

論文 老朽下水道管渠の更生に関する耐荷力評価

中野雅章*1・師 自海*2・中津井邦喜*3・出口敏行*4

要旨： 昨今、老朽下水道管渠の更生に関する耐荷力評価法の確立が求められている。本研究では、大きな損傷を有する RC ボックスカルバートとその更生管について、管渠の終局耐荷力に着目して破壊試験と数値解析を実施し、更生効果の定量的な評価を行った。併せて、本検討結果に基づき、複合管更生管の耐荷力評価に関する留意点についても述べる。

キーワード： 下水道管渠、RC ボックスカルバート、複合管更生管、分布ひび割れモデル

1. はじめに

近年、耐用年数を経過した老朽下水道管渠の増加に伴い、積極的な再構築事業が進められている。供用中の下水道管渠の中には、かぶりコンクリートの欠損、鉄筋の露出・腐食による断面積の減少等の大きな損傷が見られるものも多いが、その更生にあたっては、経済性や流下能力確保の観点から、敷設替えせずに薄肉で更生して要求耐荷力を満足させることが望ましい。このような背景の下、昨今様々な更生工法が開発され、実験による更生効果の確認が行われており、設計の考え方についても統一的な見解が示されつつあるが¹⁾、耐荷力の定量的な評価法については一般的には確立されていない。その理由の一つは、既設管に生じている損傷（ひび割れ等）の影響を定量化することが複雑であることにある。そこで、本研究では、大きな損傷を有する RC ボックスカルバートとその更生管について、管渠の終局耐荷力に着目して破壊試験と数値解析を実施し、更生効果の定量的な評価を行った。併せて、本検討結果に基づき、複合管更生管の耐荷力評価に関する留意点についても述べる。

2. RC ボックスカルバート破壊試験

2.1 試験ケース

大きな損傷を有する実管渠の老朽状態を再現するため、RC ボックスカルバートの新品原管を最大荷重まで載荷した後、最大荷重以降の耐荷力の低下率に基づき 3 ケースの老朽原管を人為的に再現した。すなわち、最大荷重時で載荷を止めた供試体 (A1) の他に、最大荷重以降 90% および 80% にまで荷重が低下した時点まで載荷した供試体 (A2 および A3) を老朽原管と定義した。(図-1)

また、それらの老朽原管を更生した老朽原管更生管および新品原管を更生した新品原管更生管の載荷試験を実施し、最大荷重を測定して更生効果の確認を行った。

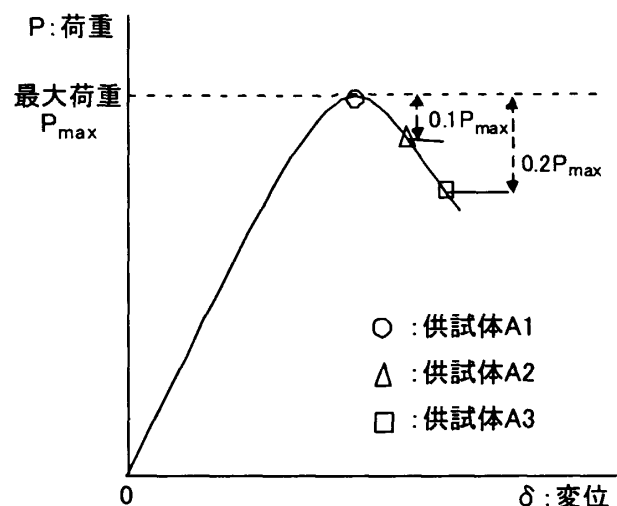
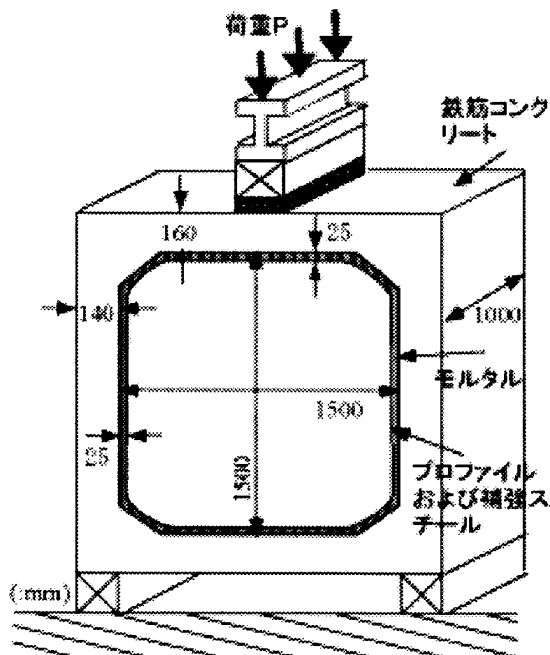


