求耐荷力を満足していれば「満足!!」、そうでなければ「要検討…」と出力される。

設計時+現状+更生時 2 パターン=4 パターン

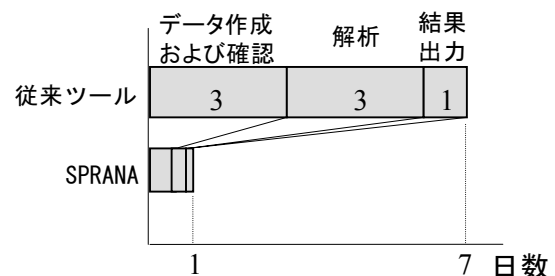


図-9 解析業務工程の短縮化の例

(3) 解析時間

解析の所要時間は、例えば、CPU:Pentium III 500MHz、メモリ:128MBの動作環境下であれば、断面寸法 1500mm×1500mm の矩形渠の場合、10 分程度である。これは、一連の手順を考えると、従来ツールや市販のひび割れ非線形解析コードと比較して格別短時間である。

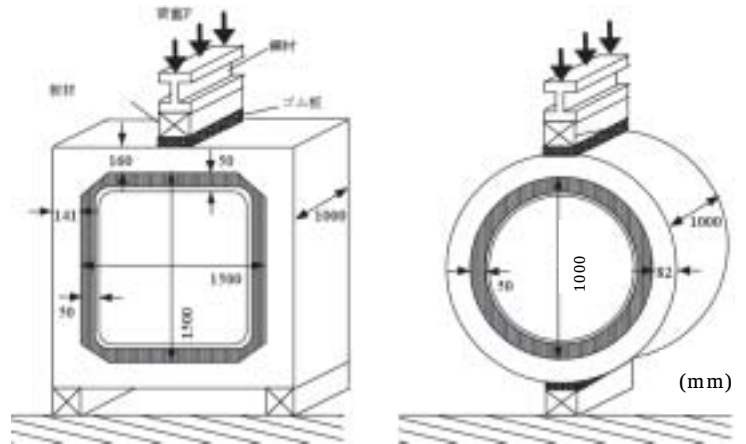
図-9 に、一断面を解析する場合(設計時+現状+更生時 2 パターン=4 パターン)において、データ作成から結果出力までの日数に関して SPRANA と従来ツールの比較結果を示す。目安として、従来ツールは 7 日程度、SPRANA は 1 日程度である。この日数差は、自動メッシュ作成機能により面倒な諸条件の設定が簡略化されていることや、解析時間が短縮化されていることなどによるものである。

また、条件変更が簡単な操作で可能であるため、更生部材厚や材料物性、鉄筋の本数などを細かく変化させて行う試行解析が短時間で実行可能である。実務設計においては、合理的な設計をするために前述のような試行解析を行うことが想定されるため、自動化・短時間化の特徴を有する SPRANA は非常に有効と考える。

3. 精度検証結果

SPRANA の精度を確認するため、管渠の破壊実験を再現した。実験ケースは、矩形（内空寸法：1,500 × 1,500、2,500 × 2,500、2,500 × 3,500mm）および円形（内空寸法：φ 1,000mm）の既設管とそれらを更生した管渠である（図－10）。既設管の状態として健全なものや鉄筋が欠落したもの、更生管の状態として既設部材と更生部材との境界面において付着が認められるものとそうでないものや、頂部と底部で更生部材厚が異なるもの等、全 18 ケースについて行った⁶⁾。

図－11 に、SPRANA と従来ツールによる実験値（最大耐力）の再現結果を示す。横軸に実験値、縦軸に SPRANA と従来ツールによる再現結果を表している。45 度線にプロットされれば精度良く実験値を再現していることになる。図によると、SPRANA は実験値に対するほぼ ±20% の領域内に位置する結果となった。従来ツールよりバラツキは大きい、実務設計上には十分耐えられる精度と考えられる。



