

第7回 複合管 内外圧試験

(1) 分会の目的

本研究は、官民連携新技術開発事業「管路更生工法の性能規定化における照査技術の開発」の研究成果の一部であり、パイプラインの機能を維持・回復するために行われる管路更生工法において製管工法（複合管）の評価手法の開発と検証を目指し実施したものである。

複合管とは 既設管と表面部材の間にモルタル等を充填し、既設管と更生部材が一体化し、所定の外力に耐えるものである。表面部材の材質は工法により異なり、硬質ポリ塩化ビニルまたはポリエチレンである。所要の性能を有していることを確認するためには、水密性、及び耐荷性・耐久性が検討されなくてはならない。

パイプラインの設計手法として、不とう性管において内外圧が同時に作用する場合、ひび割れに至る荷重には内外圧合成式として次の関係が成立するとされている。

$$\left(\frac{P_H}{P_C/S}\right)^n + \left(\frac{H_P}{H_C/S}\right) = 1$$

ここに、

P_C : 内圧が0のとき、管の限界状態に至る外圧線荷重 (kN/m)

H_C : 外圧が0のとき、管の限界状態に至る内圧 (MPa)

P_H : 内圧が H_P のとき、管の限界状態に至る外圧線荷重 (kN/m)

H_P : 外圧が P_H のとき、管の限界状態に至る内圧 (MPa)

S : 安全率

n : 管の種類や構造等によって決まる係数

しかし、農業用パイプラインに適用される、機能の低下した管を更生した複合管での内外圧同時載荷時の報告は、ほぼ皆無である。

本分会では、特に「水密性」及び「耐荷性」に関して、水密性及び複合管の構造強度の評価手法を明確化し、複合管構造設計手法を確立することを目的とする。

(2) 分会の目標

- 1) 複合管の構造強度の評価に必要な材料試験項目の明確化
- 2) 複合管に対する内外圧同時載荷試験手法の確立
- 3) 水密性の考え方及び評価方法の確立
- 4) 内外圧合成式の適用に関する検証
- 5) 設計照査への反映（安全率等の考え方含む）

