

# 老朽下水道管渠の更生設計における 非線形FEM解析の適用

中野雅章<sup>1</sup>・師自海<sup>1</sup>・中谷浩平<sup>2</sup>

<sup>1</sup>日本工営（株）中央研究所（〒300-1259 茨城県つくば市稲荷原2304）

<sup>2</sup>日本工営（株）（〒102-8539 東京都千代田区麹町5丁目4番地）

老朽下水道管渠の更生においては、内面の更生部材が既設管と一体化するよう補強される複合管への期待が高まっている。しかし複合管は複合構造としての構造挙動が複雑なため、簡便な構造計算手法の適用性には課題が残されている。本稿では、複合管の耐荷力を精度良く評価し、安全な設計を実現するために、損傷過程を考慮した二次元非線形FEM解析を適用し、常時荷重および地震時荷重に対して照査した事例について紹介する。

**Key Words** : 下水道管, 更生設計, 非線形FEM解析, 分散ひび割れモデル, 耐震性能照査

## 1. はじめに

1884年の神田下水道の建設以来百余年を経過し、都市部では法定耐用年数50年を超えた老朽管が多く存在している。このような管の多くは、現在でも下水管としての機能を維持しているが、敷設後の上載荷重や土圧の変化、あるいは硫化水素による化学的腐食等により変状が生じている管も多い。また、これらの老朽管対策にあたっては道路交通に及ぼす影響、輻輳する地下埋設物の存在、経済性などの観点から、非開削工法による更生工法のニーズが高まり、近年、多くの工法が実用化されている。特に、老朽既設管の残存耐力を期待し、その内面の更生部材が既設管と一体化するよう補強された管は複合管と呼ばれ、安全性や設計流下能力保持の観点から合理的な更生管として期待されている。しかし、複合管の更生材料の材料特性は老朽既設管のそれとは異なるため、複合構造としての構造挙動が複雑となり、骨組解析のような簡便な構造計算手法の適用性には課題が残されている。本稿では、複合管の構造設計において、管の耐荷力を精度良く評価するために、代表的な更生工法であるSPR工法による更生管を例に、損傷過程を考慮した二次元非線形FEM解析を適用し、常時荷重および地震時荷重に対して照査した事例について紹介する。

## 2. 損傷過程を考慮した二次元非線形FEM解析

### (1) 分散ひび割れモデルの概要

RC構造物の終局耐荷力やレベル2地震動に対する

耐震性能照査を実施する上では、コンクリートのひび割れ発生・進展に伴う非線形挙動を考慮することが重要である。近年はこれに 대응するように、RC構造物の非線形解析技術、特に分散ひび割れモデルの適用が増加している。分散ひび割れモデルは、ひび割れを含む有限な領域内を連続体として考え、その影響を非可逆な材料特性の変化として扱う手法であり、ひび割れがRC構造物に与える巨視的な影響を評価するのに適している。複合管のように、老朽コンクリートと更生部材の異種部材が一体化する複雑な構造形式の破壊挙動を精度良く評価するために、著者らは、分散ひび割れモデル<sup>1)</sup>を用いた複合管のモデル化について検討し、既存の破壊試験結果を用いてその妥当性について検証した。