図-1 老朽原管ケース

*1 日本工営(株) 中央研究所 総合技術開発部 (正会員)
 *2 日本工営(株) 中央研究所 総合技術開発部 工博
 *3 日本工営(株) 首都圏事業部 都市基盤部 (正会員)
 *4 東京都下水道サービス(株) 技術部

表－1 供試体の概要および試験結果

管種	供試体記号	最大荷重 (kN/m)	最終載荷荷重 (kN/m)	老朽度 (/最大荷重)	備考
原管	A1	390.7	390.7	1.0	最大荷重まで載荷したもの
	A2	399.4	345.2	0.9	最大荷重以降、荷重が10%低下するまで載荷したもの
	A3	383.2	305.1	0.8	最大荷重以降、荷重が20%低下するまで載荷したもの
老朽原管 更生管	A1R	448.1			老朽原管A1を更生したもの
	A2R	408.0			老朽原管A2を更生したもの
	A3R	342.6			老朽原管A3を更生したもの
新品原管 更生管	A4R	442.7			新品原管を更生したもの
	A5R	427.0			新品原管を更生したもの
	A6R	408.1			新品原管を更生したもの



図－2 試験供試体と載荷条件

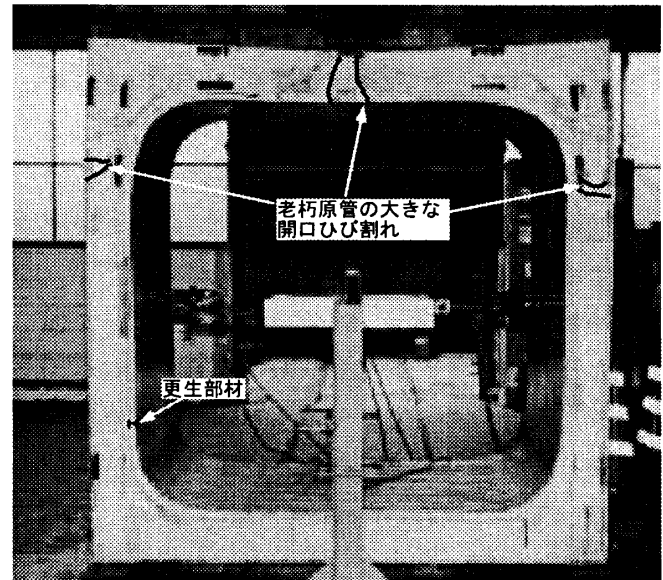
2.2 載荷条件と更生工法

実管渠において土かぶりの浅い場合に、頂版に大きな損傷が存在することが多いことに着目して、図－2に示すような載荷条件とした。

更生に関してはすべて同様な条件とし、更生工法については、老朽化した既設管渠と更生プロファイル部材（硬質塩化ビニル製）の間隙にポリマー系モルタルの充填材を注入して補強する工法として実用化されている複合管更生工法²⁾を用いた。原管および更生管の寸法は図－2に示す通りである。