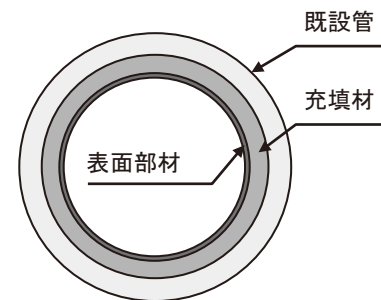


図-1 複合管の模式図

(3) 試験項目

1) 材料試験

コンクリート構造物として構造解析を行ううえで必要な材料特性の項目（圧縮強度、引張強度、弾性係数、破壊エネルギー）とそれらの試験方法を明確化する。

2) 内外圧同時載荷試験

内外圧合成式適用に関する検証、複合管の耐荷メカニズムの確認、解析モデルの確立を目的として、内外圧同時載荷試験を実施する。

内圧載荷方式については、試験装置（①内圧バッグ、②油圧ジャッキ式内外圧載荷試験機）を開発した。

供試体には、ヒューム管製作時からスパイラル筋にひずみゲージを貼付。

→載荷時のひずみを連続的に計測し、目視によるひび割れにとどまらずゲージによる構造評価を加えた。

供試体の使用限界状態確認方法として、鉄筋の応力状態に注目して解析。

①内圧バッグ方式

内圧バッグ方式の試験装置と試験概要を図-2および写真-1に示す。

②ジャッキ方式

ジャッキ方式の試験機を写真-2に示す。

③計測項目

試験データは、いずれもヒューム管を製作する段階から鉄筋部分に歪ゲージを貼り（4か所、内側 IN と外

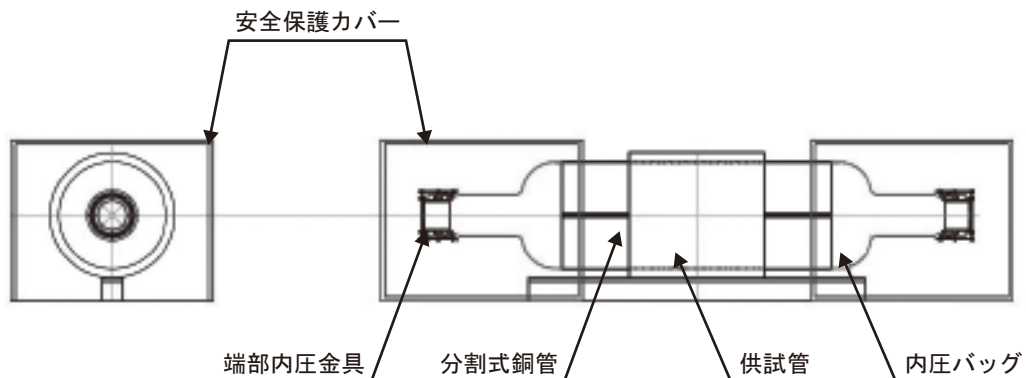


図-2 内圧バッグ方式試験方法



写真-1 内圧バッグを用いた内外圧試験状況

◇試験条件：

供試体：ヒューム管（新管）

口径：800mm 長さ：1 m

計測項目：鉄筋歪/変位

◇試験設備

外圧載荷：JIS A 5372

内圧載荷：バッグ方式



- ◇試験条件：
- 供試体：ヒューム管（新管）
HP新管+更生管
HP破壊管+更生管
 - 管径：ヒューム管 内径800
更生管 内径730
 - 管長さ：1m
 - 計測項目：鉄筋ひずみ/変位
- ◇試験設備：
- 外圧荷重：油圧ジャッキ
 - 内圧荷重：油圧ジャッキ3連
(上/中/下の3段 60度角度を振り設置)

写真-2 ジャッキ方式内外圧試験機

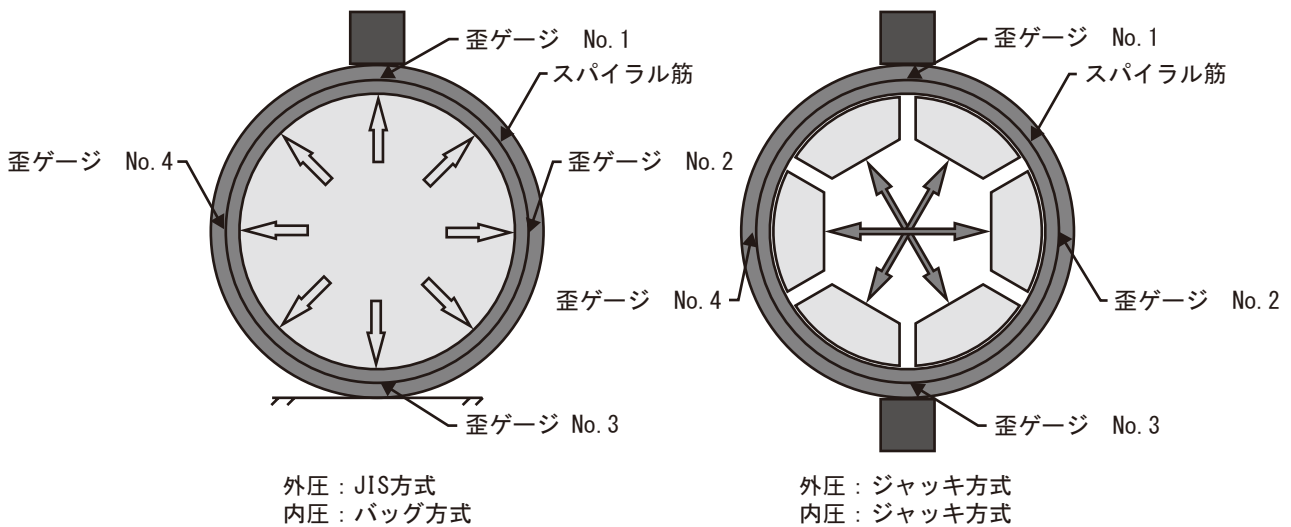


図-3 荷重方式と歪ゲージ位置

側 OUT)、外圧・内圧及び内外圧の影響を計測した(図-3)。

外形の変位は必要に応じて変位計を用いて計測した。また、コンクリート表面のひび割れ状態を確認するため、コンクリートゲージを貼り必要に応じて計測した。

(4) 試験結果

1) 材料試験の試験結果

構造解析を行ううえで必要な材料特性の評価項目と試験方法を整理するとともに、材料の破壊特性や強度特性を評価し、解析に用いる材料特性を求めた。

2) 内外圧同時荷重試験の試験結果

本分会では、当初バッグ方式による内圧荷重を予定していたが、更生管の荷重にあたって強度不足が判明した。そのため改めてジャッキ方式の内外圧同時荷重試験機を開発した。試験項目は表-1の項目とした。

