

JIS C 3653 適合に関して

はじめに

弊社の「角型 TAC レックス」は断面形状が円形と正形状が交互に連続成形された波付可とう電線管であり、性能は電線共同溝（(財) 道路保全技術センター発行）の管路材の仕様を満足する電線保護管で、(財) 土木研究センターの技術審査証明をしていただいた製品です。（建技審証 第0405号）

平成16年3月20日付で、JIS C 3653（電力ケーブルの地中埋設の施工方法）が改訂されました。ここで新規材料を用いた管の適応への対応として附属書3（規定）「管路式電線路に使用する管」が追加されました。角型 TAC レックスはその附属書3に規定する管路に該当します。

ここでは、その附属書3で規定された強度評価基準に基づき製品を評価し、角型 TAC レックスがその規定に適合していることを報告いたします。

概要

上述の様に弊社「角型 TAC レックス」は JIS C 3653 附属書3（規定）「管路式電線路に使用する管」の内、たわみ性管で b) 断面形状が同心円形状でないもの 及び c) 管相互を直接段積みするものに該当します。

そこにおいて、強度評価方法と強度評価基準は下記の通り規定されています。

強度評価方法

1. 設計荷重を求める。

（埋設深さ0.3mの荷重を基準とし、埋め戻し土による土圧 W_1 と車輛荷重による土圧 W_2 に安全率3を乗じたもの）



2. 設計荷重に基づき、埋設時に管に発生する最大応力を求める。

（埋設土による管側面の支持を考慮する）



3. 管を2枚の平板間に挟んで圧縮したとき発生する最大応力が2. で求めた最大応力と等価となる圧縮試験荷重を求める。



4. この圧縮試験荷重を用いて附属書1の5.1の試験方法を参考として圧縮強度試験を行う。

強度評価基準



圧縮試験荷重時の変形率が管鉛直方向の高さの3.5 %以下であり、かつ、各部にひび又は割れが生じてはならない。

前述の様に、圧縮試験荷重は埋設時に管に発生する最大応力と2枚の平板間に挟んで圧縮した時の最大応力が等価とすることが求められています。

弊社の「角型 TAC レックス」の構造のものに対しては一般的に認知された力学式等はありません。しかし、一般的に構造物の変形や応力を求めるため広く活用されている有限要素法による解析を行うことにより最大応力等を求めることができます。このことは JIS C 3653 の解説でも記述されています。

そこで、この最大応力は、大阪大学大学院 座古教授及び座古研究室のご指導・ご協力を得て有限要素法による解析を行い、求めました。その有限要素法による解析を用いて得られた解析結果から、圧縮試験荷重を求めました。なお、下記の手順で各種試験結果と比較・評価することにより、妥当性・整合性を確認しております。

有限要素法による解析の妥当性・整合性の確認及び圧縮試験荷重の求める手順。

1. 材料の非線形評価

材料試験により得られた荷重－変位の非線形特性を評価し、それを考慮に入れた非線形解析を実施し有限要素法解析プログラムの妥当性を確認しました。



2. 有限要素法による構造物の解析および妥当性の確認

中間サイズである呼び径100で解析及び構造試験を実施し、その妥当性を確認しました。

2-1 設計荷重を設定しました。

2-2 構造物の解析を実施しました。尚、解析における境界条件は試験条件を考慮し、それらを十分に反映して決定しました。

2-3 解析手法の妥当性は構造試験との対比により行いました。



3. 強度評価

JIS C 3653 附属書3の強度評価基準に基づき評価しました。

3-1 2. によって充分妥当性・整合性があることが確認された解析手法・解析プログラムと同一の方法で全サイズ、埋設した場合及び2枚の平板に挟んだ場合について解析しました。

3-2 設計荷重に基づき、埋設時に管に発生する最大相当応力と管を2枚の平板で挟んだ時に発生する最大相当応力が等価になる圧縮試験荷重を求めました。

3-3 圧縮強度試験を行い、その圧縮試験荷重時の変形率及び管の状態から評価しました。

また、角型 TAC レックスは直接段積みできる管路材ですが、段積みした状態においては管相互が支持し、拘束し合うことによって変形が抑制されることが有限要素法による解析結果によって明らかにしており、その検証のため、弊社において実験を行い、管相互を段積みした状態の方が、管単体と同様に試験した場合に比べいずれの管においても変形率が小さいことにより、段積みされた状態であっても管単体について評価すれば充分であることも実証いたしました。