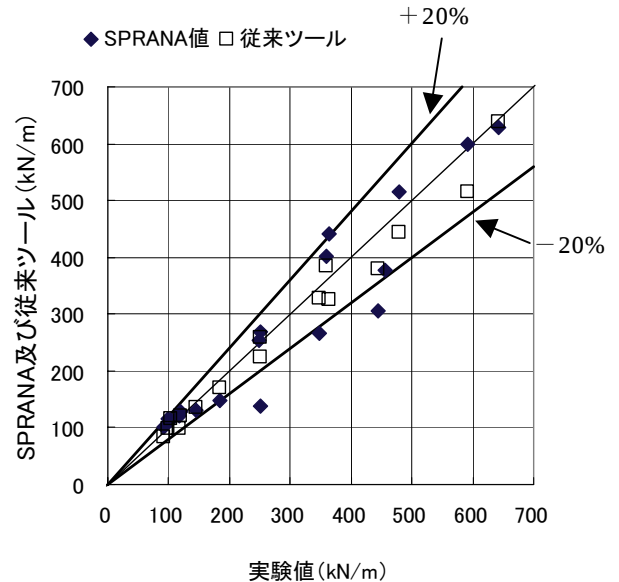
図－10 外圧試験概要

4. SPRANA に適用した分離式非線形解析手法

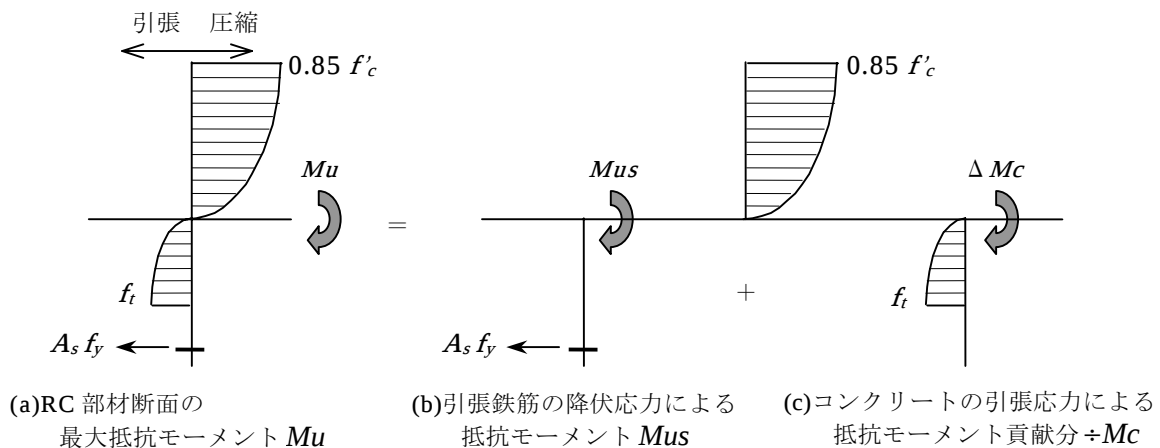
実設計における解析時間の短縮化を図るため、SPRANA では分離式非線形解析手法⁷⁾を適用している。本解析手法は、通常 RC 一体構造に対して解く問題を鉄筋モデルと無筋構造モデルに分離して解くため、FEM 解析を部分的に行い解析時間を大幅に短縮している。以下に概要を示す。

(1) 解析概念

下水道管渠の鉄筋比は小さく（1%程度）、破壊モードは曲げ引張破壊が一般的である。従って、最大荷重時の応力分布は図－12(a)のようになり、従来ツールを使用した場合、非線形 FEM 解析によりこの応力分布状態の荷重を直接求めることになる。これに対して本解析手法では、(a)の応力分布（最大耐力）を(b)の鉄筋モデルと(c)のコンクリートの引張応力モデルとに分離し、それぞれのモデルから別個に耐力を算出し、その合計値を最大耐力とするものである。なお、曲げ引張破壊の最大耐力に及ぼす圧縮鉄筋の影響は小さい