(5) 結果の考察

1) はじめに

本分会では、バッグ方式・ジャッキ方式による内外圧同時荷重試験機を開発した。まず、新管についてバッグ方式とジャッキ方式によった場合の荷重値及び供試管の挙動について対比することにより、ジャッキ方式

表-1 内外圧載荷試験項目一覧

供試管	試験	外圧：JIS方式 内圧：バッグ式		外圧：ジャッキ式 内圧：ジャッキ式	
		載荷方式	供試管数	載荷方式	供試管数
新管	外圧	—	2	—	(1)
	内圧	—	3	—	3 (1)
	内外圧	内圧 0.1MPa 先行載荷 内圧 0.2MPa 先行載荷 内圧 0.3MPa 先行載荷	3	内圧 0.2MPa 先行載荷 外圧 40kN/m 先行載荷 外圧 25kN/m 先行載荷 外圧 10kN/m 先行載荷	(1)
			3		3
3			3		
新管更生	外圧	—	1	—	(1)
	内圧	—	—	—	3 × 各工法 (1)
	内外圧			内圧 0.66MPa 先行載荷 外圧 60kN/m 先行載荷	(1) (1)
破壊管更生	外圧		1		(1)
	内圧				3 × 各工法
	内外圧			外圧 60kN/m 先行載荷 外圧 40kN/m 先行載荷 外圧 20kN/m 先行載荷	3 3 3

※()内は、ジャッキ方式開発のために予備的に実施した数量である。

なお、図表には 内圧あるいは外圧に応じた

- 1・変位 (= 供試管の扁平、移動)
- 2・鉄筋歪
- 3・鉄筋歪 (平均)
- 4・コンクリートゲージ歪またはクラック変位

図面 (ノイズ、ゲージ破損等の異常値は除外してある) を記載した。

による内外圧同時載荷試験機の載荷性能を検証し得られたデータを、内外圧組合せ荷重曲線上にプロットし、係数nの値を推定した。次に破壊更生管 (あらかじめ外圧破壊試験後の供試体に製管工法で管更生したもの) の照査方法の提案を行った。その際、更生管における限界状態及び照査項目・限界値を設定した。

2) ジャッキ方式内外圧同時載荷試験機の載荷性能

本分会で行った載荷試験は表-1の通りであり、新管については、バッグ方式、ジャッキ方式双方で試験を実施した。そこで、本項ではジャッキ方式による内外圧同時載荷試験機の載荷性能を検証するため、新管を例としてバッグ方式による内外圧同時載荷との対比を行った。

なお、鉄筋のひずみを計測するためのゲージ貼付け位置は図-3の通りである。

内外圧組合せ荷重曲線上に両試験方式での試験結果をプロットした。

一部、異常値を思われる結果が生じているが、概ね $n = 1.0 \sim 3.0$ の値を得られており、コア式プレストレストコンクリート管に対する実験やバッグ方式による鉄筋歪みを指標とした結果と対比しても、概ね一致する。したがって、ジャッキ方式による内外圧同時載荷性能として問題ないと考える。