以上の結果、求められた圧縮試験荷重を表 1 に示します。

表 1 圧縮試験荷重設定値

呼び径	50	75	81	100	130	150
圧縮試験荷重 (N)	1200	1900	1900	1900	4300	5100
試料長	(製品ピッチ長) × 5					
(参考長 [mm])	(202.5)	(247.5)	(247.5)	(247.5)	(372.5)	(372.5)

実際に圧縮強度試験を実施し、この圧縮試験荷重時の変形率及び試料の状態を表 2 に示します。

表 2 試験結果

呼び径	50	75	81	100	130	150
変形率 (%)	1.6	1.9	1.9	1.8	1.8	2.5
試料の状態	ひび又は割れ等異常なし					

以上、圧縮強度試験の結果はいずれの呼び径においても強度評価基準の変形率が 3.5% 以下であり、ひび又は割れが生じないことより、角型 TAC レックスは JIS C 3653 附属書 3 に適合していることが確認できました。

1. 材料の非線形性評価

1-1 区間線形理論

プラスチック材料においては、材料の降伏点以下の応力であっても、応力とひずみの関係は非線形を示します。本報告書において行った解析では材料非線形を考慮するため、区間線形理論を導入しました。区間線形理論とは荷重を段階的に与え、各段階において等価物性値を計算し、次のステップに反映する手法です。このとき、各段階において応力とひずみの増加量は微小であることから、各段階では物性値を一定値として解析できます。具体的には、弾性係数として等価弾性係数 E^* を以下のように定義します。

$$E^* = E + \alpha \exp(-n \sigma) \quad (1.1)$$

単軸引張試験によって E 、 α 、 n を求めることができます。

1-2 解析及び検証

構築したプログラムの検証は引張試験により得られた結果と式 (1.1) で評価した応力依存性を考慮した解析結果との比較により行いました。まず、角型 TAC レックスと同一材料の引張試験を行い、その応力-ひずみ線図を得、次いで、引張試験片の要素分割を行い、非線形解析を実施し、実験との比較を行いました。

単軸引張試験から得られた非線形パラメーターを表 1.1 に示します。なお、引張試験片は JIS K 7113 1号試験片に準拠しています。これらの物性値を用いた検証解析として、図 1.2 のように横 50mm、縦 10mm、厚さ 3.87mm の JIS K 7113 1号試験片平行部を要素分割し、最大荷重 3.00MPa の荷重を矢印方向に作用させました。実験値と本有限要素プログラムから得られた材料の応力-ひずみ線図を図 1.3 に示します。なお、非線形解析のステップ数は 10 としました。このステップ数は、本解析と実験結果より充分と考えます。