2.3 試験結果

供試体の概要および試験結果を表－1に示



図－3 最大荷重時の老朽原管更生管の損傷状態

す。原管（A1～A3）の最大荷重はばらつきも少なく、平均で約 390kN/m であった。老朽原管には頂版や側壁ハンチ部付近で数mm程度の大きな開口ひび割れが存在し、同部の引張鉄筋は降伏ひずみに達していた。これらを更生した老朽原管更生管では、すべて図－3に示すように既存のひび割れが開口・進展して破壊が進行し、最大荷重は3供試体で最大約 100kN/mの差が生じた。最大荷重の約 80%まで耐荷力が低下した老朽原管 A3 供試体では、更生しても（供試体記号 A3R）新品原管の耐力にまで回復しなかったが、A1 および A2 については、更生すれば新品原管と同等以上の耐荷力にまで回復した

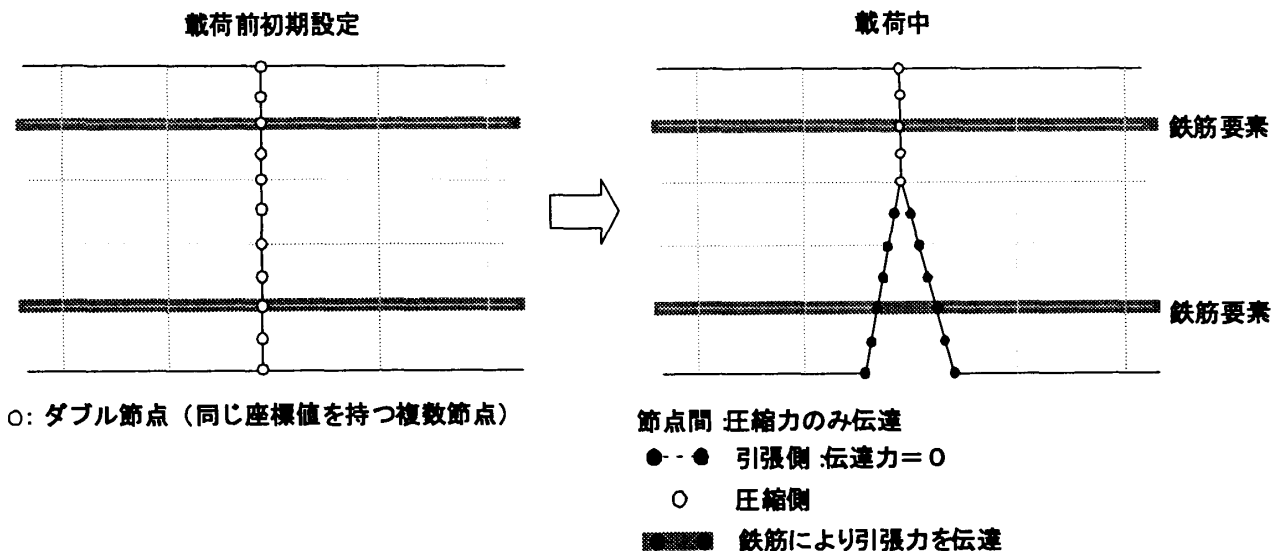


図-4 大きなひび割れを有する断面における擬似不連続面モデル

(供試体記号 A1R, A2R)。特に, 供試体 A1R は原管に大きなひび割れが存在するにもかかわらず, 新品原管を更生した供試体 A4R~A6R の最大荷重以上の耐荷力となった。これは, 両複合管の破壊プロセスの相違に起因するものと思われる。また, すべての更生管供試体において, コンクリートと更生モルタル部材の界面の付着状態は良好で, 最大荷重を超えるまでは, ほぼ一体化して機能していた。