油圧ジャッキ式内外圧載荷試験機を用いて係数nを推定できると考える。

新管 (遠心力鉄筋コンクリート管) において、初期ひび割れや初期ひび割れに相当する鉄筋歪みを指標として、係数 $n = 1.5$ が得られた。

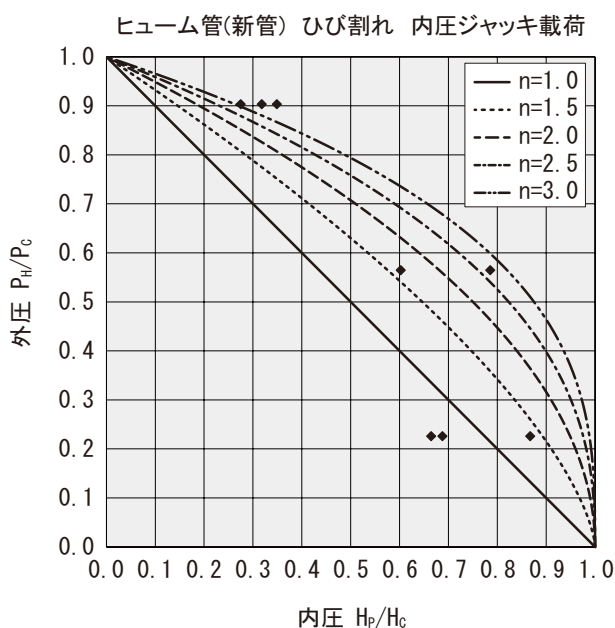


図-4 内圧バッグ試験機での結果

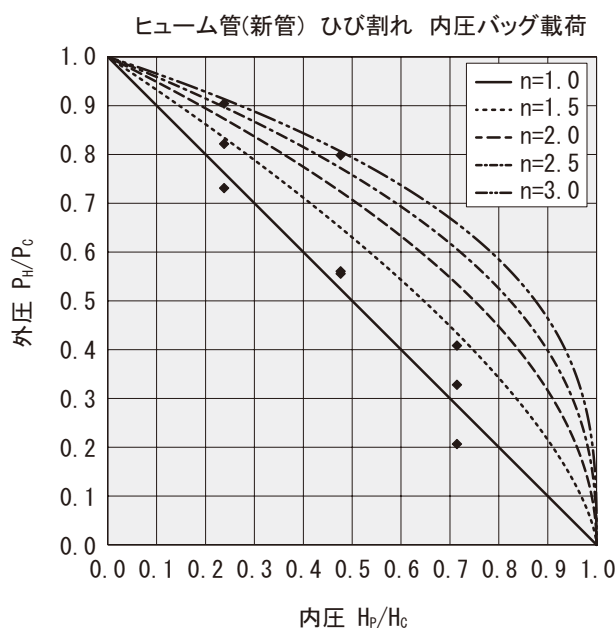


図-5 油圧ジャッキ式試験機の結果

3) 複合管における内外圧合成式の適用

3-1 複合管における限界状態の定義

a) はじめに

新管（遠心力鉄筋コンクリート管）において、初期ひび割れや初期ひび割れに相当する鉄筋歪みを指標として、係数 $n = 1.5$ が得られた。

しかし、複合管においてはひび割れ発生を指標とするのは、複合管の性能を過小評価するものである。すなわち、複合管においては、水密性の確保は主として表面部材で構築した内管で行われることから、水密性に関する照査は表面部材について行えばよく、管体に関する照査は、強度特性について照査を行えば足りる。そこで、ここでは更生工法に要求される性能を明らかにするとともに、複合管に要求される性能を満たすための限界状態・照査指標及び限界値について検討を行う。

なお、複合管の評価は E 工法を代表として取り上げた。

b) 更生工法の要求性能

複合管の限界状態と照査指標及び限界値をまとめる（表-2）。

c) 限界値の確認

鉄筋歪みを指標として、複合管への内外圧合成式の適用可能性を判断するため、本分会で実施した実験ケースにおける、上記限界値が鉄筋歪み μ に相当するか確認を行った。

本分会の一連の実験では、新管は NH 社製 JIS A 5372 (2010) 「プレキャストコンクリート製品、推奨使用 C-2 遠心力鉄筋コンクリート管」に規定される呼び径 800mm（外圧 1 種管）を用いた。遠心力鉄筋コンクリート管（ヒューム管）の諸元は以下の通りである（表-3）。

また、外圧のみ 内圧のみの限界試験の結果をそれぞれ以下に示す（表-4, 5）。

ア) 表面部材の水密性

表面部材の水密性は、各工法の申告値にて実施した。この試験実施水圧に対して安全率 2 で除した値が、安全性の限界値となる。

イ) コンクリート構造物としての耐荷性

ここでも鉄筋歪みを指標とし、外圧試験については、鉄筋に貼付けた No.1 ~ No.4 のゲージの歪みのいずれかが 1050 μ に達した時の値を用い、内圧試験、内外圧試験については、前述のように No.2 あるいは No.4 の鉄