表 1.1 非線形パラメータ

E [GPa]	α [GPa]	n
0.250	1.24	0.280×10^{-6}

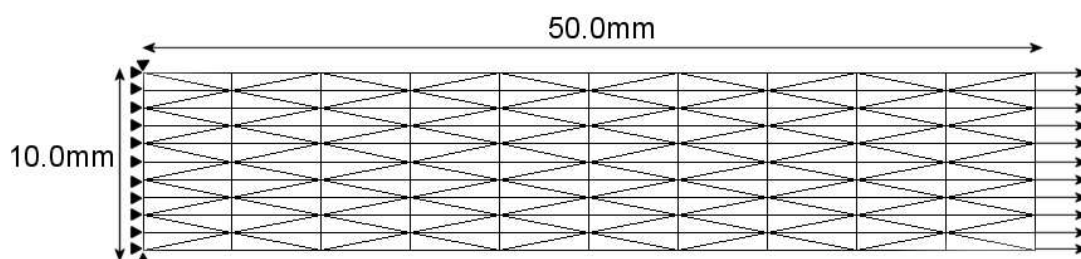


図 1.2 非線形解析検証モデル

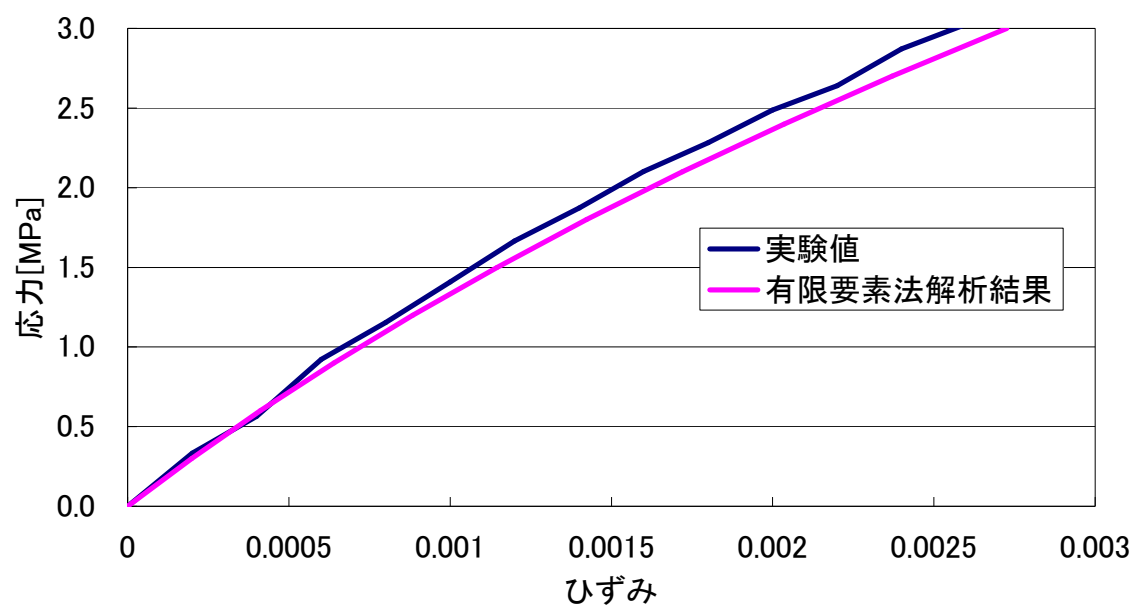


図 1.3 非線形解析検証結果

以上のように今回使用した有限要素法による解析プログラムは妥当性のあるプログラムであることが確認されました。

2. 有限要素法による構造解析およびその妥当性の確認

中間サイズである呼び径 100 で有限要素法による構造解析を実施し、各種構造試験の結果と解析結果の比較・評価することにより妥当性を確認しました。

2-1. 設計荷重

JIS C 3653 附属書 3 で設計荷重は埋設深さ 0.3m を基準とし、そのとき作用する荷重に安全率 3 を乗じた荷重とすることが規定されています。その算出方法及び設計荷重は下記の通りです。

a) 埋め戻し土による土圧

埋め戻し土による土圧 W_1 は、次の式を用いて算出しました。

$$W_1 = \gamma h$$

ここに、 w_1 : 埋戻し土による土圧(k N/m²)

γ : 埋戻し土の単位体積重量(=17.7 k N/m³)

h : 埋設深さ(m)

従って埋設深さ 0.3m の場合 5.3 k N/m² となります。

b) 車両荷重による土圧

車両荷重による土圧 W_2 は、次の 1)、2) によって計算した値のうち大きい方の値としました。

1) T-20 による土圧計算

$$W_2 = \frac{2P(1+i)}{2.75(2h+a)}$$

ここに、 w_2 : 車両荷重による土圧(k N/m²)

P : 後輪 1 輪重量(=78.5 k N)

i : 衝撃係数(=0.5)

h : 埋設深さ(m)

a : タイヤ接地長(=0.2 m)

従って埋設深さ 0.3m の場合 107.0 k N/m² となります。

2) T-25 による土圧計算

一管の埋設深さが 55 cm 以下の場合

$$W_2 = \frac{P(1+i)}{2.75(2h+a)}$$

ここに、 w_2 : 車両荷重による土圧(k N/m²)

P : 後輪 1 軸重量(=98.1 k N)

i : 衝撃係数(=0.5)

h : 埋設深さ(m)

a : タイヤ接地長(=0.2m)

従って埋設深さ 0.3m の場合 66.9 k N となります。

車両荷重としては、埋設深さ 0.3m の場合 T-25 より T-20 の方が大きな値となるため T-20 で算出した 107.0 kN/m^2 を採用しました。

従って、JIS C 3653 附属書 3 で規定する設計荷重は、埋め戻し土による土圧と車輛荷重による土圧で算出したの和 112.3 kN/m^2 に安全率 3 を乗じた荷重と規定されていますので、設計荷重を 340 kN/m^2 と設定しました。