3. 耐荷力評価

3.1 数値解析モデル

原管に大きなひび割れが存在するにもかかわらず, 新品原管を更生した供試体と同等の耐荷力を有した供試体 A1R について, 数値解析による耐荷力評価を行った。数値解析モデルは, コンクリートとモルタル材料の圧縮側および鉄筋材料は完全弾塑性材料とし, コンクリートおよびモルタル材料の引張側に関してはコンクリート標準示方書に示す引張軟化特性⁵⁾を考慮した。また, コンクリートと更生モルタル部材の界面では, 破壊試験において最大荷重に至るまでは剥離が見られなかったことから, 一体化するものとしてモデル化した。老朽原管に既に生じた開口ひび割れについては, 破壊試験結果に基づき, 頂版中央と側壁ハンチ部付近の最も大きな

表-2 材料物性値

材料	項目	数値	単位	試験・算出方法等
コンクリート	弾性係数	31.10	kN/mm ²	JISA1108 (強度試験)
	ポアソン比	0.22		
	圧縮強度	55.20	N/mm ²	JISA1113 (割裂試験) コンクリート標準示方書
	引張強度	3.92	N/mm ²	
	破壊エネルギー	111.33	N/m	
鉄筋	降伏応力	295.00	N/mm ²	公称値
	弾性係数	206.00	kN/mm ²	
更生モルタル	弾性係数	11.60	kN/mm ²	JISA1108 (強度試験)
	ポアソン比	0.13		
	圧縮強度	50.79	N/mm ²	JISA1113 (割裂試験) VOSの式 ³⁾
	引張強度	3.39	N/mm ²	
	破壊エネルギー	84.75	N/m	
補強スチール	降伏応力	210.00	N/mm ²	JISZ2241 (引張試験)に準拠
	弾性係数	170.00	kN/mm ²	

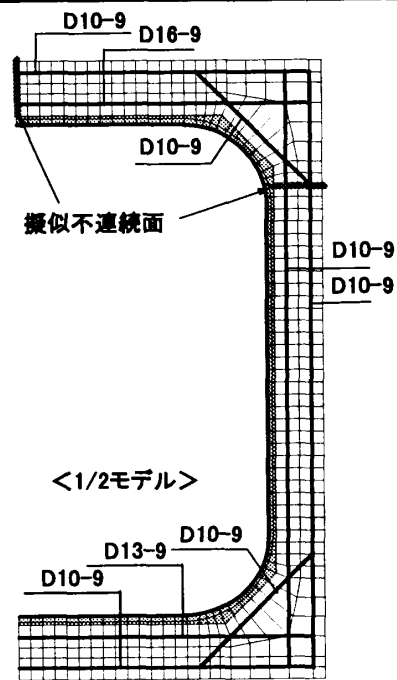


図-5 有限要素メッシュ図

2本の開口ひび割れに着目して、図-4に示すようなダブル節点を用いた擬似不連続面を用いてモデル化した。擬似不連続面内では引張軟化特性は考慮せず、コンクリートは圧縮力のみを伝達し、引張力は鉄筋のみを介して伝達するものとした。新たに発生するひび割れについては分布ひび割れモデル⁴⁾を用いて、ひび割れ解析を行った。また、鉄筋とコンクリートは一体化するものとした。表-2に材料の要素試験に基づき定めた材料特性値、図-5に老朽原管更生管の有限要素メッシュ図を示す。なお、数値解析は新品原管更生管(A4R~A6R)についても併せて実施し、著者らの既往の研究成果⁶⁾に基づき複合管としての耐荷力評価を行った。

3.2 数値解析結果および考察

表-3に実験および数値解析による老朽および新品原管更生管の最大荷重値を示す。数値解析による老朽原管更生管の耐荷力は実験値の約87%となった。新品原管更生管についても、実験値の約102%の耐荷力となり、両ケース共に良い精度で再現することができた。ここで、数

値解析結果は実験結果に反して、老朽原管更生管の最大荷重は新品原管更生管のそれより約10%低減したことに注目されたい。これは、実験では老朽原管の既存ひび割れは頂版、側壁各部材内で複数存在し、分散したのに対し、解析モデルでは頂版と側壁で各1本ずつと仮定したため、いわゆる破壊の局所化に起因したと思われる。