表－2 複合管の限界状態と照査指標及び限界値（案）

要求性能	性能項目	限界状態	照査指標	限界値
通常の維持管理でパイプラインとしての機能が維持できること	水密性	想定される作用（内圧）に対して漏水を生じ始める状態	表面部材の水密性	設計水圧×2.0以上
	耐荷性	想定される作用（内外圧）に対して、部材が安全性を失う状態	鉄筋の応力度	鉄筋降伏

表－3 遠心力鉄筋コンクリート管材料諸元

項目		諸元値	摘要
コンクリート設計強度		40N/mm ² 以上	$\sigma_{28}=58.2\text{N/mm}^2$
鋼材	ストレート筋	SWM-B ϕ 6	引張強さ 390～930N/mm ²
	スパイラル筋	SWM-B ϕ 4	引張強さ 440～1030N/mm ²

表－4 破壊更生管外圧試験

供試体番号	外圧線荷重	備考
E工法-1	63.4kN/m	JIS方式
-	83.2kN/m	ジャッキ式

表－5 破壊更生管内圧試験

供試体番号	中段ジャッキ	備考
E工法-2	219.7kN	等分布換算0.57MPa相当
E工法-3	267.1kN	等分布換算0.70MPa相当
E工法-9	144.0kN	等分布換算0.38MPa相当

筋ゲージの歪みのいずれかが 1050 μ に達した時の中段ジャッキの荷重値を用いた。これは予備試験の結果コンクリート標準示方書に規定される曲げひび割れ幅の計算式に基づき算定するひび割れ幅0.25mmに達したときの鉄筋ひずみとして計算される。

以上の結果から、基準となる P_C 及び H_C の値を以下の通り設定した。

$$P_C = 73.3\text{kN/m}$$

$$H_C = 210.3\text{kN} \text{ (等分布換算0.56MPa相当)}$$

3-2 複合管の内外圧同時載荷試験の結果

破壊管更生管をE工法で更生し、ジャッキ方式での内外圧同時載荷試験の結果を以下に示す（表－6）。

試験結果を上記 P_C 、 H_C で無次元化したグラフを以下に示す（図－6）。

更なる追加実験や解析等による精度の向上の必要はあるものの、概ね $n = 1.5$ 以上の値が得られた。複合管の内外圧合成式の適用にあたっては、安全側となる $n = 1.5$ を採用すべきと考える。

4) 水密性試験

複合管では水密性の確保は主に表面部材で構築した内管で行うことから、表面部材の水密性試験を行うものとする。各工法によって表面部材の形状が異なることから、試験治具の統一は行わず各メーカー独自のものとし、試験箇所についても嵌合部、接続部あるいはその組合せについて実施するものとする。

表-6 内外圧同時載荷試験の結果（破壊管更生管 ジャッキ方式）

供試体番号	外圧 (kN/m)	内圧 (相当荷重-等価換算水圧)	
		中段ジャッキ (kN)	備考
E工法-13	60	149.6	等分布換算0.39MPa相当
E工法-14		193.9	等分布換算0.51MPa相当
E工法-15		176.0	等分布換算0.46MPa相当
E工法-10	40	203.7	等分布換算0.53MPa相当
E工法-11		163.7	等分布換算0.44MPa相当
E工法-12		185.3	等分布換算0.48MPa相当
E工法-16	20	104.6	等分布換算0.27MPa相当
E工法-17		189.0	等分布換算0.50MPa相当
E工法-18		182.8	等分布換算0.49MPa相当

