

経年管の残存強度を考慮した設計用値の試算

中日本建設コンサルタント㈱ ○飯嶋 隆之、中根 進

管更生工法における複合管の設計では、既設管の残存強度を適切に評価する必要があり、大口径の管きよでは材料をサンプリングしてその物性値を試験で求めることも可能であるが、現場状況によって困難なことも多い。本稿では、経年管の材料試験や外圧試験結果を文献から引用して、設計に用いる残存強度を考慮した物性値(コンクリート圧縮強度)を試算した。

Key Words : 残存強度、外圧試験、コンクリート圧縮強度、設計用値

1. はじめに

鉄筋コンクリート管の更生工法の選定及び設計に際し、経年管の残存強度を把握することが必要となる。筆者は、腐食による管厚の減少に伴うひび割れ抵抗曲げモーメントの低下を残存強度として文献¹⁾に示した。

しかし、経年管の管厚の減肉が認められなくても外圧試験強度の低下⁶⁾が認められており、残存強度を適切に評価する必要がある。

大口径の管きよでは材料のサンプリングが可能で、材料の物性値(コンクリート圧縮強度、鉄筋引張強度など)を把握することができるが、腐食環境下や流下量が多い管内環境では、サンプリングも困難である。

複合管の設計においては、経年管の残存強度を材料物性値の低下で表して利用している。

本稿では、減肉がない鉄筋コンクリート管の残存強度を考慮した経年管の材料物性値を既往の文献の所見を利用して試算した。

2. 既往文献による遠心力鉄筋コンクリート管と鉄筋の規格値

2.1 遠心力鉄筋コンクリート管の規格値

遠心力鉄筋コンクリート管(以下ヒューム管という)の耐荷力は、時代の経過とともに高まってきている。JIS や日本下水道協会規格(JSWAS)から1種管を選定した場合のひび割れ保証荷重の推移を図-1に示す。

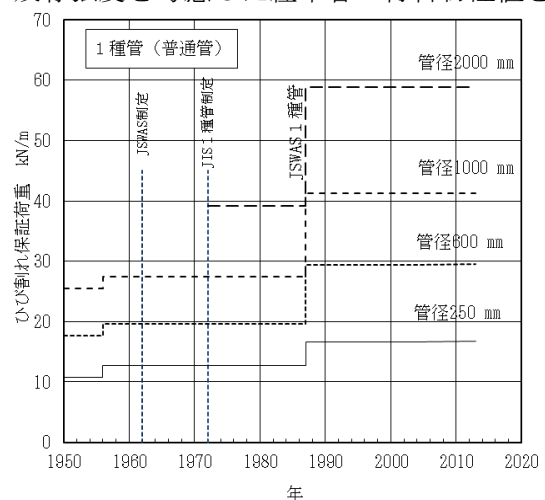


図-1 1種管ひび割れ保証荷重の推移例

ヒューム管は、JSWAS A-1 1987年の改正以降、今日に至るまでひび割れ保証荷重の規格値は変わっていない。本稿では、1987年以降を現行規格という。

2.2 鉄筋の規格値²⁾

鉄筋の規格強度の変遷は、文献²⁾によれば、大正14年(1925)の鉄筋コンクリート用の鉄筋は、棒鋼(丸鋼)であり、異形丸鋼は、昭和27年(1952)に規格化されており、昭和27年(1952)以前は、鉄筋コンクリート構造物には、棒鋼(丸鋼)が使われていた。大正14年(1925)の棒鋼(丸鋼)の強度規格は、現在のSR235相当(降伏点235 N/mm²以上、引張強さ380～520 N/mm²)であったとされる。

3. 既往文献による経年管の材料物性値と残存強度

3.1 既往文献による経年管の材料物性値

3.1.1 経年管のコンクリート圧縮強度

文献³⁾、⁴⁾では、経年管(施工年1966×6本、1969×7本、不明×2本)の材料物性値として、コンクリート圧縮強度と鉄筋の引張強度を調査、試験している。経年管のコンクリート圧縮強度を図-2に示す⁴⁾。この試験によるコンクリート圧縮強度値を表-1に示す。