図-6に数値解析結果に基づく、各ケースの最大荷重時における頂版載荷点下の断面の節点力分布を示す。同図からわかるように、老朽原管更生管(A1R)と新品原管更生管(A4R~A6R)の頂版における中立軸の位置はほぼ等しい。しかし、引張力に関しては、新品原管更生管は更

表-3 老朽および新品原管更生管の最大荷重値

試験ケース		a:解析値 (kN/m)	b:試験値 (kN/m)	比率 (a/b)
老朽原管更生管	A1R	387.9	448.1	0.87
新品原管更生管	A4R~A6R の平均	435.2	425.9	1.02

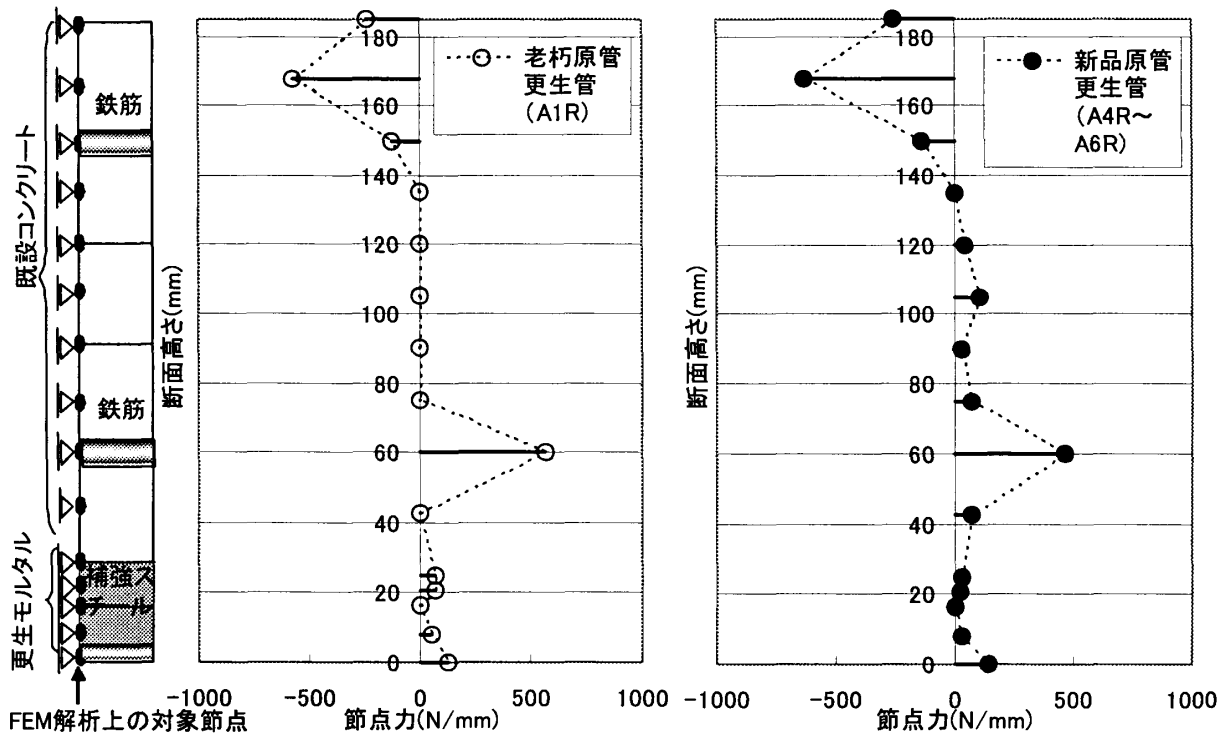


図-6 頂版載荷点下の断面の節点力分布 (老朽原管更生管および新品原管更生管)

