

## 第5回 複合管の考え方

### 1. はじめに

本連載講座「管路更生の設計手法入門」では、第2回において「埋設管に作用する外圧の種類」を、第3回「自立管の考え方」を、第4回「二層構造管の考え方」と解説してきたが、第5回の本稿においては「複合管の考え方」と題して、複合管の設計手法について解説を行う。

下水道管きょにおける管路更生の設計および施工に関する標準的な考え方は、平成13年6月に(社)日本下水道協会から発刊された「管更生の手引き(案)」<sup>1)</sup>に初めて公に示された。また、本年6月には同協会から「管きょ更生工法における設計・施工管理の手引き」(暫定版)<sup>2)</sup>が発刊され、今後ますます管更生に関わる注目度は高まる一方ではないかと推測される。

### 2. 複合管とは

管路更生工法の分類を図-1に示す。

「管更生の手引き(案)」では、“複合管”とは、「既設管とその内側の更生材が一体となって外力に抵抗するものとし、新管と同等以上の耐荷能力および耐久性を有するものとする。」と記載されている。

既設管とその内側の更生材が一体となって土圧等の外力に抵抗するという事は、外力によって発生する更生材と既設管の界面におけるひずみの挙動が既設管と連続し、かつ破壊状態が既設管と更生材の界面剥離でなく、母材で破壊する状態を示している。

図-2は、複合管が既設管と更生材が一体化した状態のひずみの分布を示している模式図である。中

図はひずみの分布が既設管と更生材とでも連続して一体化しているのに比べ、一体化していない場合はその右図のようにひずみは連続せずにそれぞれの部材の分布になっており、複合管としての条件を満たしていないことを示している。

複合管は、剛性管である既設管の構造の一部を成しており、またモルタルなどの充填材を使用することから、剛性管として取り扱い、対比させる新管は「下水道用鉄筋コンクリート管(JSWAS A-1)」(日本下水道協会)<sup>3)</sup>となる。

### 3. 複合管の設計

#### 3-1. 適用範囲

製管工法で更生される複合管の適用範囲は、既設管である鉄筋コンクリート管の破壊強度が鉄筋の仕様で決まることから、既設管の鉄筋が全面的および軸方向に連続して欠落していない場合としている。

ただし、鉄筋等を補強して耐荷能力を確認できる場合は、複合管の適用範囲としている。

#### 3-2. 複合管の設計概要

複合管は既設管と更生材との一体構造であるので、一般的な構造計算に用いる許容応力度設計法で評価することが難しい。したがって、複合管の構造設計計算は、既設管の劣化状態を反映し、複合管の終局耐荷力を評価できる限界状態設計法で行うことを原則としている。

なお、既設管の調査ができない場合の構造計算は、残存強度等を適切に判断して行うことが難しい



図-1 管路更生工法の分類

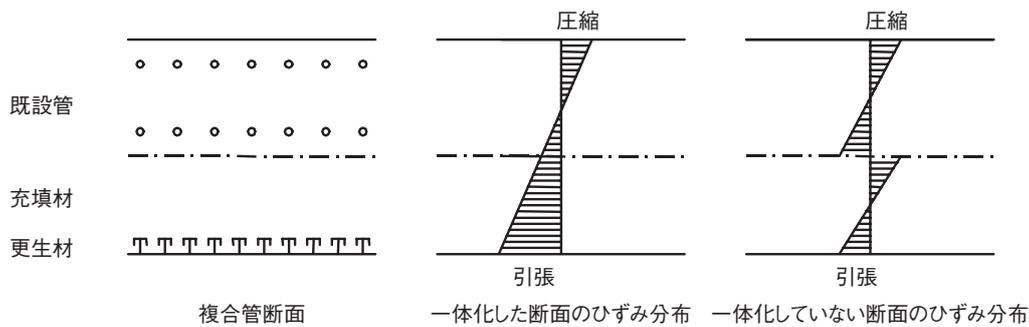


図-2 複合管のひずみ模式図

ため、外圧試験によって新管と同等以上の耐荷能力を確認すれば、構造計算を省略できるとしている。

このように、複合管の構造設計計算は限界状態設計法で行うことを原則としているのだが、未だ限界状態設計法についてはなじみがない方もおられると思ひ、次に限界状態設計法の解説を許容応力度設計法と併せて行う。