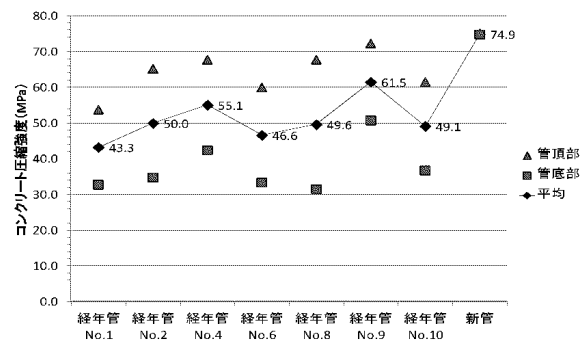


図-2 経年管コンクリート圧縮強度⁵⁾

この試験結果⁴⁾によると、経年管のコンクリート圧縮強度は、管頂、管底により大きく異なり、流水のある管底側は管頂より低い強度であったが、一般的なヒューム管の設計強度(38MPa程度と想定)は、すべての部位で満足していたとしている⁴⁾。

土木学会⁵⁾では、材料強度の特性値 f_k は、試験値のばらつきを想定したうえで、大部分の試験値がその値を下回らないことが保証される値とし、次式で表す。

$$\text{材料強度の特性値 } f_k = f_m - k \sigma = f_m (1 - k \delta)$$

ここに、 f_m ：試験値の平均値、 σ ：試験値の標準偏差、 δ ：試験値の変動係数、 k ：係数

試験値の分布の片側95%信頼区間の下限値として、 $k=1.645$ としている。

表-1の管底部のコンクリートは、何らかの影響を受けているので、管頂部の試験値を使って1969年当時のコンクリート圧縮強度の分布図を作成し、図-3に示す。

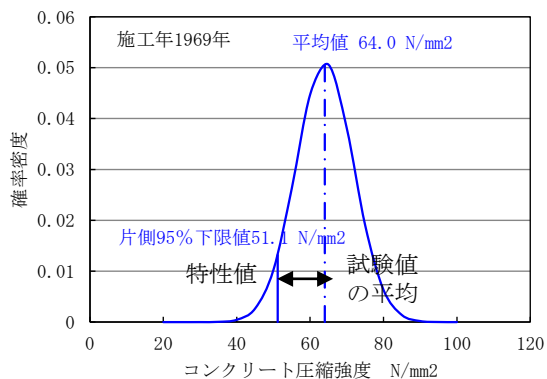


図-3 コンクリート圧縮強度の特性値

表-1 経年管のコンクリート圧縮試験の試験値⁵⁾ (N/mm²)

管頂部	管底部
57.1	33.8
54.3	25.5
49.9	38.9
72.2	35.1
71.7	30.3
51.7	38.8
72.7	27.2
61.6	41.8
68.8	58.1
51.1	37.5
67	47.7
61.7	14.8
63.4	40
71.9	34.9
67.8	19.6
73.9	44.8
69.1	46.9
73.8	60.5
60.3	26.6
61	47.5
63.3	36.1

上式に従って試験結果を表すとコンクリート圧縮強度の平均値は 64.0 N/mm^2 、特性値は 51.1 N/mm^2 となった。

3.1.2 経年管の鉄筋引張強度^{3), 4)}

経年管の鉄筋の引張強度を図-4⁴⁾に示す。経年管の鉄筋は、引張強度が概ね 600 MPa 以上であり、新管の鉄筋よりむしろ高い値となったとしている⁴⁾。

文献^{3), 4)}の試験では、経年管のコンクリートや鉄筋の強度は、経年変化がないと思われ、経年管の残存強度を材料物性値の経年劣化による強度低下から裏付けるのは難しい。