2-2 構造体の有限要素法解析

2-2-1 要素モデル

呼び径 100 の要素モデルを図 2.1 に示します。解析のモデル長さは製品ピッチの 5 倍の長さとししました。要素は 3 角形シェル要素 (6 自由度) を採用しました。総節点数 4400、総要素数 8800 でした。

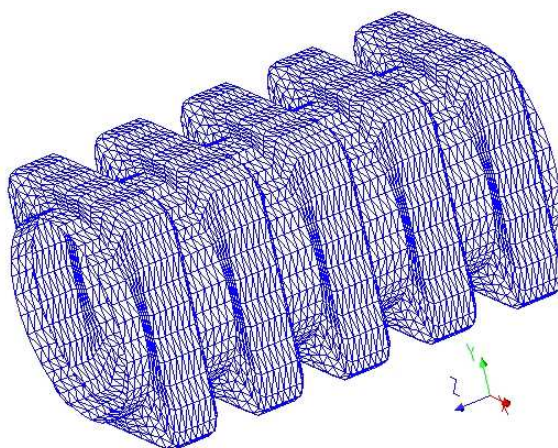


図 2.1 要素モデル

2-2-2 拘束条件および荷重条件

a) 埋設時

埋設時における拘束条件を図 2.2 に示します。実際には図 2.2 で示す状態が図 2.1 に示す如く 5 つ繰り返されています。また、土槽実験における作用土圧分布の測定結果を荷重値として作用させました。測定箇所を図 2.3 に、その計測結果を図 2.4 に示します。解析では、この測定結果に基づいて外力を作用させました。また、円筒部では計測のための土圧計が円筒部より離れた位置にしか設置できなかったため、円筒部に作用する分布の正確な判定は困難であるため、直方体部の土圧分布を適用しました。

