

長寿命化に向けた腐食管耐荷力の推定と評価

中日本建設コンサルタント(株) 飯嶋 隆之、中根 進

1. はじめに

管きよの腐食に起因する道路の陥没事故が相次ぎ、平成19年9月に国交省が緊急的な調査・点検を自治体に要請し、その結果を公表している。

その公表¹⁾では、圧送管出口付近を始めとする管きよの腐食が明らかになったが、その対策の実施は約80%(平成21年3月末現在)に留まっている。

陥没の原因は、特に下水道用鉄筋コンクリート管(以下ヒューム管と言う)の腐食による耐荷力の低下が考えられる。腐食管の耐荷力を推定する手順と推定値を示す。この腐食による耐荷力推定値を減肉管(規格厚より薄い新管)の外圧試験結果で評価する。

2. 鉄筋コンクリートとヒューム管の構造的差異

一般的に鉄筋コンクリート構造体は、**図-1**の単純梁を考えた場合に、部材上端側(中立軸より上)に圧縮力、部材下端側に引張力が発生する。

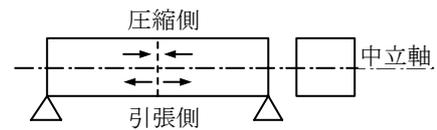


図-1 単純梁の応力状態

鉄筋コンクリートでは、圧縮力をコンクリートが受け持ち、引張力は鉄筋で負担する。

これは、コンクリートには引張力を負担する曲げ引張り強度がほとんどないことに起因するものである。

無筋コンクリートでは、それを無視すると強度を保てない結果となるので、考慮することになる。無筋コンクリートの曲げ引張り力 σ_{bt} は、規定²⁾によると設計強度(圧縮強度)の1/7で、0.3 N/mm²以下を期待している。

一方ヒューム管は、鉄筋を有するコンクリート構造ではあるが、一般的な鉄筋コンクリートと構造的な差異がある。

- i. ヒューム管はコンクリートの曲げ引張り強度を期待している。^{3), 4)}
- ii. ヒューム管は高い強度の圧縮強度を持つコンクリートを使用している。例⁵⁾ 50 N/mm²
- iii. 最小鉄筋かぶりは鉄筋コンクリートでの一般値の適用を受けていない。
- iv. ヒューム管は、二次製品(工場生産品)であり、その性能は**図-2**の荷重状態の管頂部内側で0.05mmのひび割れを生じた時の荷重(ひび割れ荷重)をもって「外圧強さ」⁵⁾としている。

この時の最大発生曲げモーメントを「ひび割れ保証モーメント」と言う。ひび割れ保証モーメントは(1)式で算出する。

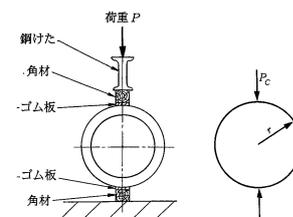


図-2 ヒューム管外圧試験

$$\left. \begin{aligned}
 M_c &= 0.318P_c r + 0.239Wr \\
 \text{又は} \\
 M_c &= 0.318P_c r + 1.5wr^2
 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ここに M_c : ひび割れ保証モーメント (kN・m/m)
 P_c : ひび割れ試験荷重 (kN/m)
 r : 管厚中心までの半径 (m)
 W : 管の自重 (kN/m)
 w : 単位管長, 単位弧長の管の自重 (kN/m/m)

3. ヒューム管のひび割れ荷重の推移

ヒューム管の耐荷力は、時代とともに強度が高まってきている。ヒューム管のひび割れ荷重の推移⁶⁾を概説する。

ヒューム管は、1950年(昭和25年)にJIS A 5303として制定された。現在の外圧強さ1種管に相当するもので「遠心力鉄筋コンクリート管」と言う。JISでは1972年に、普通管の外圧強さが1種及び2種に区分され、高強度の2種管が追加されている。

下水道用のヒューム管(下水道用鉄筋コンクリート管)は、JISの1種2種区分の前、1968年に日本下水道協会規格(JSWAS)A-1暫定規格として制定された。この規格はJISの外圧2種管に相当するものであった。