3.2 経年管の残存強度⁶⁾

国総研では掘り上げた経年管(管径 $250 \sim 600 \text{ mm}$ × $1927 \text{ 年} \sim 1968 \text{ 年}$ 、 1990 年)の外圧試験(写真-1)を行って、ひび割れ荷重値と破壊荷重値を得て、現行のそれぞれの規格値(JSWS A-1 2003)で除して対規格値比率を求め、目視による健全度別にその対規格値比率を図-5にして示している。

一般に健全度Cの管路スパンは、長寿命化対策を検討せず、健全度Bは長寿命化対策を検討する。図-5で明らかのように健全度Bであっても、また健全度Cにおいても現行の耐荷性能を有しない管きょ(以降、外圧強度低下管という)が多いということであり、管更生や修繕の実施に際しては、残存強度を適切に評価することが必要となる。なお、図-1の新旧の規格値から考えれば、健全度Dの対規格値比率は当然小さくなくてはならないが、試験結果では耐荷力が高い。

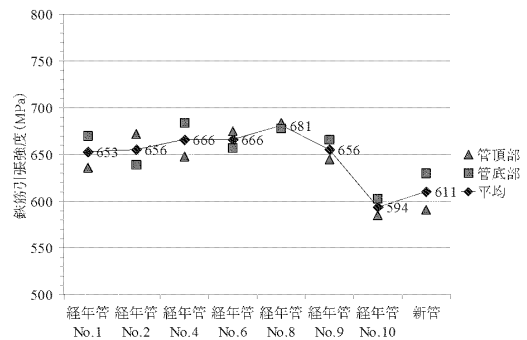


図-4 経年管鉄筋の引張強度⁴⁾



写真-1 経年管の外圧試験の様子⁶⁾

4. コンクリート圧縮強度(設計用値)の試算手順

筆者らは、文献¹⁾で減肉がある管きょについて後記の式一覧に示す(1)、(2)式を使って、現行規格値を基に減肉によるひび割れ抵抗曲げモーメントの低下を推定した。

文献^{3), 4)}では新管減肉管のひび割れ荷重を外圧試験で明らかにしているので、このひび割れ荷重から逆算したひび割れモーメントと(1)、(2)式の計算によるひび割れモーメントを比較し、よく一致していることを示した。図-6に管径 600 mm の計算による推定値と外圧試験のひび割れモーメントを示す。図-6の管厚減少量 0% のひび割れ荷重は、規格値となる。

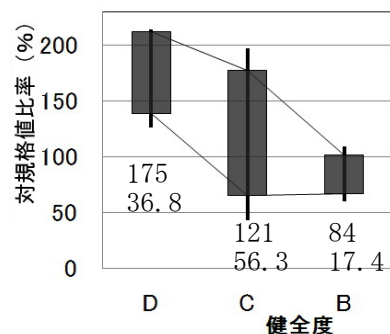


図-5 ひび割れ対規格値比率の分布⁶⁾(数値上段平均値、下段標準偏差:加筆)

経年管の材料物性値は、設計強度を満足しているので^{3)、4)}、健全度B、Cは、軸方向のクラックはあるものの、鉄筋は露出していない状態であることから、耐荷性能の低下は、コンクリート圧縮強度の見掛け上の低下と置き換えて表すものとした。

次に試算手順を示す。

4.1 新管のコンクリートのコンクリート圧縮強度 f_c

(2)式に管径ごとの規格値であるひび割れ荷重を代入し、管厚減少量0%のひび割れ保証モーメントを算出する。この値を(1)式に代入し、管厚減少量0%のコンクリートの曲げ引張強度 σ_{bt} を逆算して、表-2に示す。

このコンクリートの曲げ引張強度 σ_{bt} から(3)式、(4)式を用いてコンクリート圧縮強度 f_c を試算し、併せて表-2に示す。

逆算した曲げ引張強度 σ_{bt} が管径200～600ごとに異なるため、コンクリート圧縮強度 f_c も管径ごとに異なる値となるが、その平均値は53.8 N/mm²であった。3.1.1に示した圧縮強度試験の特性値51.1 N/mm²とほぼ同値となった。