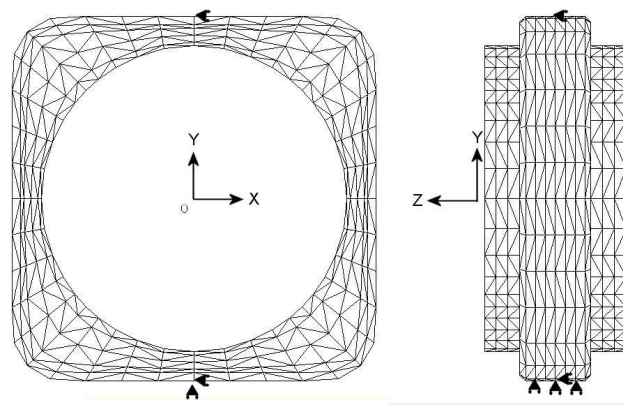


図 2.2 埋設時の拘束条件

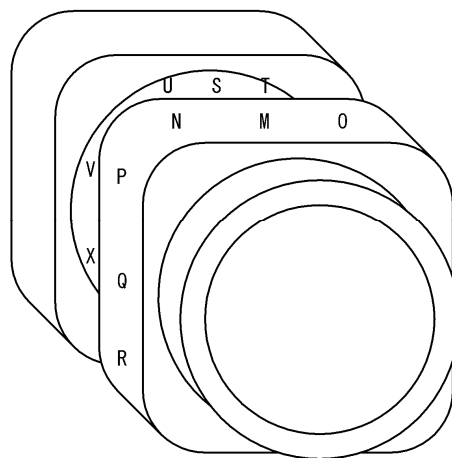


図 2.3 土圧測定箇所

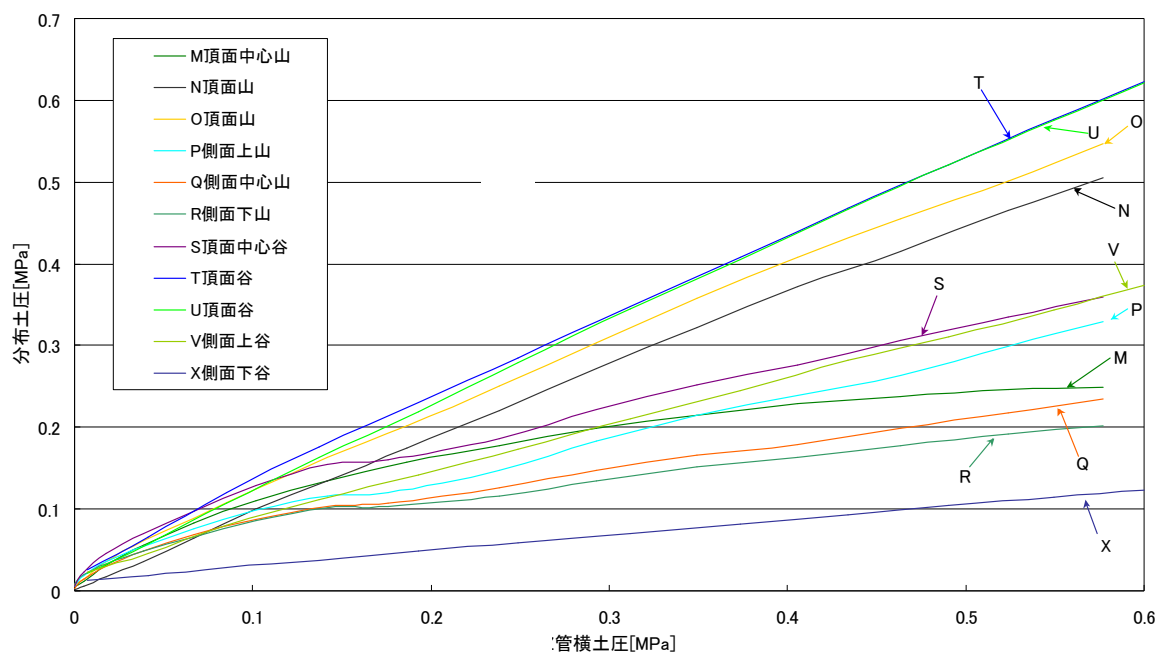


図 2.4 土圧分布

b) 平板による圧縮試験時

圧縮試験時における拘束条件および荷重条件を埋設時と同様に一部を図 2.5 に示します。長手方向の対称性から Z 方向の拘束は中央部のみの 2 節点としました。図中の矢印は荷重を与えた箇所およびその方向を示しています。圧縮試験では平板で圧縮していますが、実験は 2 点で接触しているため、このような荷重条件を設定しました。

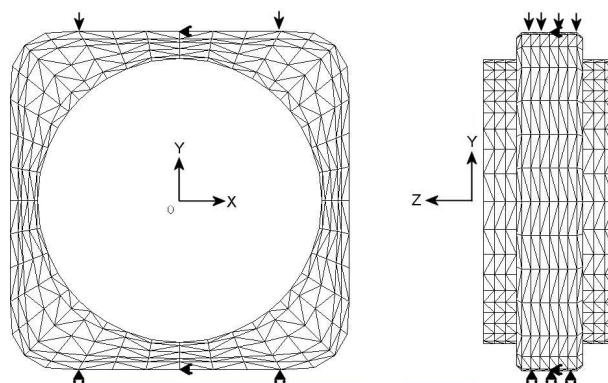


図 2.5 圧縮強度試験解析における拘束条件および荷重条件(ユニット中央部)

2-3. 解析の妥当性確認

解析の妥当性の確認は、解析結果と構造試験の対比により行いました。

2-3-1 構造試験

a) 土槽実験

1) 実験方法

図 2.6 に示すように土槽に管を埋設し土槽の上方開口部にほぼ同面積の載荷板をのせ、ここに油圧ジャッキで荷重を加え、その際管に発生する管内径たわみ量を測定しました。