### (2) 実管渠サイズの外圧試験に基づく検証

代表的な更生工法であるSPR工法（図-1）は、スチール補強材を挿入したプロファイル（硬質塩化ビニール製帯状体）を既設管内にスパイラル状に供給

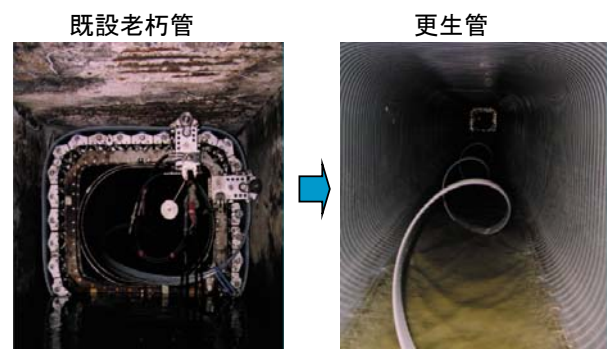


図-1 SPR工法による更生

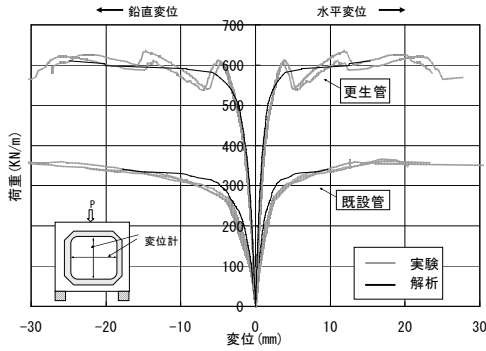


図-2 実験値と解析値の比較 (荷重-変位関係)

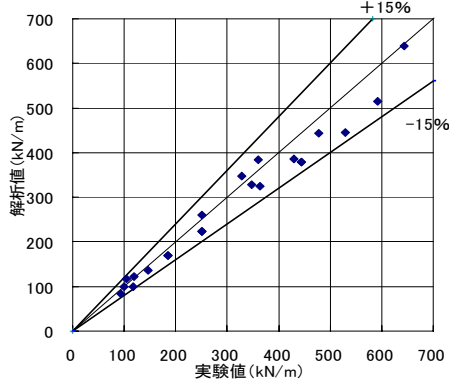


図-3 実験値と解析値の比較 (最大荷重)

して嵌合させ、既設管とプロファイルの間隙にレジン系モルタルを注入して強固な複合管に更生する工法である。SPR複合管では、異なるサイズの円形管と矩形渠について、各種劣化状態を人為的に再現した管とそれらを更生した管の破壊試験が多く実施されている<sup>2)</sup>。著者らは、これらについて分散ひび割れモデルに基づく二次元非線形FEM解析を実施して、解析手法の検証を行った。数値解析では、ひび割れに伴うかぶりコンクリートの欠落や鉄筋の腐食度等の既設管の老朽状態はFEM解析モデルにおける部材厚や要素の剛性低下に反映させ、SPR複合管のモデルでは、更生材料であるモルタルと補強スチールの特性を考慮した。数値解析は全22ケースの試験結果について、ひびわれ発生荷重と最大荷重に関して±15%以内の精度で再現でき、破壊に至るまでのひび割れ進展・変形挙動についても試験結果とほぼ一致したため、本解析モデルが複合管の耐荷力評価に適用できるものと判断した(図-2および図-3)。

### 3. 常時荷重に対する安全性照査

#### (1) 基本的な考え方

複合管の設計においては限界状態設計法を基本とする<sup>3)</sup>。構造解析では分散ひび割れモデルを用いた二次元非線形FEM解析を適用し、埋設条件下で交通荷重を対象とする増分荷重によって挙動解析を行うこととした。挙動解析に基づく設計の流れを図-4に示す。

使用限界状態に関しては、設計荷重下で新たなひび割れの発生を許容しないことで照査した。具体的

| ＜挙動解析＞                        |  |  |
|-------------------------------|--|--|
| 荷重STEP                        | ＜解析結果＞   |  |
| 荷重STEP1:                      | 死荷重+静止土圧   |  |
| 荷重STEP2:<br>破壊に至るまで<br>活荷重を増分 | 設計荷重 :<br>$P_{fd} = \lambda P_{fd}$<br>$\lambda = 1.0$                   | 応力状態から断面力を算出<br>⇒ 設計断面力: $S_d (= \gamma_s \gamma_r V$ および $\gamma_s \gamma_r M)$<br>VM: 挙動解析から求められる設計荷重時の断面力<br>$\gamma_s, \gamma_r$ : 構造解析係数および荷重係数           |
|                               | ひび割れ発生荷重:<br>$P_{fc} = \lambda_c P_{fd}$<br>$\lambda_c$ : ひび割れ発生時の荷重増分係数 | ひび割れ発生時の荷重増分係数 $\lambda_c$ を抽出   |
| ( $\lambda$ : 活荷重に関する荷重増分係数)  | 破壊荷重 :<br>$P_{fu} = \lambda_u P_{fd}$<br>$\lambda_u$ : 破壊荷重係数            | 応力状態から断面力を算出<br>⇒ 設計断面耐力: $R_d (= \gamma_m \gamma_b V_u$ および $\gamma_m \gamma_b M_u)$<br>$V_u, M_u$ : 挙動解析から求められる破壊時の断面力<br>$\gamma_m, \gamma_b$ : 材料係数および部材係数 |