4.2 外圧強度低下管のコンクリート圧縮強度 f_c

外圧強度低下管のひび割れ荷重値から(2)式を使って減肉管厚(仮想減肉管)とひび割れ抵抗モーメント値を計算する。

このひび割れ抵抗モーメント値と同値となる元厚に対するコンクリート曲げ引張強度 σ'_{bt} を(1)式から求め、 σ'_{bt} から(3)、(4)式を用いてコンクリート圧縮強度 f_c を求める。コンクリート圧縮強度 f_c が変化すると、コンクリート圧縮ヤング係数 E_c が変わり、(1)式に使われているヤング係数比 $n (=E_s/E_c)$ も変化する。コンクリート圧縮強度 f_c から(5)式でコンクリート圧縮ヤング係数 E_c を求め、外圧強度低下管のヤング係数比 n' を次式で求め、 σ'_{bt} を補正する(図-7)。

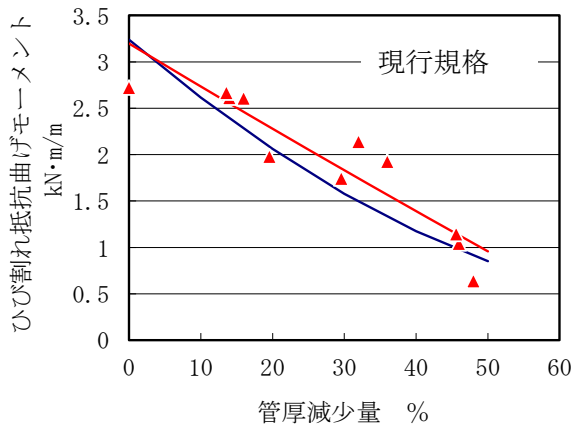


図-6 減肉管の推定したひび割れ抵抗曲げモーメントと外圧試験のひび割れ荷重から逆算したひび割れモーメントの比較(管径 600)

表-2 コンクリートの曲げ引張強度 σ_{bt} とコンクリート圧縮強度特性値(現行規格)

管径	管厚	新管(元管)		コンクリート		
		1種管 ひび割れ 荷重	ひび割れ 抵抗曲げ モーメント Mn	σ_{bt} 曲げ引張 強度 fbt	引張強度 ftk	圧縮強度 fc
mm	mm	kN/m	kN·m/m	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
200	27	16.7	0.62	4.31	2.15	28.7
250	28	16.7	0.76	4.94	2.50	35.8
300	30	17.7	0.96	5.43	2.81	42.8
350	32	19.7	1.24	6.17	3.26	53.5
400	35	21.6	1.55	6.47	3.53	60.1
450	38	23.6	1.91	6.75	3.78	66.7
500	42	25.6	2.32	6.70	3.88	69.3
600	50	29.5	3.24	6.60	4.05	74.0
					平均	53.8

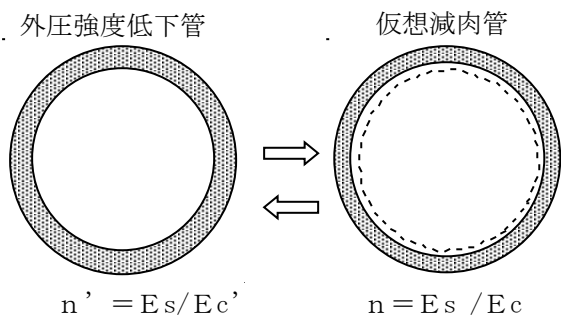


図-7 外圧強度低下管と仮想減肉管のヤング係数比

$$\text{外圧強度低下管のヤング係数比 } n' = \frac{\text{鉄筋のヤング係数 } E_s (= n \cdot E_c)}{\text{コンクリートの圧縮ヤング係数 } E_c'}$$