しかし、JSWAS1987年の改正では、外圧2種管だけであったものから、下水道用も1種管、2種管及び3種管(NC形のみ)が登場し、今日(JSWAS2011年)に至っている。

JISや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-3に示す。

図-3に示すようにひび割れ保証荷重が変化してきているので、既存のヒューム管の耐荷力を評価するためには、既存管がどの年代の規格で布設されているか調査することが最も重要である。

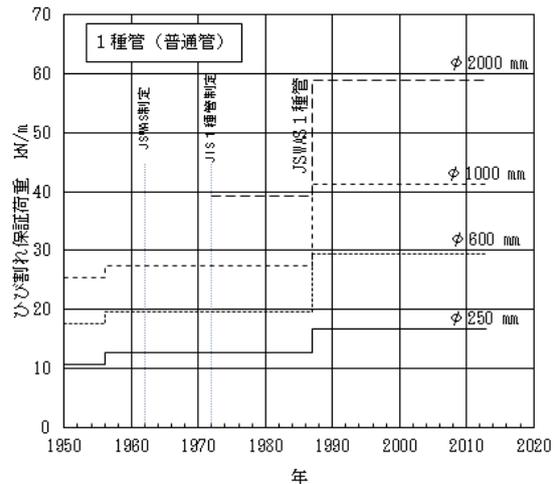


図-3 1種管ひび割れ保証荷重の推移例

4. ヒューム管の耐荷力評価上の問題点

ヒューム管はひび割れ荷重で表した性能保障であることから、製造各社は、耐荷力の評価(構造計算)に必要な構造諸元を公表していない。

国交省がヒューム管構造諸元についてアンケート・ヒヤリング調査した結果⁷⁾を表-1に示す。

表-1の調査結果で明らかのように国交省の聞き取り調査でも構造計算に必要な諸元を知ることができない。ましてや長

表-1 国交省アンケートによるヒューム管の構造諸元⁷⁾

調査諸元	アンケート調査結果	ヒヤリング等による補足
ツクリの曲げ引張り強度 E_t (N/mm ²)	データ入手困難	外圧管・1種管 4.21~7.95N/mm ² 外圧管・2種管 5.93~12.64N/mm ² 推進管・1類 4.21~7.95N/mm ² 推進管・II類 5.93~12.64N/mm ²
ツクリの圧縮ヤング係数 E_c (N/mm ²)	データ入手困難	ヤング係数比は次の通り。
ツクリの引張ヤング係数 E_s (N/mm ²)	データ入手困難	$n = E_t / E_c = 0.5$
主鉄筋のヤング係数 (N/mm ²)	データ入手困難	$m = E_s / E_c = 7.0$
主鉄筋配筋方法 (単鉄筋・複鉄筋の別)	・φ800mm以下で単鉄筋 ・φ900mm以上で複鉄筋	-
主鉄筋径 (mm)	データ入手困難	鉄筋量算出に必要な諸元であるが、代わりに
主鉄筋ピッチ (mm)	データ入手困難	文献4)の標準鉄筋比より鉄筋量を算出
主鉄筋被り (mm) (引張側と圧縮側)	・単鉄筋は管中央に配置 ・複鉄筋は被り25mm	-

※データ入手困難は、企業秘、データ数が少ない、未試験を含む。
 ※ツクリの曲げ引張り強度のヒヤリング値は、JSWASのひび割れ荷重からの逆算による。

寿命化で対象とする老朽化したヒューム管は、製造会社、製造年度も不明なことが多く、構造諸元を知ることは困難である。

このことから、既設管を硫化水素等の影響による腐食(肌荒れ、骨材・鉄筋の露出、中性化、薄肉化)状況を調査してもその管の残存強度を構造計算から推定することは困難である。

5. 管きょ残存耐荷力の推定値

5.1 残存耐荷力(ひび割れ抵抗曲げモーメント)

