

論文 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

中野雅章*1・師 自海*2・川瀬貴行*1・出口敏行*3

要旨：老朽化した下水道管渠の更生においては、既設管とその内側の更生材が一体となり、複合管として耐荷することを反映した合理的な補強設計が求められている。そこで著者らは、RC 構造物の終局耐荷力を指標とする合理的な補強設計を実設計レベルで可能にするために分離式非線形解析手法を導入した。また、本手法に基づき、操作性に優れ、短時間で終局耐荷力評価を行うことが可能となる設計支援システムを開発した。

キーワード：下水道管渠、補強設計、分離式非線形解析手法、設計支援システム

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で、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¹⁾。そこでの課題の一つは、既設管とその内側の更生材が一体となり、複合管として耐荷することを反映した合理的な補強設計の確立である。このような合理的な補強設計を可能にするためには 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が不可欠であるが、実設計で用いる上では解析が長時間となることや高度な専門知識を必要とすること等の課題が残されている。本稿ではこのような背景を踏まえ、下水道管渠を更生する工法として代表的な SPR 工法（以降、複合管更生工法と呼ぶ）を対象として、耐荷力に基づく補強設計を実設計レベルで可能にするために導入した分離式非線形解析手法^{2),3)}およびそれに基づき開発した設計支援システム⁴⁾について述べる。

2. 複合管更生工法による補強設計

老朽化による鉄筋腐食や断面欠損を有する下水道管渠の複合管更生工法は、老朽化した既設

管渠とプロファイル更生管の間にポリマー系モルタルの裏込め材を注入して強固な複合管に補強する工法として実用化されている⁵⁾。本工法における補強設計は、「限界状態設計法の考え方を考慮した終局耐荷力による設計法」が適用されており、大迫の研究⁶⁾では次式に示すような荷重係数を指標とし、既設老朽管の残余耐荷力を考慮した合理的な補強設計をすることが提案されている。

$$\lambda_{crack} > 1.0 \quad (1)$$

$$\lambda_u \geq 2.5 \quad (2)$$

ここに、 λ_{crack} と λ_u はそれぞれ、設計活荷重に対するひび割れ荷重係数および最大荷重係数である。著者らは短時間で精度良くこれらの荷重係数を算出することを目的として分離式非線形解析手法を導入した。

3. 分離式非線形解析手法の概要

3.1 基本的な考え方

一般に下水道管渠の鉄筋比は小さく（1%程度）、その破壊形態は、鉄筋降伏を伴う曲げ引張破壊である。曲げ引張破壊時における RC 曲げ部材の実際の応力状態（図-1(a)）は、鉄筋降伏を伴う引張破壊モデルによる成分（図-1(b)）とコンクリートの引張応力による成分

*1 日本工営株式会社 中央研究所 維持管理リニューアル部（正会員）

*2 日本工営株式会社 中央研究所 開発研究部 工博（正会員）

*3 東京都下水道サービス株式会社 技術部

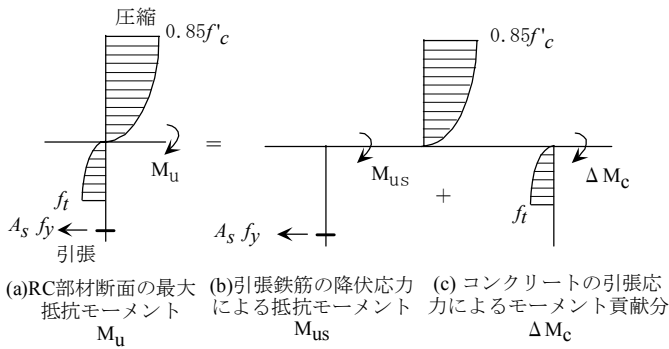


図-1 曲げ引張破壊時の応力および抵抗モーメント分布

(図-1(c))により構成されると考えられる。本解析手法は分離した各成分(図-1(b)と(c))を個別に算出し、その合計値($Mu = Mus + \Delta Mc$)を最大耐荷力とする手法である。なお、圧縮鉄筋が曲げ引張破壊の最大耐荷力に及ぼす影響は小さいため、本解析手法では圧縮鉄筋の効果を無視することとした。