補正した σ'_{bt} から(3)、(4)式を使って外圧強度低下管のコンクリート圧縮強度 f_c 、すなわち設計用値を推定する。

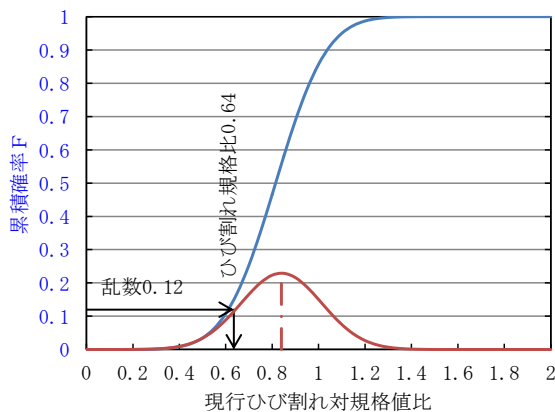
5. 残存強度を考慮した設計用値(健全度Bのコンクリート圧縮強度)の試算

外圧強度低下管(健全度B)の管内面が均等に減肉している管とみなし(この管を仮想減肉管と呼ぶ)、仮想管厚を想定する。健全度Bの経年管について、前掲図－5に示す現行ひび割れ対規格比率を累加して累積確率F曲線(図－8)とし、累積確率Fに相当する一様乱数を発生させ、この累積確率Fに対応する現行ひび割れ対規格比率を抽出する。

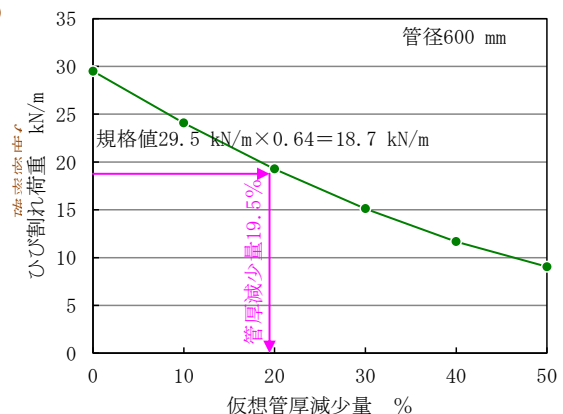
管径 600mm を例に示すと、まず 1 個、一様乱数 0.12 を発生させ、これに対応するひび割れ対規格比は 0.64 となり、下式で外圧強度低下管のひび割れ荷重を算定する。

$$\begin{aligned} \text{外圧強度低下管ひび割れ荷重} &= \text{管厚減少量 } 0\% \text{ のひび割れ荷重 } 29.5 \text{ kN/mm}^2 \times \text{対規格} \\ &\text{値比 } 0.64 = 18.7 \text{ kN/mm}^2 \end{aligned}$$

外圧強度低下管ひび割れ荷重 18.7 kN/mm² に対する管厚減少量を図－9のように内挿して算出する。



図－8 モンテカルロ法による現行ひび割れ対規格比を持つ管のサンプリング



図－9 低下したひび割れ荷重から管厚減少量の置き換え(管径 600 mm)

このあとは、200 個のひび割れ対規格比をサンプリングして、計算手順 4.2 にしたがって健全度Bのコンクリート圧縮強度 f_c の分布図をつくる(図－10)。一例として管径 600 mm のコンクリート圧縮強度 f_c は、規格値 74 N/mm²(減肉がない値)に対して経年管(健全度B)の規格値以下の平均値は 53.7 N/mm²であり、その片側 95%水準の下限值は 30.2 N/mm²以上であった。(1)式から求めるコンクリート圧縮強度 f_c は、表－2に示すように管径によって異なっているので、外圧試験^{3), 4)}にあわせて管径 200～600 mm まで8種類について、管径ごとに 200 個サンプリングして合計 1,600 個からコンクリート圧縮強度 f_c の分布図を作成した(図－11)。管径 200～600 mm の経年管(健全度B)のコンクリート圧縮強度 f_c の平均規格値は 53.8 N/mm²となり、規格値以下の平均は、38.0 N/mm²、その 95%下限値は 14.0 N/mm²