| ＜照査＞   |                                     |   |
|--------|-------------------------------------|---|
| 使用限界状態 | $\lambda_c > 1.0$                   | $\lambda_c$ : ひび割れ発生荷重増分係数                            |
| 終局限界状態 | $\gamma_r \frac{S_d}{R_d} \leq 1.0$ | $\gamma_r$ : 構造物係数<br>$S_d$ : 設計断面力<br>$R_d$ : 設計断面耐力 |

図-4 挙動解析に基づく設計の流れ

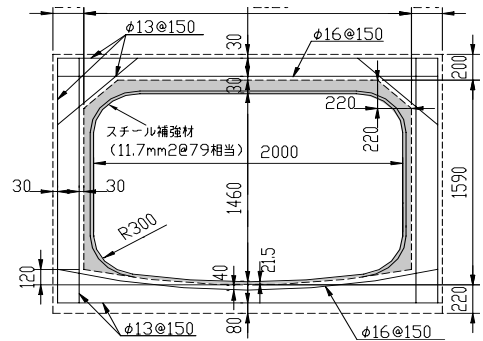


図-5 照査対象管渠

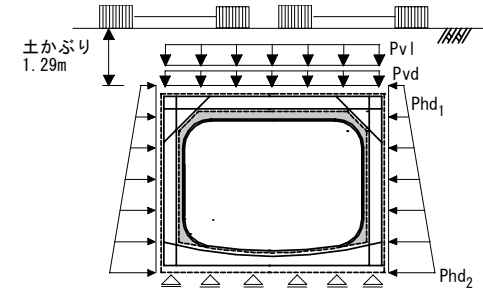


図-6 常時荷重条件

表-3 材料物性値と常時荷重条件

| 材料       | 項目      | 値                        | 材料        | 項目      | 値                        |
|----------|---------|--------------------------|-----------|---------|--------------------------|
| 既設コンクリート | 圧縮強度    | 24.6 N/mm <sup>2</sup>   | 更生裏込材     | 圧縮強度    | 12.0 N/mm <sup>2</sup>   |
|          | 引張強度    | 1.9 N/mm <sup>2</sup>    |           | 引張強度    | 1.8 N/mm <sup>2</sup>    |
|          | 弾性係数    | 25.3 kN/mm <sup>2</sup>  |           | 弾性係数    | 7.5 kN/mm <sup>2</sup>   |
|          | ポアソン比   | 0.2 -                    |           | ポアソン比   | 0.2 -                    |
|          | 単体重量    | 23.0 kN/m <sup>3</sup>   |           | 単体重量    | 12.0 kN/m <sup>3</sup>   |
|          | 破壊エネルギー | 85.0 N/m                 |           | 破壊エネルギー | 18.3 N/m                 |
| 鋼材       | 降伏応力    | 235.0 N/mm <sup>2</sup>  | 更生用スチール補強 | 降伏応力    | 210.0 N/mm <sup>2</sup>  |
|          | 弾性係数    | 200.0 kN/mm <sup>2</sup> |           | 弾性係数    | 170.0 kN/mm <sup>2</sup> |