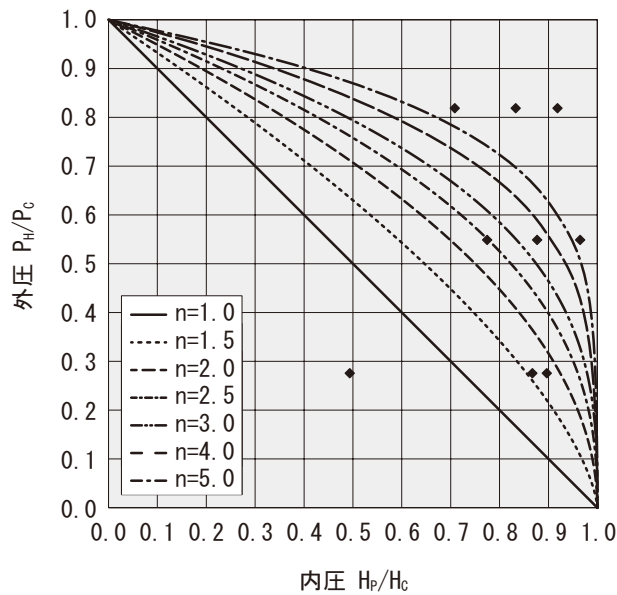


図-6 内外圧同時載荷 曲線（破壊管更生管ジャッキ方式）

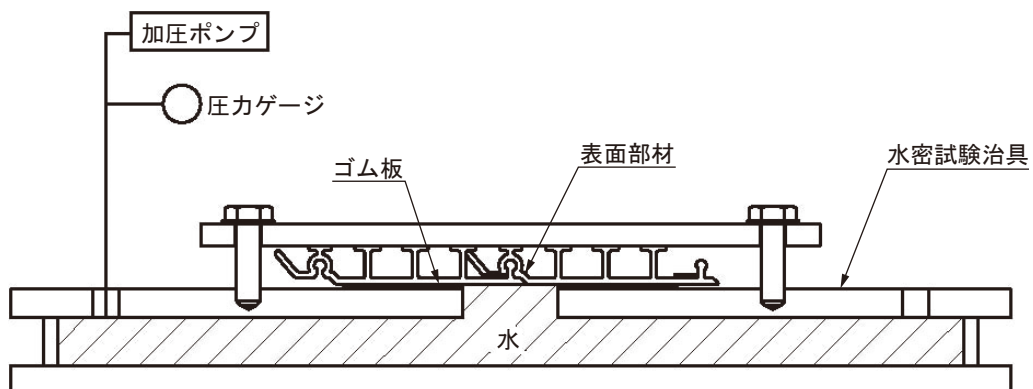


図-7 表面部材水密性試験の例

また、分会内で協議した結果、円筒状あるいは円弧状での水密性試験は、試験治具端部での水密性確保が困難であること、表面部材に使用されているプラスチック材料に対して、力学的特性から要求される限度状態相当の歪みは、水密性に影響を与える歪みの程度でないことから、歪みを与えない状態で平板での水密性評価方法を実施する（図－7）。

（6）結論

1）目標に対する成果

本分会の目標は以下の通りであり、それらに対する結論を示す。

内外圧分会の目標

- ①複合管の構造強度の評価に必要な材料試験項目の明確化
- ②複合管に対する内外圧同時載荷試験手法の確立
- ③水密性の考え方及び評価方法の確立
- ④内外圧合成式の適用に関する検証
- ⑤設計照査への反映（安全率等の考え方含む）

①材料試験項目の明確化

複合管の構造解析を行ううえで必要な材料特性の評価項目と試験方法を整理したとともに、材料の破壊特性や強度特性を評価し、解析に用いる材料特性を求めた。

②内外圧同時載荷試験方法の確立

当初バッグ方式による内圧載荷を予定していたが、更生管の載荷にあたって強度不足が判明したため改めてジャッキ方式による内外圧同時載荷試験機を開発した。

バッグ方式による載荷性能に比してジャッキ方式による載荷性能は、

外圧載荷性能：JIS方式による載荷性能と遜色ない

内圧載荷性能：内側3段ジャッキによる載荷位置の影響、供試管の上端が自由端である影響、載荷板による荷重分散が不十分であると推測されることなどから、ジャッキ載荷点近傍にひび割れが生じるとともに、ねじりによる斜めひび割れが生じ、バック方式と異なる挙動を示した。但し、内側ジャッキの荷重作用と供試管の挙動を考察することにより、中段ジャッキと供試管腹部（No.2及びNo.4）の鉄筋歪みにより内圧載荷時の挙動を得られるとの結論を導いた。