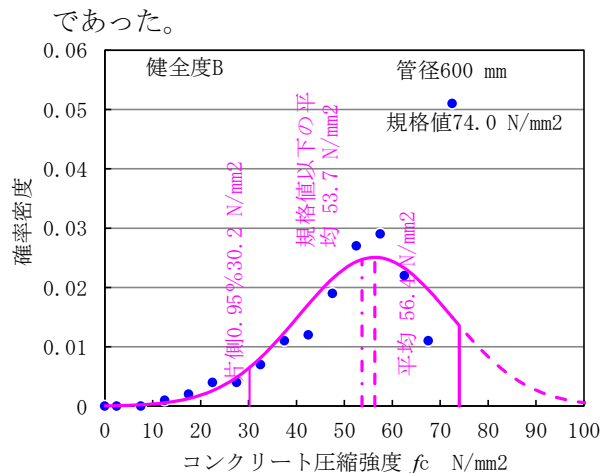


図-10 健全度Bのコンクリート圧縮強度 f_c の分布(管径 600 mm の例)

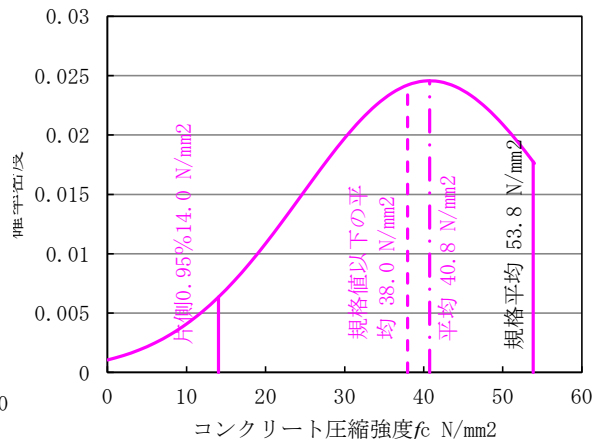


図-11 健全度Bのコンクリート圧縮強度 f_c の分布(管径 200~600 mm)

6. まとめ

既往の経年管の外圧試験値を引用し、目視による健全度Bの経年管についても減肉管に置き換え、そのひび割れ荷重値に換算し、コンクリート圧縮強度を試算した。

経年管の残存強度をこのコンクリート圧縮強度で表し、鉄筋については、物性値の変化がないことから、このコンクリート圧縮強度を設計用値として複合管設計時の構造照査に用いることができると考えた。文献⁵⁾によれば経年管の管底部のコンクリート圧縮強度は、何らかの影響から管頂部より低下していると報告しており、管断面方向の曲げモーメントは、応力計算上管底部が最も大きくなることから、経年管の耐荷能力に影響するものと考えられる。経年管の管底部のコンクリート圧縮強度の低下は、今後の解明が待たれる。

本稿をまとめるに当たり、既往の文献^{3)・6)}を引用したこと、その中に示される外圧試験値を利用したこと、引用文献の著者らに紙面を借りて厚くお礼申し上げます。

<参考文献>

- 1) 中根進ら：長寿命化に向けた腐食管耐荷力の試算 一般社団法人全国上下水道コンサルタント協会 平成25年度技術報告集(第28号)
- 2) 池田尚治：鉄筋の高強度化・太径化への歩み コンクリート工学 Vol. 31, No. 4, 1993. 4
- 3) 財団法人下水道新技術推進機構：衝撃弾性波検査法による管路診断技術資料-2012年3月-
- 4) 池田 匡隆、井藤 元暢：経年管の耐荷力に関する調査 第49回下水道研究発表会講演集 平成24年度 N-7-3-3
- 5) 土木学会：2012年制定 コンクリート標準示方書[設計編]
- 6) 藤生 和也：鉄筋コンクリート製の既設下水管渠における目視健全度と耐荷力の関係 下水道協会誌 Vol. 47, No. 567, pp. 140-145, 2010/01