### 3-3. 許容応力度設計法と限界状態設計法<sup>4)</sup>

わが国におけるコンクリート構造物の設計手法は、これまで久しく許容応力度設計法 (allowable stress design method) が用いられてきたが、1986年より限界状態設計法 (limit state design method) が導入された。

#### 3-3-1 許容応力度設計法

許容応力度設計法では、鉄筋は弾性体、コンクリートは引張に対する抵抗力を無視した弾性体と仮定することから始まる。この仮定のもとに、設計荷重が作用したときの各材料に生じる最大応力が許容応力度以下におさまっているか確かめる方法である。

このときの基本的手順は、図-3のように示すことができる。まず、対象とする構造物からは、与えられた作用荷重 (外力)  $F_k$  に対して、部材の断面力 (曲げモーメント、せん断力など)  $S$  が求まり、各材料 (コンクリート、鉄筋) に生じる応力度  $\sigma$  が得られる。一方、これとは別に使用される材料と同じ品質のものの強度試験からコンクリート圧縮強度、鉄筋の降伏強度が与えられ、これを設計基準強度 (材料強度の特性値)  $f_k$  とし、さらに十分な安全性を見込んだ安全率  $\gamma$  で除することにより、許容応力度  $\sigma_a$  が得られる。そして、材料応力度が許容応力度を越えないこと、すなわち

$$\sigma \leq \sigma_a = f_k / \gamma \quad (\text{式 3-1})$$

を確認するものである。

許容応力度設計法は、弾性解析であるため比較的簡便であり、だれにでもわかりやすい設計法として長い間用いられてきた。しかし、この設計法にはいくつもの欠点のあることがよく指摘されており、それは次の2点に要約できる。

- ① 許容応力度と対比・比較される材料の作用応力度が必ずしも断面力に比例しないので、部材崩壊に対する安全度を必ずしも合理的にあるいは直接的に表現できない。
- ② 荷重に対する安全性も含めてすべての安全係数を材料の許容応力度のみによって扱っているが、荷重の変動、材料のばらつき、構造解析上の不確実性は互いに次元の異なるものである。

このような欠点を克服するため終局強度設計法、さらには限界状態設計法が提唱され、多くの国で採用されている。

#### 3-3-2 限界状態設計法

限界状態設計法は、構造物がその状態に達すると崩壊したり、使用できなくなったりする限界状態を設定し、それに対する安全性を照査するものである。その特徴は、荷重に対する安全係数と材料に対する安全係数を分離して考え、最終的に曲げモーメント、ねじりモーメントなどの断面力のレベルで対比することにある (図-4)。

同図に従って説明すると、まず対象構造系に対して、各種の荷重の特性値  $F_k$  を組み合わせて設計荷重を設定する。この荷重が作用したときの断面力を構造解析によって算出し、さらに安全側に割増したものが設計断面力  $S_d$  となる。一方、耐荷力としては、材料強度  $f_k$  からばらつきを考慮して若干割引いた値が材料の設計強度  $f_d$  であり、これを用いて計算された断面耐力を部材係数  $\gamma_b$  で除したものが設計断面耐力  $R_d$  となる。そして、設計断面力  $S_d$  対