にはひび割れ発生時の荷重増分係数が1.0を上回ることを確認した。

終局限界状態に関しては、設計断面力の設計断面耐力に対する比に構造物係数を乗じた値が1.0以下であることを確認した。設計断面力は、荷重係数を考慮した設計荷重下における応力状態から求めた部材の最大断面力に構造解析係数を乗じて求めた。また、最大荷重時の同箇所断面力を材料係数および

部材係数で除して設計断面耐力とした。本照査法では、設計断面耐力をRC部材の終局時のひずみと応力分布モデルからではなく、非線形FEM解析に基づき、複合管の終局限界状態における応力状態から算出することが特徴である。

(2) 照査事例

a) 解析条件等

対象の管は図-5に示すSPR複合管とし、設計流下能力を確保できる標準的な更生断面に対する照査を実施した。併せて同図に示す老朽管についても同様な照査を実施した。常時荷重条件を図-6に示す。設計活荷重はT-25荷重とし、管路が道路と並行に敷設されている条件とした。また、既設管調査結果に基づく対象管の材料条件を表-3に示す。

b) 解析結果

表-4にSPR複合管に関する照査結果について考慮した安全係数と共に示す。同表より、本更生管は使用限界状態ならびに終局限界状態に対して要求耐荷力を満足すると判断される。

表-4 安全係数および照査結果（終局限界状態）

| 使用限界状態に関する照査 |                                    | 2.9        |            |
|--------------|------------------------------------|------------|------------|
| ひび割れ発生荷重係数   |                                    | > 1.0 (OK) |            |
| 終局限界状態に関する照査 |                                    |            |            |
| 曲げモーメント      | ( $\gamma_f \times$ 設計荷重)時の発生断面力 M | 19.4       | 17.9       |
|              | 構造解析係数 $\gamma_a$                  | 1.1        | 1.1        |
|              | 設計断面力 Md                           | 21.3       | 19.69      |
|              | 最大荷重時の発生断面力 Mu                     | 97.4       | 90.3       |
|              | 材料係数 $\gamma_m$                    | 1.3        | 1.3        |
|              | 部材係数 $\gamma_b$                    | 1.3        | 1.3        |
|              | 設計断面耐力 Mrd                         | 57.6       | 53.4       |
|              | 構造物係数 $\gamma_i$                   | 1.1        | 1.1        |
|              | 照査 $\gamma_f Md / Mrd$             | 0.41       | 0.41       |
|              |                                    | < 1.0 (OK) | < 1.0 (OK) |
| せん断力         | ( $\gamma_f \times$ 設計荷重)時の発生断面力 V | 47.9       | 25.4       |
|              | 構造解析係数 $\gamma_a$                  | 1.1        | 1.1        |
|              | 設計断面力 Vd                           | 52.7       | 27.9       |
|              | 最大荷重時の発生断面力 Vu                     | 192.3      | 72.5       |
|              | 材料係数 $\gamma_m$                    | 1.3        | 1.3        |
|              | 部材係数 $\gamma_b$                    | 1.3        | 1.3        |
|              | 設計断面耐力 Vrd                         | 113.8      | 42.9       |
|              | 構造物係数 $\gamma_i$                   | 1.1        | 1.1        |
|              | 照査 $\gamma_f Vd / Vrd$             | 0.51       | 0.72       |
|              |                                    | < 1.0 (OK) | < 1.0 (OK) |

4. レベル2地震動に対する安全性照査

(1) 基本的な考え方

構造物が損傷することを想定するレベル2地震動に対する照査においては、要求性能である「流下機能の確保」に関する照査方法として、「コンクリート標準示方書」【設計編】<sup>4)</sup>の考え方を適用した。すなわち、地盤-構造物の連成解析を適用し、分散ひび割れモデルに基づく非線形動的応答解析による耐震性能照査を実施し、同示方書で示す耐震性能2について照査した。図-7にレベル2地震動に対する複合管の耐震性能照査フローを示す。照査に用いる安全係数は表-5に示す値とした。