生プロファイル内の補強スチールと既設コンクリート内引張鉄筋およびコンクリート材料の三者で抵抗しているのに対し、老朽原管更生管は更生プロファイル内の補強スチールと既設コンクリート内引張鉄筋のみで抵抗しており、相違が見られる。老朽原管更生管では、補強スチールと既設コンクリート内引張鉄筋の両者が降伏したが、新品原管更生管においては、コンクリートの引張力の影響で、最大荷重時の既設コンクリート内引張鉄筋は降伏せず、その応力は降伏応力の約 90% となった。このように、老朽原管更生管 A1R は新品原管更生管 A4R～A6R と比較して、引張側の抵抗メカニズムに相違はあるものの、頂版の最大曲げモーメントに大きく影響しなかったため、最大荷重の差も 10% 程度に留まったものと思われる。

以上の耐荷メカニズムによれば、損傷を有する RC ボックスカルバート原管を薄肉部材で更生する際の効果は、既設コンクリート内引張鉄筋の耐力に大きく依存するものと考えられる。そこで、老朽原管更生管 A2R および A3R についても数値解析を行い、引張鉄筋の残存断面積の影響について検証した。老朽原管 A2 および A3

では、最大荷重を超えて荷重が低下する過程で鉄筋のひずみが増大し、しぼりが生じ、断面積が減少していたものと推定できるため、老朽原管更生管 A2R および A3R について、試験結果の最大荷重の比率から、頂版既設コンクリート内引張鉄筋の断面積をそれぞれ新品原管の 90%、80% に減じてモデル化した。表-4 にすべての老朽原管更生管に関する最大荷重値を示す。数値解析は、すべてのケースで実験結果の 90% 程度の精度で最大荷重を再現することができた。図-7 に老朽原管更生管の最大荷重時における頂版載荷点下の断面の節点力分布を示す。すべてのケースで引張鉄筋位置の節点力は鉄筋耐力と等しく、更生モルタルの引張力は同様な傾向にあることから、各ケースの耐荷力は既設コンクリートの引張鉄筋の耐力に依存することが確

表-4 老朽原管更生管の最大荷重値

試験ケース		a:解析値 (kN/m)	b:試験値 (kN/m)	比率 (a/b)
老朽原管 更生管	A1R	387.9	448.1	0.87
	A2R	370.9	408.0	0.91
	A3R	331.6	342.6	0.97