図－11 実験値（最大耐力）に対する SPRANA および従来ツールによる再現結果



図－12 RC 曲げ部材の応力分布

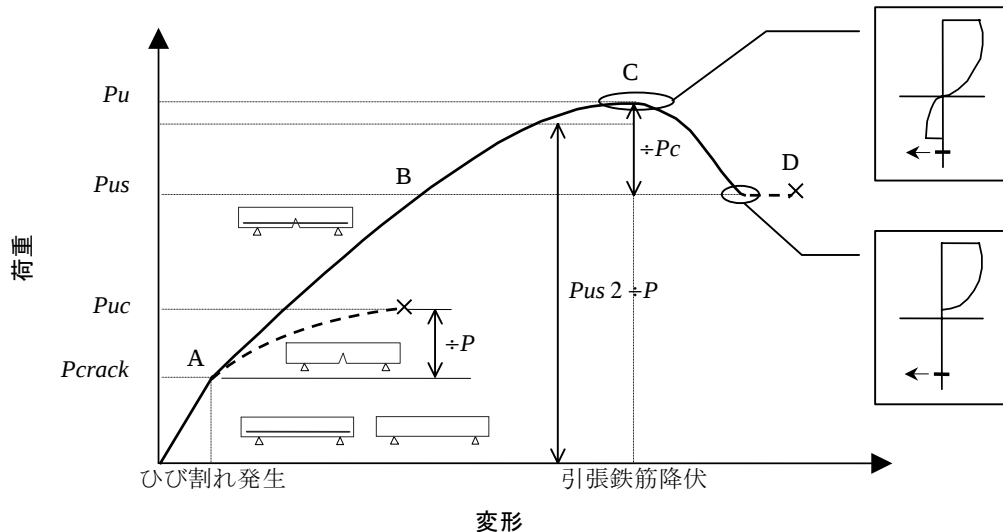


図-13 曲げ部材の荷重変位関係

ため本解析手法では圧縮鉄筋を無視している。

図-12 の応力分布を荷重変位関係に置き換えると次のようになる。図-13 に RC および無筋コンクリート梁の荷重変位関係を示す。図中の実線は RC 梁、破線は無筋コンクリート梁の挙動である。A でひび割れが発生し、B で鉄筋の負担分が大きくなり、C 付近で鉄筋が降伏し始めて最大荷重を迎えた後耐力が低下し、D で破壊する。図中の P_{us} は図-12(b)の引張鉄筋の降伏応力による抵抗モーメントに相当し、 $+P_c / Pu \ 4 \ P_{us} 0$ は図-12(c)のコンクリートの引張応力による抵抗モーメント貢献分に相当する。

本解析手法では、 $+P_c$ を無筋コンクリート梁における最大荷重とひび割れ荷重との差 $+P / P_{uc} \ 4 \ P_{crack} 0$ で近似して最大荷重を求めている。すなわち、最大荷重 P_u は次式の様になる。

$$P_u | P_{us} 2 + P | P_{us} 2 / P_{uc} \ 4 \ P_{crack} 0 \quad (3)$$

ここで、 P_u :RC部材の最大荷重、 P_{us} :鉄筋モデルによる耐力に相当する荷重、 P_{uc} :無筋コンクリート部材の最大荷重、 P_{crack} :ひび割れ荷重を表す。

(2) 下水道管渠への適用

SPR 工法の設計解析では、設計荷重に対する荷重係数 ζ で表されており、以降 ζ を用いる。 ζ を用いて書き換えると(3)式は以下の様になる。

$$\zeta_u | \zeta_{us} 2 + \zeta | \zeta_{us} 2 / \zeta_{uc} \ 4 \ \zeta_{crack} 0 \quad (4)$$

下水道管渠においては、通常 RC 構造を一体化して解く全体系を鉄筋モデルと無筋構造モデルに分離し、鉄筋モデルから ζ_{us} を算出し、無筋構造モデルから ζ_{uc} 、 ζ_{crack} を算出することを基本としている。それぞれのモデルについて以下に説明する。