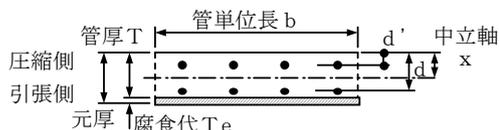
ヒューム管は、コンクリート圧縮側の腐食による減肉が耐荷力に影響する。またヒューム管は、コンクリートの引張強度を期待した鉄筋コンクリートであるため、管内側の腐食による減肉でも、耐荷力に影響するものと考えられる。

気相中に放散された硫化水素ガスによる管内面の腐食は、気液接触面や管頂部に激しい(文献⁷⁾ p. 4)ことや管内面全体の腐食事例(同文献 pp. 27~28)が示されている。減肉による耐荷力の低下を推定する1つの手法として、管厚が内面一様に減少している事例の残存耐荷力を試算する。

管の耐荷力は、ひび割れ抵抗曲げモーメントで評価する。鉄筋コンクリート構造体は、曲げ圧縮応力度やせん断応力度で照査するが、円形管の場合、発生するせん断力は非常に小さく、一般的に曲げモーメントのみで照査している。

ヒューム管は、荷重状態により管内側のコンクリートが引張状態になったり、圧縮状態になったりするので、コンクリートの引張側か圧縮側が腐食するかによって耐荷力(ひび割れ抵抗曲げモーメント)が異なる。

1) 引張側が腐食する場合



2) 圧縮側が腐食する場合



ヒューム管のひび割れ抵抗曲げモーメントを(2)式で表す。

$$M_r = I \cdot \sigma_{bt} \quad \dots \dots \dots (2) \text{ a}$$

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

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

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

E_t : コンクリートの引張ヤング係数

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)

(2)式の特徴は、コンクリートの引張強度が考慮されていることである。(2)式は、文献⁸⁾と文献⁹⁾を参照した。文献⁸⁾に示される式は、論文作成時の推敲ミスが考えられる。

5.2 残存耐荷力(ひび割れ抵抗曲げモーメント)の推定手順

残存耐荷力(ひび割れ抵抗曲げモーメント)は、図-3を参考に製造時期のひび割れ保証荷重を調べた上で、以下の手順で算出する。ここでは1972年と1987年以降のJSWAS A-1値の2ケースを検討する。

①管種、管径毎のひび割れ保証荷重を(1)式に代入し、新管時のひび割れ保証モーメント M_c を算出する。

②次に(2) b, c 式を用いて中立軸の位置 x と断面二次モーメント I を算出する。

コンクリート曲げ引張強度 σ_{bt} は、設計値を使うべきであるが、不明であることから、(2) a の M_r にひび割れ保証モーメント M_c を代入して逆算する。

ひび割れ抵抗モーメント M_r の計算に必要な構造諸元は、1972年規格は某社製造配筋図、1987年以降規格は国交省のヒヤリング調査値を使用した。各年規格の算出条件を表-3に示す。

表-3 算出条件

		1972年規格	1987年以降規格
配筋法		1000mm以上複鉄筋	900mm以上複鉄筋
鉄筋量	複鉄筋	$As' = As$	$As' = As$
有効厚 d'	単鉄筋	管厚×2/5	管厚×1/2
	複鉄筋	調査値22~35mm	25 mm
鉄筋比 p $As / (d \cdot b)$		調査値(某社製造配筋図)より算定	文献8)
ヤング係数比	m	$E_t/E_c=0.5$	$E_t/E_c=0.5$
	n	$E_s/E_c=10.0$	$E_s/E_c=7.0$

外圧1種管のコンクリート曲げ引張強度 σ_{bt} は、1972年規格では、1.9~4.6 N/mm² で、1987年以降で4.3~6.7 N/mm² の範囲にあった。 σ_{bt} は、管径ごとに異なった値が算出されるが逆算した値をそのまま採用する。