図-2にRC梁の曲げモーメント-変形関係を例に、最大抵抗モーメント Mu の算出法について示す。実線および破線は、それぞれRC梁および無筋コンクリート梁の荷重変位曲線である。図中の最大抵抗モーメント Mu は、中立軸に関する引張鉄筋による最大モーメント Mus とコンクリートの抵抗モーメント ΔMc の合計値として考えられるため、次式のように表すことができる。

$$Mu = Mus + \Delta Mc \quad (3)$$

ここで、 Mus はコンクリートの圧縮力と鉄筋の引張力の釣合いから導かれる終局モーメントであり、等価応力ブロックを用いた単鉄筋長方形断面の断面力算定式に基づいて以下のように導かれる。

$$Mus = As \cdot f_{ys} \left(d - \frac{As \cdot f_{ys}}{2 \cdot 0.85 \cdot f_{cc} \cdot b} \right) \quad (4)$$

ここで、 As : 鉄筋の断面積、 f_{ys} : 鉄筋の降伏応力、 d : 断面の有効高さ、 b : 断面の幅、 f_{cc} : コンクリートの圧縮強度である。

コンクリートの抵抗モーメント ΔMc はひび割れ発生後の無筋コンクリートの貢献分と考えられるため、次式により最大抵抗モーメント

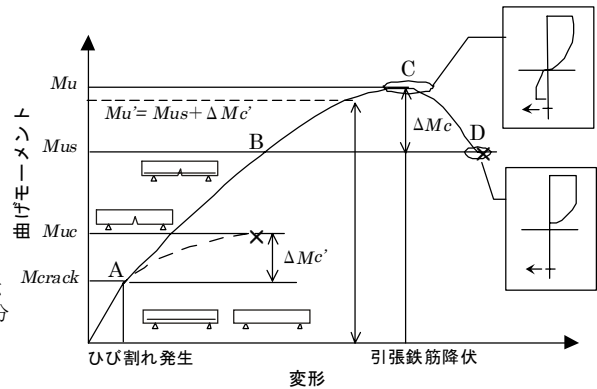


図-2 最大抵抗モーメント Mu の算出模式図

Mu を算出する。

$$\begin{aligned} Mu &= Mus + \Delta Mc \approx Mus + \Delta Mc' \\ &= Mus + Muc - Mcrack \end{aligned} \quad (5)$$

ここに、 $\Delta Mc'$ は無筋コンクリート状態による ΔMc の近似であり、 Muc と $Mcrack$ はそれぞれ、無筋コンクリートにおける最大抵抗モーメントおよびひび割れ発生モーメントである。ひび割れ発生までは鉄筋の影響は小さいため、 $Mcrack$ は次式で求めることにする。

$$Mcrack = \frac{b \cdot h^2}{6} \cdot ft \quad (6)$$

ここに、 h は断面の高さ、 ft はコンクリートの引張強度である。実際に補強設計で必要となる荷重係数は、断面力と荷重の比例関係から式(5)を以下のように書換えて表す。

$$\begin{aligned} \lambda u &= \lambda us + \lambda uc - \lambda crack \\ &= \frac{Mus}{Mcrack} \lambda crack + (\lambda uc - \lambda crack) \end{aligned} \quad (7)$$

$\lambda crack$ 、 λuc はそれぞれ無筋コンクリート構造におけるひび割れおよび最大荷重係数である。これらは、ひび割れの発生・進展を考慮して算出する必要があり、コンクリートの引張軟化特性を考慮した非線形ひび割れ解析⁷⁾が必要となる。

3.2 解析手法の検証

本解析手法の妥当性を確認するため、RC単純梁の4点曲げ載荷試験に本解析手法を適用し、実験値ならびにRC非線形解析値⁷⁾(以下、RC一体化モデル)と比較した。図-3にRC

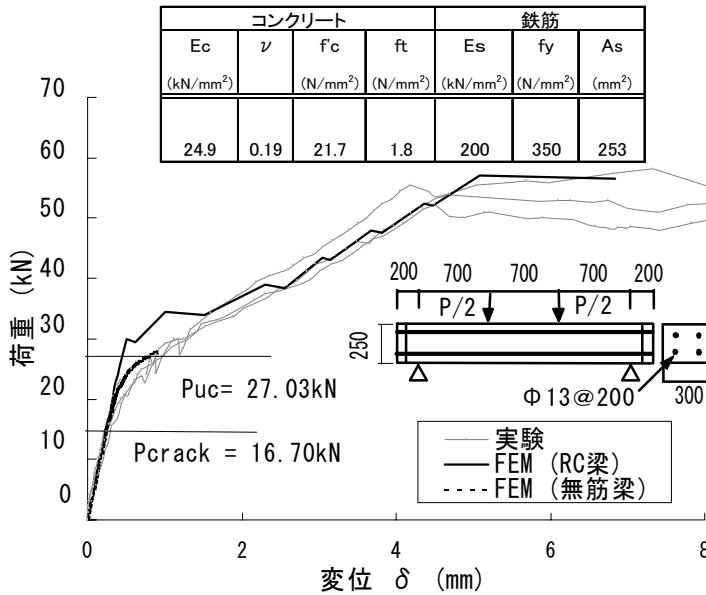


図-3 荷重-変位関係 (RC 梁の 4 点曲げ試験)