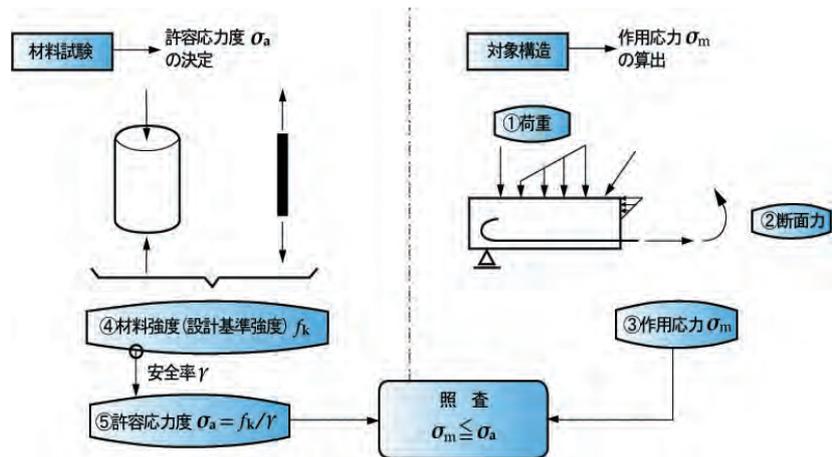


図-3 許容応力度設計法における設計手順<sup>5)</sup>

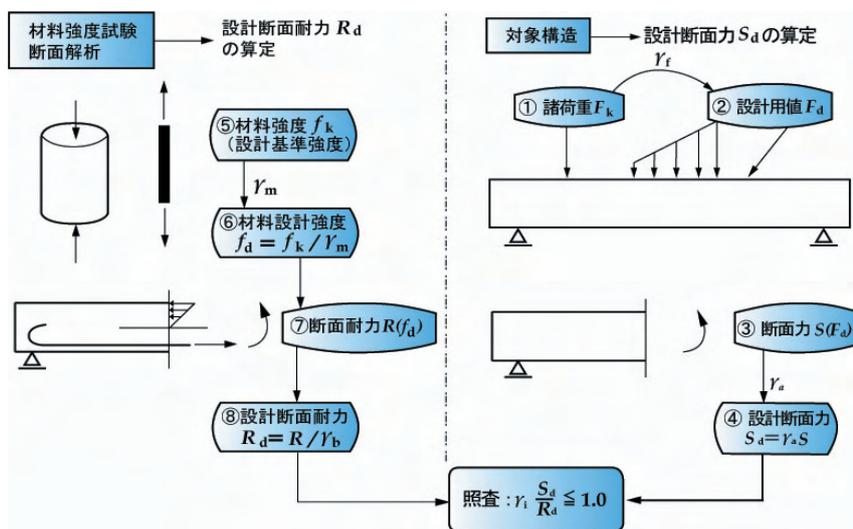


図-4 限界状態設計法における設計手順（終局状態の場合）<sup>5)</sup>

する設計断面耐力  $R_d$  の比をとり、

$$\gamma_i \frac{S_d}{R_d} \leq 1.0 \quad (\text{式 3-2})$$

を満足すればよい。ここで、 $\gamma_i$  は構造物係数と呼ばれ、言わば最終的な安全係数で、その構造物の重要度・社会的影響度を考慮して設定される。構造物係数をいくつに設定したらよいかについては構造物の重要度によって異なるが、ここで大切なのは、その値が 1.0 でも安全性に対する余裕がある程度確保されていることである。なぜならば、設計断面力  $S_d$  の算出に至るまでに安全をみて“割増して”いるのに対して、設計断面耐力  $R_d$  については少し“控えめ”に計算してあるからである。

### 3-4. 限界状態と安全係数<sup>4)</sup>

#### 3-4-1 限界状態

限界状態設計法では、検討すべき限界状態 (limit

state) を設定することから始まる。「構造物がどのようなになったらよくないのか」ということで、まず思い浮かぶのは「壊れてしまう」ということで、これを終局限界状態という。図-4はこのときの設計手順を示したもので、断面を決定する最も基本的な限界状態である。

土木学会による現行設計法では、これを含め次の3つの限界状態が区分されている。すなわち使用限界状態、終局限界状態、疲労限界状態で、設計しようとする構造物がこれらに対して大丈夫（安全）かどうか、個々に（独立に）チェックする必要がある。

- ① 使用限界状態 (serviceability limit state)  
通常の使用または耐久性に関連する限界状態。
- ② 終局限界状態 (ultimate limit state)  
その部材や断面の最大耐荷力に対する限界状態。
- ③ 疲労限界状態 (fatigue limit state)  
多数回の繰り返し荷重により、疲労破壊を生じる状態。



表-2 安全係数

安全係数 限界状態	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 $\gamma_s$				
終局限界状態	1.3	1.0 または 1.05	1.0	1.0	1.0 > 1.2	1.0 > 1.2

による鉛直土圧と活荷重による鉛直土圧の総和とする。鉛直土圧は既設管の設計時の算定式を基本とするが、通常、垂直公式やテルツァギー公式を用いる場合が多い。公式の詳細については本連載講座の第2回<sup>7)</sup>に紹介されているため、ここでは省略する。