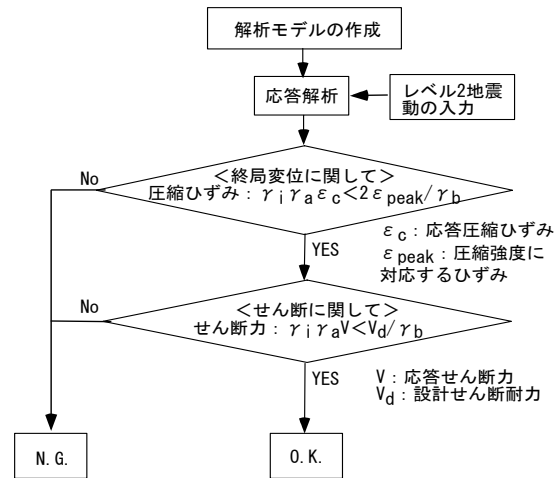


図-7 非線形動的応答解析に基づく複合管の耐震性能照査フロー

表-5 照査に用いる安全係数

| 耐震性能  | 安全係数 | 材料係数 $\gamma_m$   |               | 部材係数 $\gamma_b$      | 構造解析係数 $\gamma_a$ | 荷重係数 $\gamma_f$ | 構造物係数 $\gamma_i$ |
|-------|------|-------------------|---------------|----------------------|-------------------|-----------------|------------------|
|       |      | コンクリート $\gamma_c$ | 鋼材 $\gamma_s$ |                      |                   |                 |                  |
| 耐震性能2 | 応答値  | 1.0               | 1.0           | 1.0                  | 1.0               | 1.0             | 1.0              |
|       | 限界値  | 1.3               | 1.0           | 1.0*<br>1.3 or 1.7** |                   |                 |                  |

\*変位の限界値に関して、\*\*せん断耐力の算定に関して

(2) 耐震性能照査例

a) 解析条件等

常時荷重に対して要求耐荷力を満足した前述のSPR複合管と老朽管について、レベル2地震動に対する安全性照査を行った。土質条件を表-6に示す。考慮する荷重は静止土圧と自重による死荷重及び地震荷重とする。照査用地震動は、図-8に示す「コンクリート標準示方書」【設計編】に記載の解放基盤におけるレベル2地震動模擬波形とし、基盤面から入力した。解析は、過去に多くの適用実績があり、分散ひび割れモデルに基づくRC要素とOsakiモデルに基づくせん断非線形性を導入した地盤要素を併用可能な二次元FEM解析ツールであるUC-win/WCOMD<sup>5)</sup>を用いた。

b) 解析モデル

モデル化する範囲は、構造物と地盤の動的相互作用の影響が十分小さくなる遠方地盤までとし、モデルの側方境界は地震波の反射を吸収できる混合境界を用いた。また、解放基盤における地震動波形を用

表-6 土質条件

| 土質     | 深度 (m) | 層厚 (m) | N値  | 土かぶり: 2.0m |           |
|--------|--------|--------|-----|------------|-----------|
|        |        |        |     | Vs (m/sec) | 特性値 TG(s) |
| 1 砂質粘土 | 0.5    | 0.5    | 5   | 172.7      | 0.003     |
| 2 砂    | 3.3    | 2.8    | 15  | 230.1      | 0.012     |
| 3 砂    | 9      | 5.7    | 32  | 311.5      | 0.018     |
| 4 シルト  | 16.4   | 7.4    | 25  | 328.8      | 0.023     |
| B 砂礫   | -      | -      | >50 | 400.0      | -         |
| Σ      |        | 16.4   |     |            | 0.223     |