③逆算した σ_{bt} と腐食を考慮した管厚中心半径 R を用いて(2)式から腐食した管きよの残存耐荷力(ひび割れ抵抗曲げモーメント M_r)を算出する。

管内腐食が鉄筋位置に達したときは鉄筋が露出している状態になり、鉄筋の付着が期待できず鉄筋で引張力を負担できないが、ひび割れ抵抗曲げモーメント M_r は管厚減少に伴い

複鉄筋の状態が単鉄筋になった状態で外側鉄筋位置に達するまで計算する。単鉄筋の場合、腐食が鉄筋の位置まで達したら計算を終了する。

5.3 残存耐力(ひび割れ抵抗曲げモーメント)の推定値

代表的に管径 250, 600, 1000, 2000mm の外圧 1 種管に対し、管厚減少量を 0~100% まで変化させた場合の管厚減少量と残存耐力(ひび割れ抵抗曲げモーメント)の関係を図-4, 5 に示す。

図-4 は 1972 年改正のひび割れ保証荷重、図-5 は 1987 年改正(~2011 年)のひび割れ保証荷重で算定した残存耐力を示す。以下 1972 年規格、1987 年以降規格と言う。

単鉄筋の耐力は、コンクリート圧縮側の腐食の方がコンクリート引張側の腐食より低下する。これは、コンクリートの圧縮強度が引張強度より大きい理由による。

複鉄筋の耐力は、内側鉄筋位置までの腐食については単鉄筋と同じく、コンクリート圧縮側の腐食の方がコンクリート引張側の腐食より低下する。腐食が内側鉄筋位置より深くなると単鉄筋状態で引張側有効厚さ d が大きくなるので、コンクリート圧縮側腐食が引張側腐食より大となる。

図-4, 5 で明らかのように同じ 1 種管であっても、製造時期の規格値によりひび割れ保証荷重が変わっているので、残存耐力に差が出る。

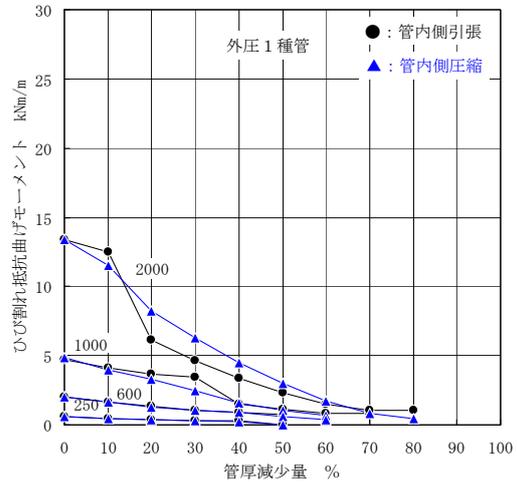


図-4 管厚減少量と残存耐力(1972 年規格)

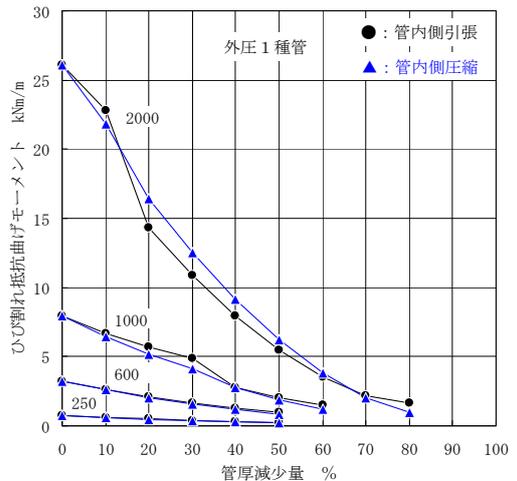


図-5 管厚減少量と残存耐力(1987 年以降)

6. 減肉管の外圧試験値による残存耐力推定値の評価

6.1 減肉管の外圧試験値

池田 匡隆ら¹⁰⁾が新管($\phi 250$)の減肉管(JSWSA-2011 の規格厚より薄い管で規格厚の 1/2 以下の管を 3~4 本)を実際に製作し、図-2 に示す JSWSA-1 の外圧試験を行い、その結果を公表している。減肉管の管厚と外圧強度(ひび割れ荷重, 破壊荷重)