### 3-5-3 断面力“ $S(F_d)$ ”の算定

各荷重によって生じる曲げモーメントの和による断面力は、同様に「下水道用鉄筋コンクリート管 (JSWAS A-1)」<sup>3)</sup>に準じ、次式から求める。あるいは骨組み解析法により求めることもある。

$$M = k \cdot q \cdot R^2 = S(F_d) \quad (\text{式 3-7})$$

ここに、 $M$  : 管体に生じる最大曲げモーメント (kN・m)

$k$  : 支承条件による係数

$q$  : 管にかかる荷重 (kN/m<sup>2</sup>)

$R$  : 管厚中心半径 (m)

### 3-5-4 設計断面力“ $S_d$ ”の算定

設計断面力  $S_d$  は、断面力  $S(F_d)$  に構造解析係数  $\gamma_a$  を乗じた値となる。

$$S_d = \gamma_a \cdot S(F_d) \quad (\text{式 3-8})$$

### 3-5-5 設計断面耐力“ $R_d$ ”の算定

設計断面耐力の算定は、図-5に示す断面および終局限界状態の応力分布に基づいて行う。

既設管コンクリートの圧縮応力度は等価応力ブロックと仮定し、等価応力ブロックの高さは圧縮端から中立軸までの距離の80%、大きさは設計圧縮強度の85%とする。

#### (1) 材料強度の設計値の算定

既設管の劣化状態を考慮するため、材料強度の設計値は、既設管設計時の材料強度の特性値に残存強度を考慮した数値を材料係数で除したものとする。

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_{mc}} \quad (\text{式 3-9})$$

$$f'_{sd} = \frac{f'_{sk}}{\gamma_{ms}} \quad (\text{式 3-10})$$

$$f_{sd} = \frac{f_{sk}}{\gamma_{ms}} \quad (\text{式 3-11})$$

$$f_{gd} = \frac{f_{gk}}{\gamma_{mg}} \quad (\text{式 3-12})$$

$$f_{fd} = \frac{f_{fk}}{\gamma_{mf}} \quad (\text{式 3-13})$$

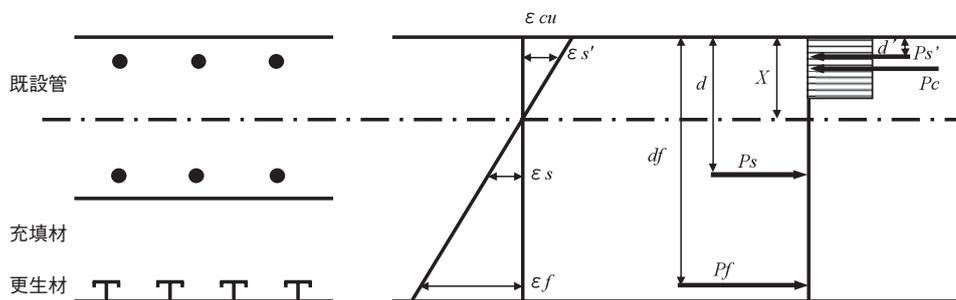
ここに、 $f_{cd}$  : 既設管コンクリートの設計強度 (N/mm<sup>2</sup>)

$f'_{sd}$  : 既設管外周鉄筋の設計強度 (N/mm<sup>2</sup>)

$f_{sd}$  : 既設管内周鉄筋の設計強度 (N/mm<sup>2</sup>)

$f_{gd}$  : 充填材の設計強度 (N/mm<sup>2</sup>)

$f_{fd}$  : 更生材の設計強度 (N/mm<sup>2</sup>)



ここに、 $\epsilon_{cu}$  : 既設管コンクリートの終局ひずみ

$\epsilon_{s'}$  : 既設管外周鉄筋の降伏ひずみ

$\epsilon_s$  : 既設管内周鉄筋の降伏ひずみ

$\epsilon_f$  : 更生材の降伏ひずみ

$P_c$  : 既設管コンクリートの圧縮合力 (kN)

$P_{s'}$  : 既設管外周鉄筋に発生する力 (kN)

$P_s$  : 既設管内周鉄筋に発生する力 (kN)

$P_f$  : 更生材に発生する力 (kN)

$X$  : 中立軸の位置 (mm)

$d'$  : 既設管外周鉄筋の圧縮端からの距離 (mm)

$d$  : 既設管内周鉄筋の圧縮端からの距離 (mm)

$df$  : 更生材の位置 (mm)