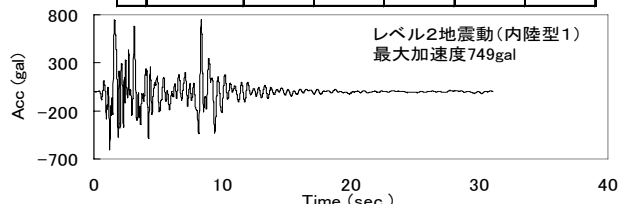


図-8 照査対象レベル2地震動

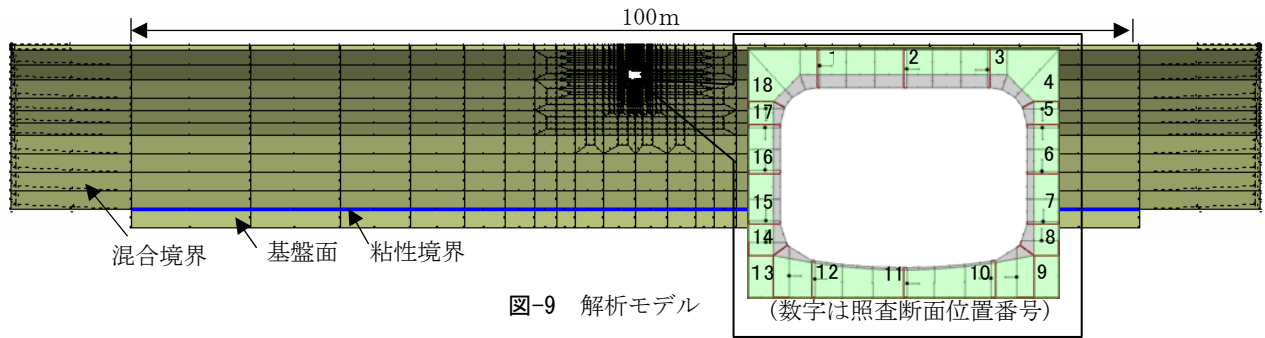


図-9 解析モデル

いるため、下端では粘性境界を設けた。構造物と地盤の接触面は強震時の相対的な運動差に伴う剥離やすべり現象が生じることが考えられるが、ここでは、一般的に安全側な評価となるように一体化してモデル化することとした。また、SPR工法における補強スチールについては、モデル上では考慮せず、限界値の算定において考慮することとした。複合管の照査に用いた解析モデルおよびせん断に関する断面照査位置を図-9に示す。

c) 解析結果

解析結果から、地震時同時刻における老朽既設管およびSPR複合管に発生したひび割れ状況を図-10に示す。更生による増厚効果により特に隅角部のひび割れ発生が抑制されたことがわかる。また、両管共に地震荷重によるひび割れに伴う変形は小さい範囲に留まり、断面内の最大圧縮ひずみは、終局変位に対する限界値相当の圧縮ひずみ(4.0E-3)以下となった。

老朽既設管およびSPR複合管のせん断に関する照査結果を表-7に示す。SPR複合管のせん断に関する限界値(耐力)は同工法の複合部材に関するせん断耐力試験結果に基づくせん断強度から算出した。既設管では、左右側壁と底版隅角部で応答値が限界値を超過し、せん断破壊する可能性がある。SPR複合管については、既設管と比較して剛性が増すことから、応答値は既設管よりも大きくなるが、更生効果によってせん断耐力が増すため、限界値以下となった。

以上の結果から、本老朽既設管では耐震性能を満足しないが、SPR工法による更生管は耐震性能を満足することを確認した。また、更生管の底版では応答値が限界値の97%に達していることから、これ以上薄肉にすることは適切ではなく、本検討断面は設計更生断面として、合理的であると考えられる。

5. おわりに

老朽下水道管渠の更生設計において、複合管に関する構造計算手法が確立されていない現状を受け、本稿では、損傷過程を考慮した非線形FEM解析を適用した照査例を示した。同手法は、ひび割れに伴う複合管の複雑な構造挙動も追跡可能となり、精度の高い性能照査手法として期待できるものと思われる。