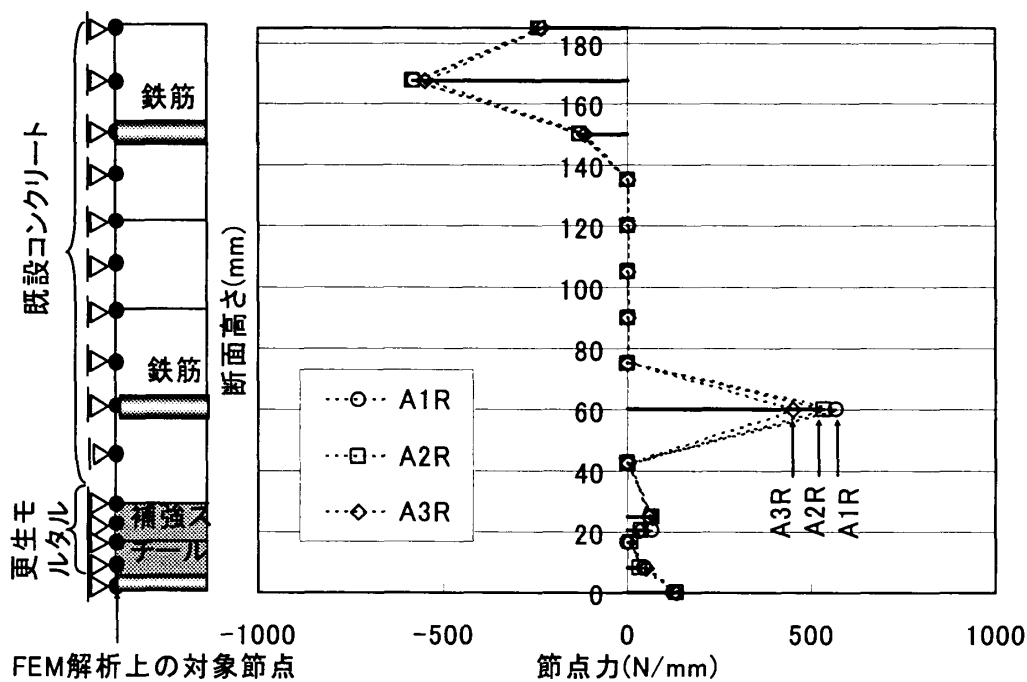


図-7 頂版載荷点下の断面の節点力分布 (老朽原管更生管)

認できる。また、A2R および A3R は A1R の耐荷力のそれぞれ約 95%、85%となり、鉄筋の断面積の比とは一致しない。これは、更生管における更生モルタルと補強スチールの効果によるものである。

以上の成果を踏まえると、更生設計においては以下の点に留意する必要があると考える。

- ・ 更生の効果は、既設管の損傷状態、特に引張鉄筋の残存断面積に大きく依存するため、既設管の老朽度調査において鉄筋に関する調査が重要である。
- ・ 更生管の耐荷力を確認する際には、非線形数値解析や破壊試験による方法が有効であるが、その際には既設管の老朽状態を適切に再現して評価する必要がある。

また、本研究においては、土かぶりが浅い RC ボックスカルバートを対象としたため、頂版への載荷荷重に対する終局耐荷力に着目して、実験・数値解析による耐荷力評価を行ったが、実設計においては、管渠の埋設条件に応じて、鉛直・水平土圧の影響を考慮する必要がある。さらに、本研究における破壊試験では既設管と更生部材との付着が良好であったが、供用下にある実管渠の老朽状態によっては、このような付着性状が期待できない場合もある。既設管と更生部材の付着の有無は耐荷力に大きな影響を及ぼすため、施工性や既設管の状況を考慮して確認することが重要である。

4. まとめ

本研究の成果を以下にまとめる。

- ・ 大きなひび割れを有する RC ボックスカルバート管渠を薄肉で更生した際の耐荷力は、既設管の損傷状態、特に引張鉄筋の残存断面積に大きく依存することがわかった。
- ・ 老朽原管更生管の定量的な耐荷力評価に関して、既存の損傷箇所を擬似不連続面としてモデル化し、分布ひび割れモデルの適用可能性を確認した。
- ・ 更生設計を行う際の留意点として、調査によ

る鉄筋の残存断面積の把握、既設管の埋設条件や施工性も踏まえた設計条件の設定、数値解析等に基づく既設管の残存耐荷力の把握等が重要となることを挙げた。

謝辞：本研究は東京都下水道サービス（株）、積水化学工業（株）および足立建設工業（株）による委託研究の一部であり、本稿における破壊試験を実施するにあたり、多大なご助力、ご意見をいただきました。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），pp.11-40，2001.6
- 2) 日本 SPR 工法協会：ハート SPR 技術資料，2002
- 3) VOS, E., Influence of loading rate and radial pressure on bond in reinforced concrete, Dissertation, Delft University, pp.219-220, 1983
- 4) 例 えば ， Shi, Z. and Nakano, M. :Three-dimensional finite element analysis on crack behaviors of RC cantilever decks, Construction and building materials 13 , pp.37-47, Mar.1999.
- 5) 土木学会：コンクリート標準示方書「構造性能照査編」，pp. 27-28，2002.3
- 6) Osako, K., Takahashi, H., Kitahashi, N., Akimoto, E., Nakatsui, K., Nakano, M., :Renovation technology and evaluation of load carrying capacity for sewage pipe renewal method, Proceedings of International Conference on Infrastructure Regeneration And Rehabilitation, pp.843-852, Jun.1999