図-5 複合管断面とひずみ-応力分布図

$f_{ck}$  : 既設管コンクリートの特性値(N/mm<sup>2</sup>)  
 $f'_{sk}$  : 既設管外周鉄筋の特性値 (N/mm<sup>2</sup>)  
 $f_{sk}$  : 既設管内周鉄筋の特性値 (N/mm<sup>2</sup>)  
 $f_{gk}$  : 充填材の特性値 (N/mm<sup>2</sup>)  
 $f_{fk}$  : 更生材の特性値 (N/mm<sup>2</sup>)  
 $\gamma_{mc}$  : コンクリートの材料係数  
 $\gamma_{ms}$  : 鉄筋の材料係数  
 $\gamma_{mg}$  : 充填材の材料係数  
 $\gamma_{mf}$  : 更生材の材料係数

## (2) 中立軸の位置 “X” の算定

中立軸の位置  $X$  の算定は、図-5 より力の釣り合い条件を満足する次式より行う。

$$P_c + P_s' - P_s - P_f = 0 \quad (\text{式 3-14})$$

ここで、  $P_c = 0.68 \cdot f_{cd} \cdot x \cdot b$

$$P_s' = A_s' \cdot \sigma_s'$$

$$P_s = A_s \cdot \sigma_s$$

$$P_f = A_f \cdot \sigma_f$$

ここに、  $b$  : 基準幅 (mm)

$A_s'$  : 既設管外周鉄筋量 (mm<sup>2</sup>)

$A_s$  : 既設管内周鉄筋量 (mm<sup>2</sup>)

$A_f$  : 更生材量 (mm<sup>2</sup>)

$\sigma_s'$  : 既設管外周鉄筋の応力度 (N/mm<sup>2</sup>)

$\sigma_s$  : 既設管内周鉄筋の応力度 (N/mm<sup>2</sup>)

$\sigma_f$  : 更生材の応力度 (N/mm<sup>2</sup>)

## (3) 断面耐力 “ $R(f_d)$ ” の算定

中立軸の位置  $X$  より、終局曲げモーメント  $M_u$  を求め、断面耐力  $R(f_d)$  とする。

## (4) 設計断面耐力 “ $R_d$ ” の算定

次式より設計断面耐力  $R_d$  を求める。

$$R_d = \frac{R(f_d)}{\gamma_b} \quad (\text{式 3-15})$$

ここに、  $\gamma_b$  : 部材材料係数

## 3-5-6 安全性の照査

複合管の安全性の照査は、設計断面力  $S_d$  を設計断面耐力  $R_d$  で除した値に構造物係数  $\gamma_i$  を乗じた値が 1.0 以下であることを確かめる。

$$\gamma_i \frac{S_d}{R_d} \leq 1.0 \quad (\text{式 3-2})$$

## 4. おわりに

本稿は“複合管の考え方”として、主に構造設計計算方法について、限界状態設計法の解説と共に紹介した。特に、3-3 および 3-4 については、吉川弘道著「鉄筋コンクリートの解析と設計」から抜粋させていただいた。

複合管は既設管を生かして更生する管体であるため、既設管の状態を正確に把握する必要があり、今後の調査方法の機械化等により、統一した評価方法基準の作成が望まれる。

今回は、本連載講座の最終として、「圧送管の考え方」の説明を行う。

## 【参考図書】

- 1) 「管更生の手引き (案)」平成13年6月 (社)日本下水道協会
- 2) 「管きよ更生工法における設計・施工管理の手引き (暫定版)」平成19年6月 (社)日本下水道協会
- 3) 「下水道用鉄筋コンクリート管 (JSWAS A-1)」平成15年2月 (社)日本下水道協会
- 4) 「鉄筋コンクリートの解析と設計 限界状態設計法と性能設計法」吉川弘道著 丸善(株)
- 5) 「改めて考える性能設計」吉川弘道 ホームページより
- 6) 「2002年制定 コンクリート標準示方書 [構造性能照査編]」平成14年12月 (社)土木学会
- 7) 「管路更生 No. 2」2007年4月 日本管路更生工法品質確保協会

## 連載講座小委員会

委員長	宮川 恒夫	EX ダンビー協会・技術委員
委員	安井 聡	FFT 工法協会・技術委員
委員	池ヶ谷貴之	オールライナー協会・技術委員
委員	上垣 潔志	パルテム技術協会・技術部長
委員	眞田 和彦	光硬化工法協会・技術委員長