謝辞：本稿の執筆にあたり、SPR工法の開発社である東京都下水道サービス(株)様、積水化学工業

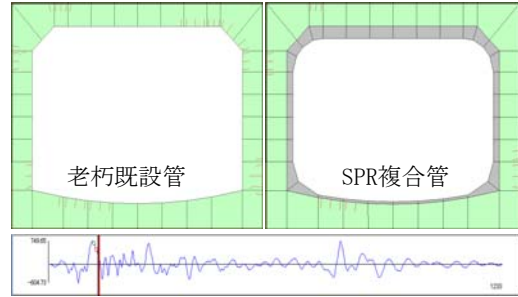


図-10 地震時のひび割れ発生状況 (1.37秒後)  
表-7 せん断に関する照査結果

| 解析ケース    | 既設管         |             |        |        | SPR更生管      |             |        |        |      |     |
|----------|-------------|-------------|--------|--------|-------------|-------------|--------|--------|------|-----|
|          | a.照査<br>応答値 | b.照査<br>限界値 | a/b    | 判定     | a.照査<br>応答値 | b.照査<br>限界値 | a/b    | 判定     |      |     |
| せん断力(kN) | 頂版          | 1           | 68.94  | 0.74   | O.K         | 80.88       | 380.23 | 0.21   | O.K  |     |
|          |             | 2           | 34.31  | 93.25  | 0.37        | O.K         | 48.82  | 380.23 | 0.13 | O.K |
|          |             | 3           | 51.15  |        | 0.55        | O.K         | 58.43  |        | 0.15 | O.K |
|          | 右側壁         | 4           | 49.37  |        | 0.80        | O.K         | 61.61  | 387.74 | 0.16 | O.K |
|          |             | 5           | 49.19  |        | 0.79        | O.K         | 68.46  |        | 0.29 | O.K |
|          |             | 6           | 62.67  | 62.09  | 1.01        | NG          | 82.86  | 239.89 | 0.35 | O.K |
|          |             | 7           | 80.68  |        | 1.30        | NG          | 100.00 |        | 0.42 | O.K |
|          |             | 8           | 89.83  |        | 1.45        | NG          | 102.16 | 296.51 | 0.34 | O.K |
|          |             | 9           | 112.82 | 102.22 | 1.10        | NG          | 123.24 | 180.70 | 0.68 | O.K |
|          | 底版          | 10          | 89.40  |        | 1.06        | NG          | 101.76 |        | 0.97 | O.K |
|          |             | 11          | 48.72  | 84.35  | 0.58        | O.K         | 58.77  | 104.70 | 0.56 | O.K |
|          |             | 12          | 70.62  |        | 0.84        | O.K         | 78.00  |        | 0.74 | O.K |
|          |             | 13          | 95.12  | 102.22 | 0.93        | O.K         | 101.73 | 180.70 | 0.56 | O.K |
|          | 左側壁         | 14          | 62.60  |        | 1.01        | NG          | 68.08  | 387.74 | 0.18 | O.K |
|          |             | 15          | 59.57  |        | 0.96        | O.K         | 70.76  |        | 0.29 | O.K |
|          |             | 16          | 65.32  | 62.09  | 1.05        | NG          | 76.91  | 239.89 | 0.32 | O.K |
|          |             | 17          | 69.17  |        | 1.11        | NG          | 79.82  |        | 0.33 | O.K |
|          |             | 18          | 74.67  |        | 1.20        | NG          | 82.34  | 296.51 | 0.28 | O.K |
| 照査結果     | NG          |             |        |        | O.K         |             |        |        |      |     |

鉄筋降伏部位(部材係数  $\gamma_b=1.7$ 採用)

(株)様および足立建設工業(株)様に多大なご助力をいただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 例えば, Shi, Z. and Nakano, M. Three-dimensional finite element analysis on crack behaviors of RC cantilever decks. Construction and Building Materials, 1999; 13: 33-47.
- 2) Osako, K. and Itoh, M. Renewal of sewage structures using the SPR method. Civil Engineering Journal, 1998; 39 (10): 8-14.
- 3) 社団法人日本下水道協会, : 管更生の手引き(案), 2001. 6
- 4) (社)土木学会: コンクリート標準示方書【設計編】, 2008. 3
- 5) 例えば, 岡村甫, 前川宏一, 「鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則」, 技報堂出版 1991. 5