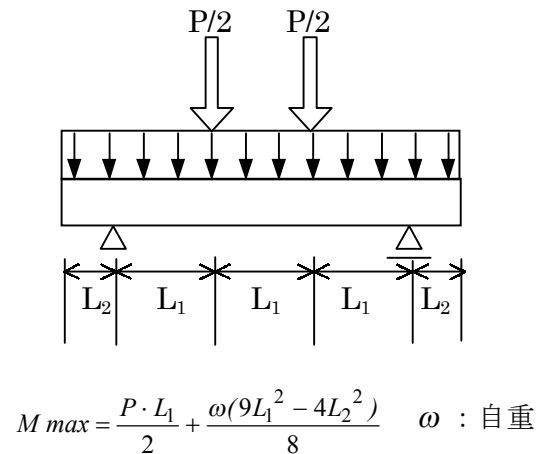


図-4 曲げモーメント-荷重関係

表-1 各モーメントおよび荷重値

モーメント						最大荷重(kN/m)			比率(/実験値)	
Mcrack (kN・m)	Muc (kN・m)	ΔMc (kN・m)	Mus (kN・m)	Mu (kN・m)	$\Delta Mc/Mu$	本解析手法 $P_{(1)}$	RC一体化 FEM $P_{(2)}$	実験値 (平均) $P_{(3)}$	$P_{(1)}/P_{(3)}$	$P_{(2)}/P_{(3)}$
5.68	9.19									
Pcrack (kN)	Puc (kN)									
16.70	27.03	3.51	19.63	23.14	0.15	63.33	55.86	65.29	0.97	0.86

$$* Muc = \frac{Puc}{Pcrack} \cdot Mcrack$$

単純梁および無筋コンクリート梁の 4 点曲げ 載荷試験における荷重-変位関係を示す。図中の P_{crack} および P_{uc} は、RC 梁と同形状の無筋コンクリート梁におけるひび割れ発生時および終局時の荷重であり、分布ひび割れモデルに基づく FEM 解析により算出したものである。

表-1 に各モーメントおよび各荷重値を示す。各モーメントは式(3)~(6)により算出し、最大荷重は図-4 に示す荷重モーメント式から算出した。最大荷重に関して、実験値に対する本解析手法および RC 一体化モデルの値の比率はそれぞれ 0.97 および 0.86 であり、本解析手法により RC 一体化モデルと同等の精度で実験値を再現できることを確認した。

4. 複合更生管の耐荷力評価への適用

4.1 定式化

複合管更生工法に関する補強設計を行うため、更生管の耐荷力は既設管の残余耐荷力を考慮して算出する必要がある。以下に、かぶりが欠落した老朽管（以下、減肉管）およびそれを更生により複合構造として補強した更生管の耐荷力評価について本解析手法を適用した事例を示す。

(1) 減肉管 (図-5(a)参照)

かぶりが欠落した RC 構造物においては、鉄筋とコンクリートの付着力の低下が耐荷力に大きな影響を及ぼす。プレストレストコンクリート標準示方書⁸⁾においては、かぶりが無い場合はかぶりが有る場合よりも曲げ耐荷力を 30% 低減するとされており、これに基づき本解析手法では式(4)により算出される M_{us} を 30% 減じるものとした。

(2) 更生管 (図-5(b)参照)

本工法で用いられる更生部材であるスチール

補強材は鉄筋と同等の耐荷力を有する材料とみなされるため、老朽管と更生材が一体化する複合更生管の M_{us} を算出する場合は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 M_{us} を算出した。また、更生材料として用いるモルタルはコンクリート材料と同様に引張軟化特性を考慮した。

4.2 数値解析例

上記の定式化に基づき、大迫らによる複合管更生工法に関する実管渠の破壊試験⁵⁾に関して本解析手法を用いた耐荷力評価を行い、補強設計に用いる際の精度について検証した。実験に関する詳細は前述の文献に譲るものとする。図-6 に代表的な更生管渠の概要図（減肉複合更生管）、表-2 に検証ケースと解析結果、図-7 に各解析値と実験値の比較図を示す。コンクリートの引張応力による耐荷力は、分布ひび割れモデルに基づく FEM 解析により、無筋構造（図-6 のケースなら無筋ボックスカルバート）の耐荷力として算出した。