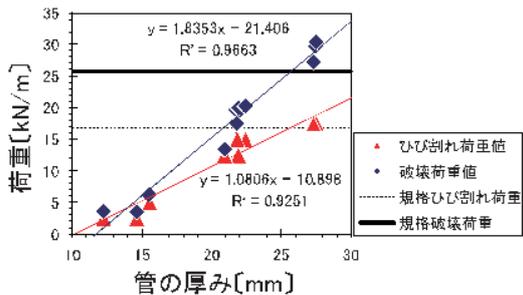


図-6 管厚と外圧強度の関係($\phi 250$ mm)

の関係を図-6に示す。ここに図-6の縦軸の荷重は、前述図-2の管頂に掛けた線荷重である。文献¹¹⁾にはφ250mmを含めてJSWAS1種管のφ200mm～φ700mmの外圧強度を示している。

図-6からひび割れ荷重値(▲)を拾い読みするとともにその回帰式から外圧試験によるひび割れ抵抗曲げモーメントを上述(1)式で算定して図-7に示す。

図-5に示すφ250の管厚減少量とひび割れ抵抗モーメントの関係と減肉管の試験値を比較して合わせて図-7に示す。図-7の推定値は、コンクリート圧縮側の腐食の方がコンクリート引張側の腐食より低下するので、図-4、5の▲管内側圧縮の値を示した。その他管径の外圧試験¹¹⁾によるひび割れ抵抗モーメントと推定値の比較は、別表に示した。

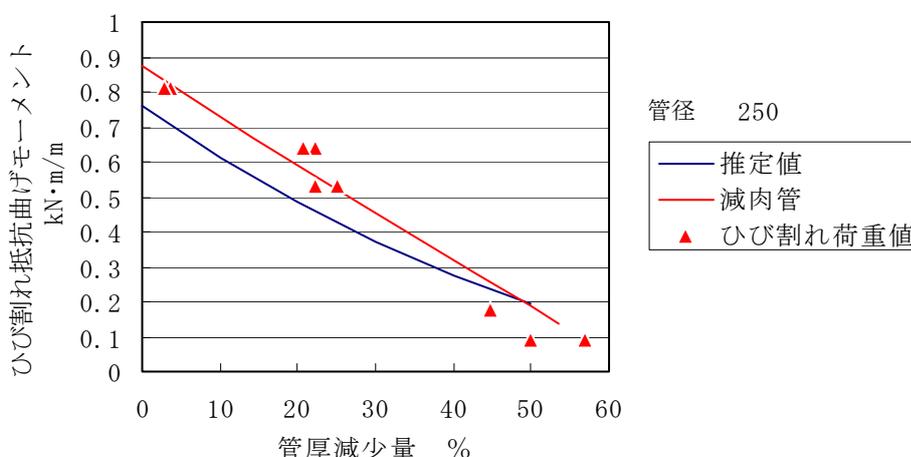


図-7 外圧試験によるひび割れ抵抗モーメントと推定値の比較(φ250mm)

推定値(青色実線)は、新管(管厚減少量0%)の状態を外圧試験のひび割れ抵抗モーメントより低い強度になり、管厚現象量が大になるにしたがいその差が小さくなった。これは、推定計算に入力しているコンクリートや鉄筋の物性が異なることなどが考えられる。

各管径に対する減肉管の外圧試験値と推定値の比較は、別表資料を参照していただくが、管厚減少量0～25%までについて、φ350,400,500は、よく一致しており、その他の管では外圧試験値より最大で18%低い結果であった。管厚減少量25～50%では、φ350,400,500の推定値は、外圧試験値より大きな強度を示した。

7. ヒューム管の鉄筋かぶりと管厚減少量

一般に鉄筋コンクリートにおいては、鉄筋かぶりは重要な性能である。鉄筋かぶりが不足すると鉄筋がコンクリートの中性化により発錆し、その錆で膨張することによりコンクリートに亀裂が生じて破壊する。また鉄筋かぶりが小さい場合には、鉄筋に沿ったひび割れができやすく、コンクリート付着強度は著しく低下する。