内外圧同時載荷性能：内圧載荷性能に関しては上記の通りであるが、内外圧同時載荷時における挙動は、バッグ方式と比してほぼ同様のものが得られた。また、先行させる荷重について、内圧先行載荷の場合、外圧載荷時に内側ジャッキが干渉するため、外圧荷重に影響を及ぼすが、外圧先行載荷の場合、内圧載荷時にもスムーズな挙動を得られることより、外圧先行載荷を採用した。

以上の検証により、ジャッキ方式による内外圧同時載荷試験機の載荷性能を検証し、同試験機が各種工法による複合管の構造特性を評価できることを実証した。

③水密性の考え方及び評価方法

複合管では、水密性の確保は主に表面部材で構築した内管で行うことから、表面部材（嵌合部及び接続部）について水密性試験を行うものとした。

円筒状あるいは円弧状での水密性試験は、試験治具端部での水密性確保が困難であること、表面部材に使用されているプラスチック材料に対して、力学的特性から要求される限度状態相当の歪みは、水密性に影響を与える歪みの程度でないことから、平板状の供試体での水密性評価方法を提案した。

また、表面部材の水密性は設計水圧の 2 倍以上の安全率を有することを提案した。

④内外圧合成式の適用に関する検証

実施した内外圧同時載荷試験結果を、内外圧組合せ荷重曲線上にプロットした結果、管の種類や構造によって決まる係数 n は、新管（遠心力鉄筋コンクリート管） $n = 1.5$ と、設計基準「パイプライン」と同様の値が得られた。

一旦外圧破壊した新管を代表工法にて更生した管（破壊管更生管）についても内外圧同時載荷試験を実施し、破壊管更生管において $n = 1.5$ という値を得た。

また、更生管の内外圧合成式適用に関連して、更生管に対する要求性能を明らかにするとともに、その限界状態（性能項目）、性能指標及び限界値を提案した。（表－2 参照）

⑤設計照査への反映

複合管の構造計算にあたって、内外圧合成式を適用することを提案した。外圧強度 P_C 及び内圧強度 H_C は、実験もしくは構造解析により求めるものとした。なお、実験により P_C 及び H_C を得ようとする場合、ヒューム管に関する既往のデータから余裕度（ $S_m = 1.2$ ）で低減した値を用いるものとした。これに対し、構造解析による場合、解析に用いる材料強度は規格値を用いて算出するため、上記余裕度は見込まなくて良いと考えられる。

許容内圧 H_p の算出にあたっては、本分会内での試験結果から $n=1.5$ を採用し、安全率 S は、設計基準「パイプライン」と同様の $S = 1.5$ を採用した。

ただし、安全率については 今後とも議論の余地はあると考える。

2) 残された課題

①内圧ジャッキ荷重値から相当内圧への換算

ジャッキ方式内圧・内外圧において治具による荷重分散が完全にはなされず、実際に作用している圧力は、ジャッキ荷重値を内周面積で割った換算内圧に比して大きいと推測される。そこで、実際に作用している面圧についてセンサーやシートを用いた直接的な計測や解析による挙動確認を行うことが必要である。

②更生管における内外圧合成式適用に関して追加実験や解析等による精度UP

内外圧組合せ荷重曲線上においてデータのバラツキが生じた。したがって更なる追加実験や解析による補足等により精度をUPする必要がある。

③既設管の劣化と構造性能の評価

既設管路と更生材の一体構造である複合管は、既設管の劣化状態を考慮して構造設計を行う。既設管の劣化は構造劣化と材料劣化に区別することができるが、その劣化要因とともに、劣化が生じた場合の構造性能の評価について、現時点では明確に確立されていない。したがってこの点についても今後の課題となる。

④既設管の劣化と解析モデル化

複合管の構造計算にあたっては、その劣化状態を考慮して解析モデル化する必要がある。劣化状態のモデル化は、FEMモデル及びファイバーモデル等では部材・部位毎の強度や部材自体の配置を健全部とは別に設定できるが、線形はりばねモデル（線形フレームモデル）では、複合断面の単純化や剛性を等価として計算する必要がある。これらのモデル化における劣化部位や部材の配置、各々の強度特性の配分等は今後の課題となる。