表-2 および図-7 によれば、本解析手法により算出した最大耐荷力は各種管渠パターンにおいて実験値に対して約±20%以内となっており、良い精度を有していることが分かる。また表-2 によれば、 $\Delta \lambda_c / \lambda_u$ で表される最大耐荷力に対するコンクリートの引張応力による貢献は、更生前の原管の場合で 22%~37%，更生管で 35%~49%にも達する。前述した梁の 4 点

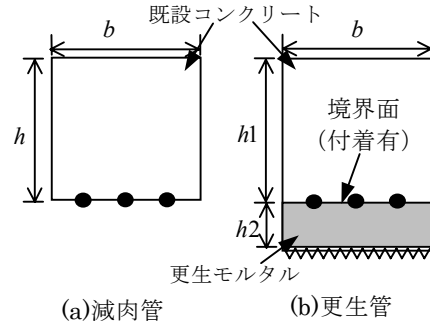
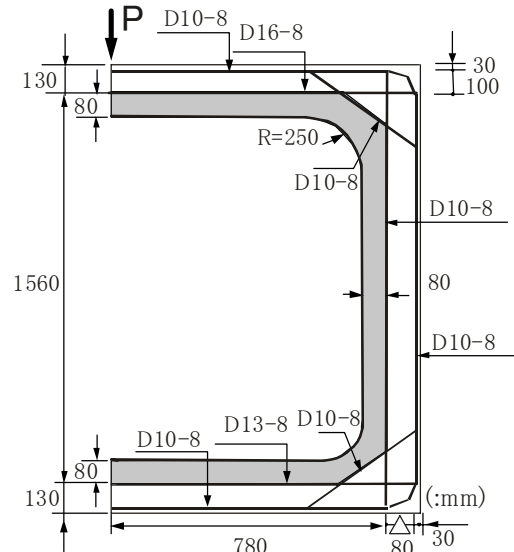


図-5 減肉管および更生管の断面概要



	コンクリート	モルタル
E(kN/mm ²)	31.85	20.09
ν	0.2	0.21
fc(N/mm ²)	56.25	42.04
ft(N/mm ²)	3.75	4.17
	鉄筋	補強材
As(mm ² /m)	1589	921
Es(kN/mm ²)	210	170
f _{ys} (N/mm ²)	295	210

図-6 更生管概要図

表-2 検証結果

管渠形状	略称	管種	耐荷力(荷重係数)			最大耐荷力		
			λ_{us}	$\Delta \lambda_c$	比率 ($\Delta \lambda_c P / \lambda_u$)	P (kN/m) 解析値	P (kN/m) 実験値	解析値 /実験値
RC矩形渠 (1500mm×1500mm)	標準管 (新品管)	原管	323.01	119.76	0.27	442.77	363.43	1.22
		SPR更生管	409.64	219.70	0.35	629.34	643.40	0.98
	減肉管 (鉄筋かぶり無)	原管	209.23	59.49	0.22	268.72	251.13	1.07
		SPR更生管	379.26	219.40	0.37	598.66	592.10	1.01
	欠落管 (減肉+頂版鉄筋無)	原管				113.39	104.50	1.09
		SPR更生管	205.11	195.60	0.49	400.71	360.20	1.11
RC円形管渠 (Φ 1000mm)	標準管 (新品管)	原管	63.90	37.24	0.37	101.14	92.57	1.09
		SPR更生管	75.66	56.15	0.43	131.81	146.00	0.90