鋼材の腐食が進行する危険性を少なくするための最低限、制御すべきひび割れ幅の値として許容ひび割れ幅¹²⁾が表-4のように

表-4 鉄筋かぶり c と許容ひび割れ幅の関係

鋼材の種類	鋼材の腐食に対する環境条件		
	一般の環境	腐食性環境	特に厳しい腐食性環境
異形鉄筋・普通丸鋼	0.005 c	0.004 c	0.0035 c
PC鋼材	0.004 c	—	—

注) c : かぶり(mm) ただし、100mm以下を標準とする。

設定されている。

ヒューム管のひび割れ保証荷重時のひび割れ幅¹³⁾は、0.05mmであり、このひび割れ幅を鉄筋の腐食を進行させないための最小鉄筋かぶりと考え、表-4から算定して表-5に示す。

呼び径が小さい径については管厚が薄い
ため、製作時から表-5の「腐食性環境」、
「特に厳しい腐食性環境」の最小鉄筋かぶり
を満足していない。

表-5 ひび割れ幅0.05mmの最小鉄筋かぶり

環境条件	係数	鉄筋かぶり c
一般の環境	0.005	10.0 mm
腐食性環境	0.004	12.5 mm
特に厳しい腐食性環境	0.0035	14.3 mm

コンクリート2次製品に対する最小鉄筋
かぶりは、表-6が示されている。

表-6 二次製品の最小鉄筋かぶり

	区分	最小かぶり
昭和55年版 1980	耐久性に考慮する 必要のある面	9mm かつ鉄筋径以上
平成8年制定 1996	取替え困難	15mm かつ鉄筋径以上
	取替え比較的容易	9mm かつ鉄筋径以上

ヒューム管の腐食により管厚が減少する
過程で、二次製品として最小鉄筋かぶりを有
さないと鉄筋の腐食が懸念されるので、ヒュー
ム管の耐荷力を評価できるのは表-6の
最小鉄筋かぶり(9mm かつ鉄筋径以下)までと考えられる。

管厚減少量を50%まで推定しているが、最小鉄筋かぶりを満足する管厚までの推定にと
どめることが妥当と考えられる。

8. 長寿命化に向けた耐荷力推定値の利用例

腐食管の耐荷力を推定することにより、長寿命化に向けて、

- ・腐食管の埋設状態(使用状態)の作用荷重から管体に発生する曲げモーメントを算定し、推定した管減少量に対するひび割れ抵抗曲げモーメントと比較して、腐食管の埋設状態(使用状態)での耐荷力を評価する。
- ・地震時の作用荷重に対する腐食管体に発生する曲げモーメントを算定し、同様に、腐食管の地震時耐荷力を評価する。
- ・管減少量に対するひび割れ抵抗曲げモーメントを減肉してない状態に対して基準化する。視覚調査(テレビカメラ、潜行目視)によって得られた腐食程度を管厚減少量に変えて、基準値を求め、その値を不具合のリスク値や、改築・修繕の優先度指標の1つとして利用する。

ことなどが考えられる

9. まとめと課題

管内面腐食による管厚減少に伴い耐荷力が低下することを明らかにし、その残存耐荷力の推定手順と推定値を示した。単鉄筋のヒューム管耐荷力は、コンクリート圧縮側の腐食の方がコンクリート引張側の腐食より低下することを明らかにした。また指定値は、減肉管の外圧試験結果とよく一致した。

長寿命化対策の検討にあたりヒューム管の残存耐荷力を評価するには、次の2点を明確にしなければならない。

- i. ヒューム管の構造諸元を明らかにする。
- ii. 鉄筋付着力を確保するためのヒューム管最小鉄筋かぶりを明らかにする。

この2つの問題点に対する一定の解決手順を示せたと考える。

今後、部分的に腐食した管をモデル化して有限要素法によって解析し、部分腐食管の耐荷力と本報告の様に腐食した管の耐荷力を比較検討し、本報告の推定法手法の適用事例を示し、利便性を高めたいと考えている。