1) 鉄筋モデル

同一载荷条件下では、荷重と曲げモーメントは比例関係を有していることから、次のような関係が成立する。

$$\frac{P_{us}}{P_{crack}} | \frac{M_{us}}{M_{crack}} \quad (5)$$

ここで、 M_{us} :RC 終局時の曲げモーメント、 M_{crack} :ひび割れが発生するときの曲げモーメントを表す。荷重係数 ζ を用いて(5)式を書き換えると以下の様になる。

$$\zeta_{us} | \frac{M_{us}}{M_{crack}} \zeta_{crack}' \quad (6)$$

ここで、 ζ_{crack}' は活荷重のみの载荷状態におけるひび割れ発生荷重係数を意味しており、(4)式の ζ_{crack} とは区別される(ζ_{crack} の载荷状態は活荷重+死荷重である)。 ζ_{crack}' を用いた理由は、荷重と曲げモーメントの比例関係を保つためには死荷重を除外する必要があったためである。

M_{us} は、コンクリートの圧縮力と引張鉄筋の降伏応力の釣合いから、 M_{crack} はコンクリートの引張強度と断面係数の積によって算出する。

$$M_{us} | A_s f_{ys} \left(\frac{d}{2} - \frac{A_s f_{ys}}{2 \cdot 0.85 f_{cc} b} \right) \quad (7)$$

$$M_{crack} | f_{tc} \frac{b h^2}{6} \quad (8)$$

また、 ζ_{crack}' は無筋構造モデルから算出する。

2) 無筋構造モデル

無筋構造モデルの解析は、鉄筋モデルのような簡単な数式レベルで求められるものではなく、コンクリートのひび割れの発生・進展を考慮した解析手法が必要となる。本解析手法では、師らによって提案・開発された、分布ひび割れモデルを適用した従来ツール(FEMに基づく非線形ひび割れ解析)を用いている。

従来ツールや市販の RC 非線形解析コードを用いた場合 FEM に基づく解析の対象は RC 構造物全体となり、ひび割れ発生後の鉄筋の貢献により解析時間が長くなる。それに対して、本解析手法では、FEM に基づく複雑な解析は無筋構造モデルのみとなり、ひび割れ発生後から最大荷重時までの時間は前者より短くなる。鉄筋モデルの解析は瞬時であるから、全体を通して解析時間が短縮される。

(3) 各管種におけるパラメータの算出方法

管渠の種類(既設管、更生管)やかぶりの有無等の違いにより、各パラメータ(Mus 、 $Mcrack$ 、 ζ_{uc} 、 ζ_{crack} 、 ζ_{crack}')の算出方法は異なる。以下に、鉄筋かぶりが欠落した既設管、およびその既設管を更生した管渠を例にとって算出方法を示す。

1) 既設管(図-14(a))

プレストレスコンクリート標準示方書において PC 鋼材とコンクリートに付着が無い場合は、付着が有る場合よりも曲げ耐力を 30%低減するとされており⁹⁾、これに基づき本解析手法では Mus を 30%減じている。

2) 更生管(複合管)(図-14(b))