<使用した式の一覧>

ヒューム管のひび割れ抵抗曲げモーメントは(1)式で表す。

$$M_r = I \cdot \sigma_{bt} \quad \dots\dots\dots (1) \quad a$$

$$x = \sqrt{\left(\frac{m \cdot b \cdot T + n(A_s + A_s')}{b(1-m)} \right)^2 + \frac{m \cdot b \cdot T^2 + 2n(A_s \cdot d + A_s' \cdot d')}{b(1-m)}} - \frac{m \cdot b \cdot T + n(A_s + A_s')}{b(1-m)} \quad \dots\dots (1) \quad b$$

$$I = \frac{b}{3m(T-x)} \cdot \left\{ x^3 + m(T-x)^3 + n \cdot A_s(d-x)^2 + n \cdot A_s'(x-d')^2 \right\} \quad \dots\dots (1) \quad c$$

ここに、 M_r ：ひび割れ抵抗曲げモーメント(N・m)、 x ：中立軸の位置(mm)、 I ：断面二次モーメント(mm⁴)、 T ：管厚(mm)、 d ：鉄筋位置における有効厚さ(引張側 mm)、 d' ：同左(圧縮側 mm)、 A_s ：管単位長さ当たり引張側鉄筋断面積(mm²)、 A_s' ：管単位長さ当たり圧縮側鉄筋断面積 $A_s' = A_s$ (mm²)、 b ：管の単位長(1000 mm)、 E_s ：鉄筋のヤング係数、 E_c ：コンクリートの圧縮ヤング係数(N/mm²)、 E_t ：コンクリートの引張ヤング係数(N/mm²)、ヤング係数比 $m = E_t / E_c$ 、ヤング係数比 $n = E_s / E_c$ 、 σ_c ：コンクリートの圧縮強度(N/mm²)、 σ_{bt} ：コンクリートの曲げ引張強度(N/mm²)

ひび割れ荷重とひび割れ抵抗曲げモーメントの関係を(2)式で表す。

$$M_c = 0.318 P_c r + 0.239 W r \quad \dots (2)$$

ここに、 M_c ：ひび割れ保障モーメント(kN・m/m)、 P_c ：ひび割れ試験荷重、 r ：管厚中心までの半径(m)、 W ：管の自重(kN/m)

コンクリートの曲げ引張強度 σ_{bt} とコンクリート引張強度 f_{tk} (現行規格)の関係は、土木学会¹⁾に示される(3)式で表す。

$$f_{bck} = 0.6 / \sqrt[3]{h} \cdot f_{tk} \quad \dots\dots (3)$$

ここに、 f_{bck} ：コンクリートの曲げひび割れ強度(=コンクリート曲げ引張強度 σ_{bt})、 h ：また、部材の高さ(=管厚)(m)、 f_{tk} ：コンクリートの引張強度(N/mm²)

コンクリート圧縮強度 f_c とコンクリートの引張強度の関係¹⁾は(4)式で表す。

$$f_{tk} = 0.23 \cdot f_c^{2/3} \quad \dots\dots (4)$$

ここに、 f_{tk} ：コンクリートの引張強度(N/mm²)、 f_c ：コンクリートの圧縮強度(N/mm²)

次に(1)式の計算には、ヤング係数比 $n (= E_s / E_c = \text{鉄筋のヤング係数} / \text{コンクリートの圧縮ヤング係数})$ が必要であり、本稿では $n = 7$ としている。

コンクリートの圧縮ヤング係数 E_c とコンクリート圧縮強度 f_c は、(5)式²⁾で表す。

$$E_c = 3.35 \times 10^4 \times \left(\frac{\gamma}{24} \right)^2 \times \left(\frac{f_c}{60} \right)^{1/3} \quad \dots\dots (5)$$

ここに、 γ ：コンクリート単位体積重量(kN/m³) - 1、 f_c ：コンクリート圧縮強度(N/mm²)

1) 土木学会：2012年制定 コンクリート標準示方書[設計編] p. 36, p. 35

2) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説