本報告の耐荷力は、1972年規格と1987年以降規格のひび割れ保証荷重を使って算定したものであり、ヒューム管製造時期によってはもっと低下することになる。

本報告では、経年管のコンクリート強度、鉄筋の引張強度の低下については、触れていないが、文献⁹⁾では、

- ・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。製作した新管のコンクリート圧縮強度は75MPaであったとしている。
- ・鉄筋については、引張強度が概ね600MPa以上であり、新管の鉄筋よりむしろ高い値となった。

と報告されていることを付記しておく。

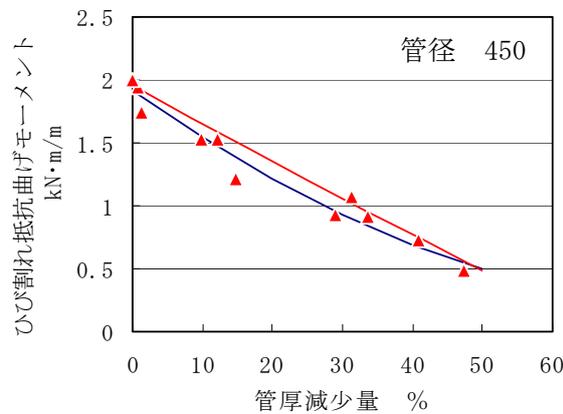
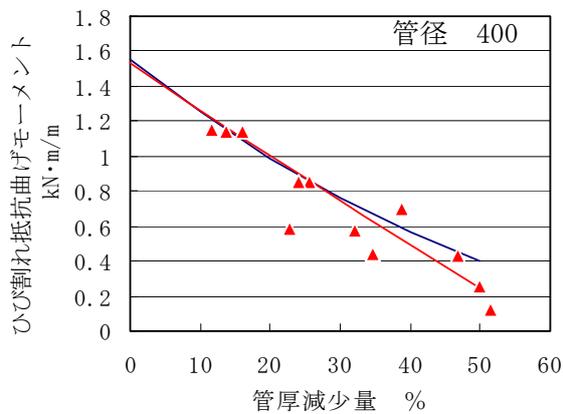
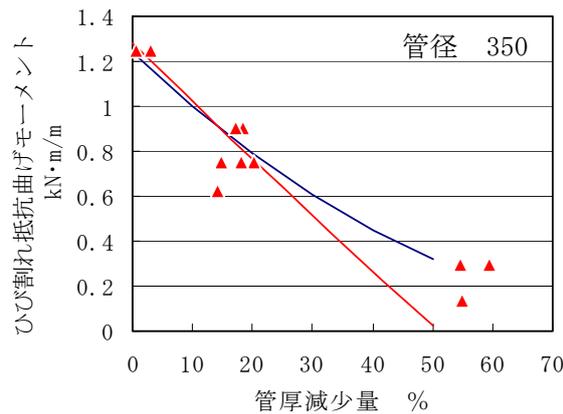
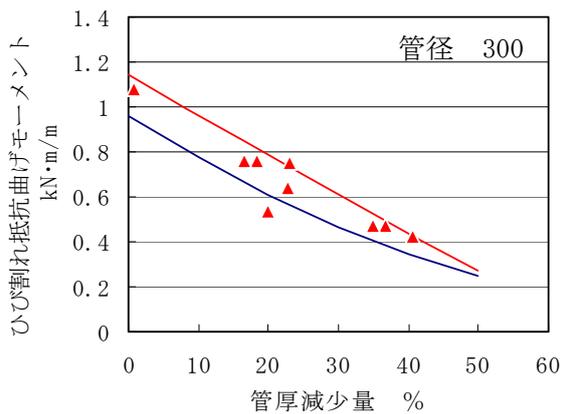
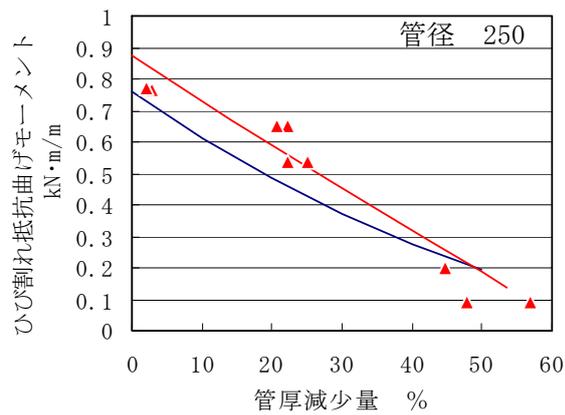
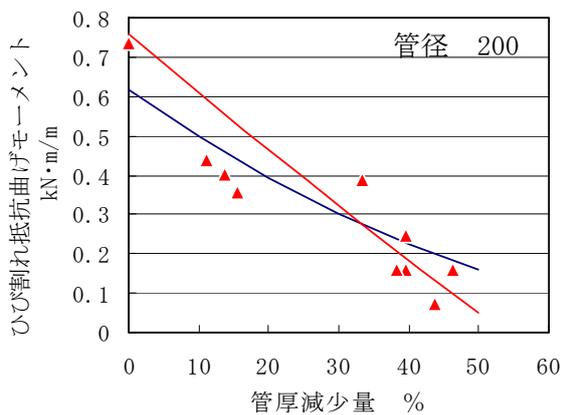
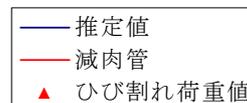
本文のヒューム管耐荷力算出の考え方については、国交省藤生和也らの論文⁷⁾を引用したこと、下水道新技術推進機構の減肉管の外圧試験結果¹⁰⁾を引用したこと、紙面を借りて厚くお礼申し上げます。