更生管の Mus を算出する場合、スチール補強材を鉄筋と同様の材料としてモデル化している。

既設部材と更生部材の境界面において付着がある場合、鉄筋とスチール補強材を等価鉄筋に置き換え単鉄筋部材として Mus を算出する。

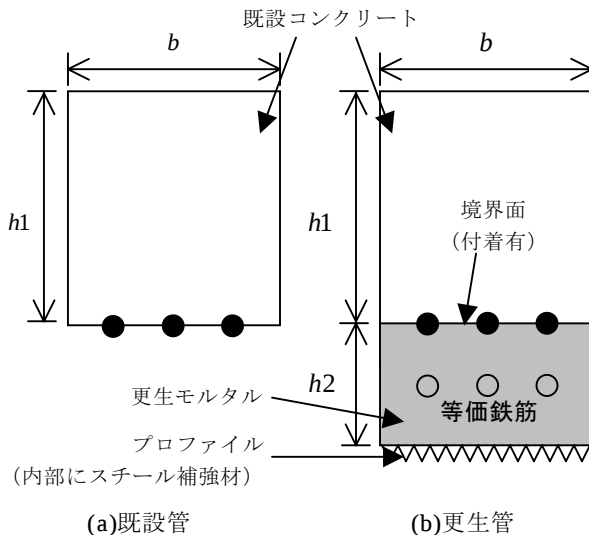


図-14 既設管および更生管の断面概要

5. おわりに

高度な解析技術の実用化として、下水道管渠の更生工法(SPR 工法)を対象に SPR 工法設計支援システム—SPRANA—の開発を行った。

SPRANA は、①「管更生の手引き(案)」に準じた構造計算、②定量的な現状管の健全度診断、③解析時間の効率化

を実現している。従来の非線形ひび割れ解析ツールに比べて、手軽さ、時間、経済性等の観点から実設計に適用し易くなっている。

今回、下水道管渠の一更生工法を対象に開発を行ったが、その他の更生工法や下水道管渠以外の RC 構造物を対象とした健全度診断および対策工設計支援システムの開発など維持管理分野へ幅広く応用できるため、種々の開発を行っていくつもりである。

付録:終局限界状態の検討における安全率 2.5 の考え方⁴⁾

現行の限界状態設計法は、通常の線形計算範囲内での計算に対して各種の部分安全係数を導入した、いわゆる「部分安全係数設計法」となっている。しかし、非線形解析手法を用いて終局限界状態を再現する構造計算では、終局耐力を直接計算できる。そのため、求めた終局耐力が保有している設計断面力に対する余裕度(安全率 Fsu)が、現行の部分安全係数設計法での照査時の安全係数と等価な関係になる。

ただし、部分安全係数設計法では、設計強度から設計断面耐力を評価する過程と、設計荷重から設計断面力を算定する過程において安全係数が組込まれている。それゆえ、現行の部分安全係数設計法での照査時に用いる安全係数 ν_i ではなく、各種安全係数をかけ合わせた $\nu_i \gamma_a \gamma_b \gamma_f \gamma_m$ を用いる。したがって、安全率 Fsu は次式のようにになる。

$$Fsu \mid \nu_i \gamma_a \gamma_b \gamma_f \gamma_m$$

ここで、 γ_i : 構造物係数、 γ_a : 構造解析係数、 γ_b : 部材係数、 γ_m : 材料係数、 γ_f : 荷重係数である。

「大口径 SPR 工法設計マニュアル」では、各安全係数に関して、 $\nu_i \mid 1.1$ 、 $\gamma_a \mid 1.1$ 、 $\gamma_b \mid 1.3$ 、 $\gamma_m \mid 1.3$ 、 $\gamma_f \mid 1.2$ と設定しており、その場合 Fsu は以下のようにになる。

$$Fsu \mid 2.45 \downarrow 2.5$$

参考文献

- 1) (社)日本下水道協会:管更生の手引き(案)参考資料、pp.参14-参20、2001.
- 2) Z.Shi *et al* : Three-dimensional finite element analysis on crack behaviors of RC cantilever decks, *Construction and Building Materials*, Vol.13, pp.33-47, 1999.
- 3) 大迫健一他:自由断面 SPR 工法の開発と現場施工、トンネルと地下、第 30 巻 1 号、pp.53-61、1999.
- 4) たとえば高瀬行廣:下水道の長寿命化、土木学会誌特集「これからの都市の地下利用」、Vol.87、pp.23-25、2002.8
- 5) 東京都下水道サービス㈱、積水化学工業㈱、足立建設工業㈱:大口径 SPR 工法設計マニュアル、2000.
- 6) 東京都下水道局、東京都下水道サービス㈱、積水化学工業㈱、足立建設工業㈱:既設矩形渠等の更生工法の開発共同研究報告書、1998.
- 7) Z.Shi *et al* : A separate method for evaluating the ultimate load-carrying capacity of aging and renovated sewage structures, *Construction and Building Materials*, Vol.15/5-6, pp.271-282, 2001.
- 8) 中野雅章他:老朽下水道管渠の補強設計における分離式非線形解析法の導入および設計支援システムの開発、コンクリート工学年次論文集、Vol.24、No.2、pp.1561-1566、2002.
- 9) 土木学会:プレストレストコンクリート標準示方書、1979.