$$P = \lambda P_0 : P_0 = 1.0 (\text{kN/m})$$

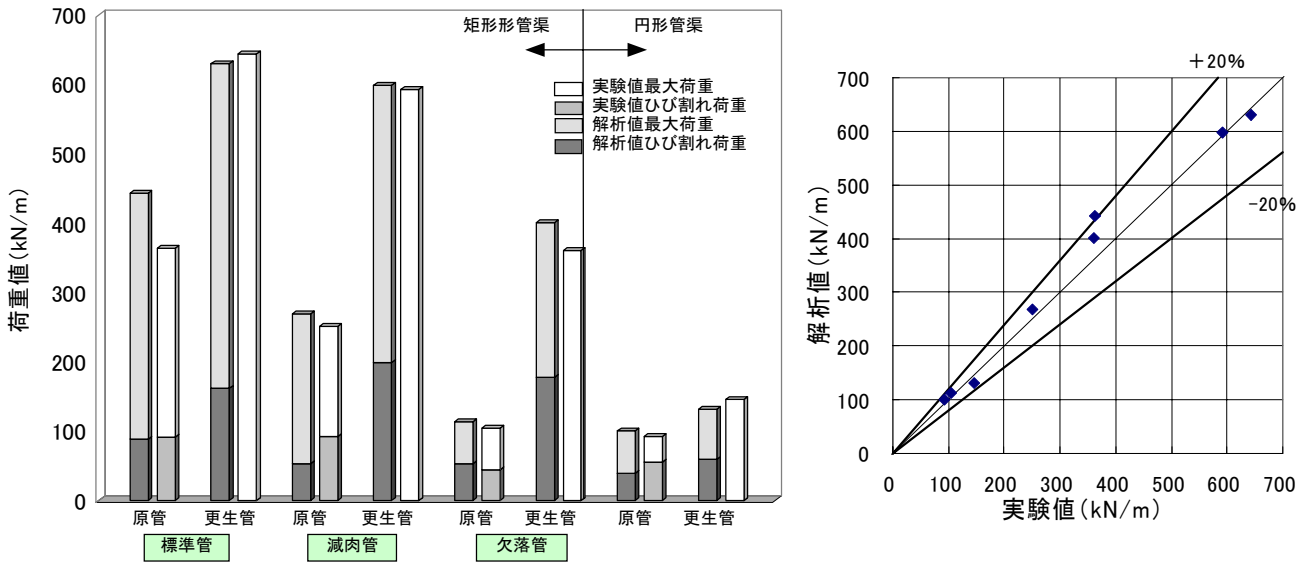


図-7 解析値と実験値の比較

曲げ試験におけるそれが 15%程度であったことと比較すると、実管渠における無筋コンクリートの貢献分は大きいことが分かる。この貢献分は、原管の方が更生管より小さく、肉薄の減肉管の場合に最も小さいが、増厚された更生管では原管の約 1.2 倍～1.7 倍となり、特に薄肉で頂版鉄筋無の欠落管を更生した場合が最も大きい。

最大耐荷力に関して解析結果が実験結果を若干上回る傾向となった。これは無筋コンクリートの貢献分の算出法に起因するものと考えられ、今後引張軟化特性を考慮した解析手法について、さらに精度向上を図るつもりである。

5. 複合管更生工法に関する設計支援システムの開発

提案した分離式非線形解析手法に基づき、RC 構造物の耐荷力評価を実設計に生かすことを目的として、操作性に優れ、短時間でひび割れ非線形解析を行うことができる複合管更生工法の設計支援システムを開発した。分離式非線形解析手法を導入することにより、FEM に基づく非線形数値解析は無筋コンクリートを対象とす

るため、計算時間は大幅に短縮できる。また、無筋状態の下水道管渠に関するメッシュの自動作成も容易となり、入出力処理を含めた計算の一括処理が可能となった。

システムは、Windows98, Windows NT の環境下で使用可能である。本システムによる設計支援は図-8 に示す流れに沿って実施され、解析結果の出力画面においては、前述した使用限界状態（ひび割れ荷重係数 λ_{crack} ）および終局限界状態（最大荷重係数 λ_u ）に関する照査の判定を出力する。解析の所要時間は、例えば、CPU:Pentium III 500MHz, メモリ:256MB の環境下なら、前述した 1500mm×1500mm の矩形渠の耐荷力評価を 10 分程度で行うことができる。これは、上記の一連の手順を考えると、市販されているひび割れ非線形解析コードと比較して格別に短時間である。また、解析結果は入力諸条件と共に一つのファイルに保存されるため、データの管理が明確で解析条件に関する照合も容易である。さらに、条件の変更も簡単操作で可能なため、個々の入力諸条件の感度解析等を含めた合理的な設計に向けての試行計算も短時間で実行可能である。