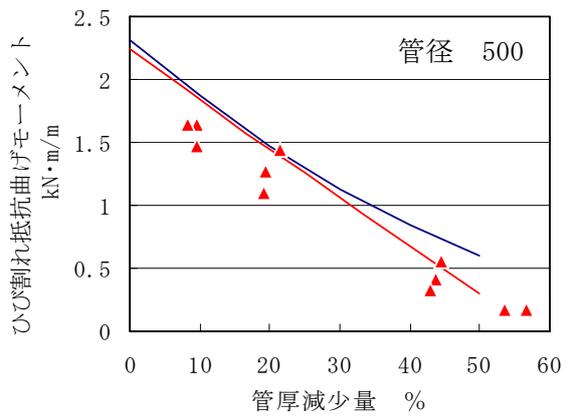
<参考文献>

- 1) 国交省 下水道管路の損傷状況に関する点検等調査(第7回)の結果について
- 2) 道路橋示方書・同解説 共通編 平成14年3月 p150
- 3) 全国コンクリート製品協会 コンクリート製品設計・施工要覧 増補改訂版1986
- 4) (社)全国ヒューム管協会 ヒューム管設計施工要覧 平成12年5月1日改訂版 p101
- 5) (社)日本下水道協会 下水道用鉄筋コンクリート管 JSWAS A-1 平成15年2月1日改正
- 6) 全国ヒューム管協会ホームページ2008. 6月
- 7) (社)日本下水道協会 下水道管路施設腐食対策の手引き(案)平成14年5月
- 8) 藤生和也, 松宮洋介, 濱田知幸 管路施設の長寿命化に関する調査 平成18年度下水道関係調査研究年次報告書集
- 9) (社)全国ヒューム管協会 ヒューム管設計施工要覧 p108 平成12年5月1日改訂版
- 10) (財)下水道新技術推進機構 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
- 11) 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— pp.126~134
- 12) 下水道管きよ改築・修繕にかかる調査・診断・設計実務必携 管診協 p.165
- 13) コンクリート標準示方書[構造性能照査編]土木学会2002年制定 p97

別表：1種管(1987年以降：JSWAS A-1-2011)の減肉管外圧試験によるひび割れ抵抗モーメントと推定値の比較

凡例：





凡例：