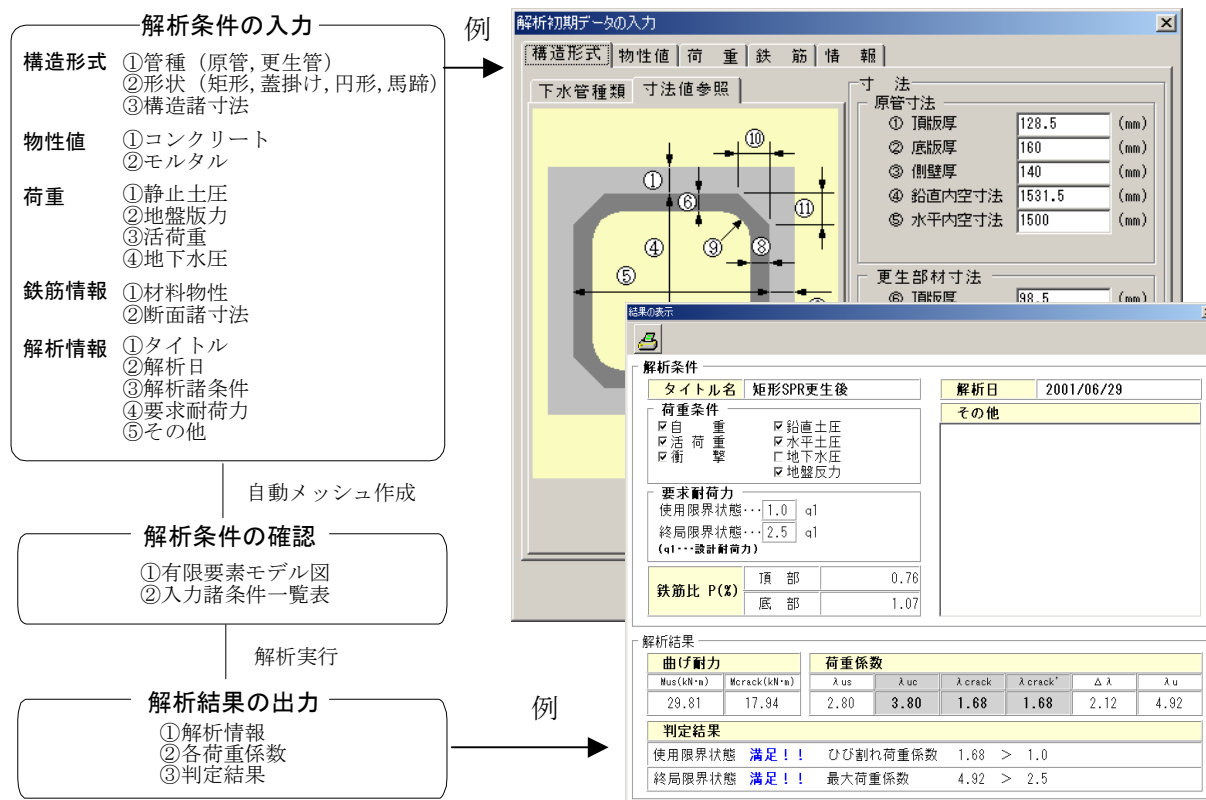


図-8 設計支援システムによる計算の流れ

6. まとめ

老朽下水道管渠の合理的な補強設計を実設計レベルで可能にするため、RC 構造物の分離式非線形解析手法を導入した。本解析手法は、曲げ部材の終局状態に着目し、引張鉄筋による終局耐荷力と無筋状態の構造による耐荷力貢献分をそれぞれ分けて計算し、その合計値を管渠の終局耐荷力とするものであり、短時間で精度良く終局耐荷力評価を行うことができるのが特徴である。本研究では RC 梁の 4 点曲げ試験および実管渠の破壊試験に本解析手法を適用して精度を検証すると共に本解析手法に基づく設計支援システムの開発を行った。

謝辞：本研究を実施するにあたり、東京都下水道局計画部の高橋良文氏には貴重な御意見を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 社団法人日本下水道協会、：管更生の手引き (案), 2001
- 2) Shi, Z. 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

- 3) 川瀬貴行他：老朽下水道管渠の更生に関する耐荷力評価, 土木学会第 56 回年次学術講演会講演概要集, 共通, pp.302-303, 2001
- 4) 中野雅章他：老朽下水道管渠の更生に関する設計支援システムの開発, 土木学会第 56 回年次学術講演会講演概要集, 共通, pp.280-281, 2001
- 5) 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
- 6) 大迫建一：自由断面下水道管渠更生工法の開発とその実用化に関する研究, 博士論文, 東京大学, 2000
- 7) 例えば, Shi, Z. and Nakano, M. :Three-dimensional finite element analysis on crack behaviors of RC cantilever decks, *Construction and building materials*, pp.37-47, 1999
- 8) 土木学会：プレストレストコンクリート標準示方書, 1979