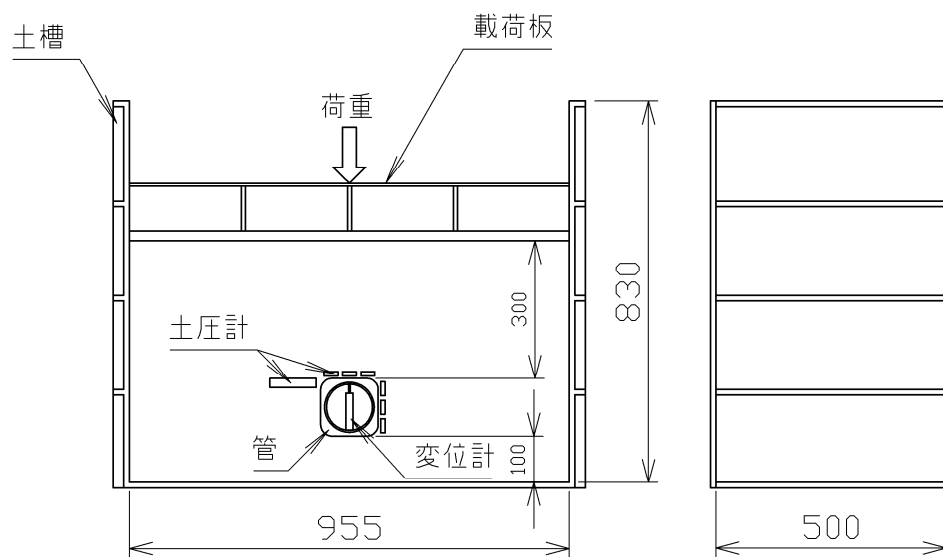


図 2.6

2) 供試体

角型TACレックス 呼び径 100

試料長は製品ピッチ長の5倍の長さ（解析時と同じ長さ）

3) 装置

載荷装置・・・30 トン油圧ジャッキ

測定装置・・・ロードセル（200 kN）

変位計（発生鉛直たわみ測定）

土圧計（定格容量 1MPa）

埋め戻し材料：川砂 表 2.1、図 2.7 にその特性を示します。

表 2.1 締め固め特性

項 目	川砂
最大乾燥密度	1.601 g / cm ³
最適含水比	16.0%

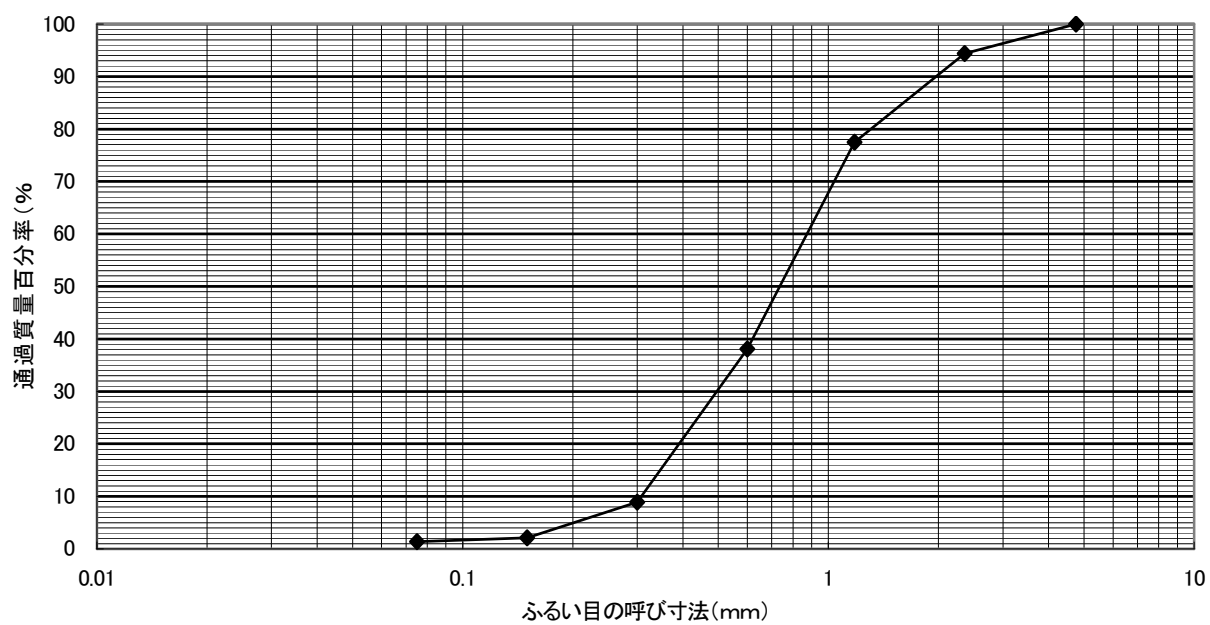


図 2.7 粒径加積曲線図

b) 圧縮強度試験

1) 試験方法

図 2.8 に示すように JIS C 3653 附属書 1 の圧縮試験と同様に管を 2 枚の鋼製の平板間に挟み、管軸と直角方向に毎分 20mm の速度で管に圧縮荷重を加える方法で実施しました。その際、圧縮荷重と管内径たわみ量を測定しました。

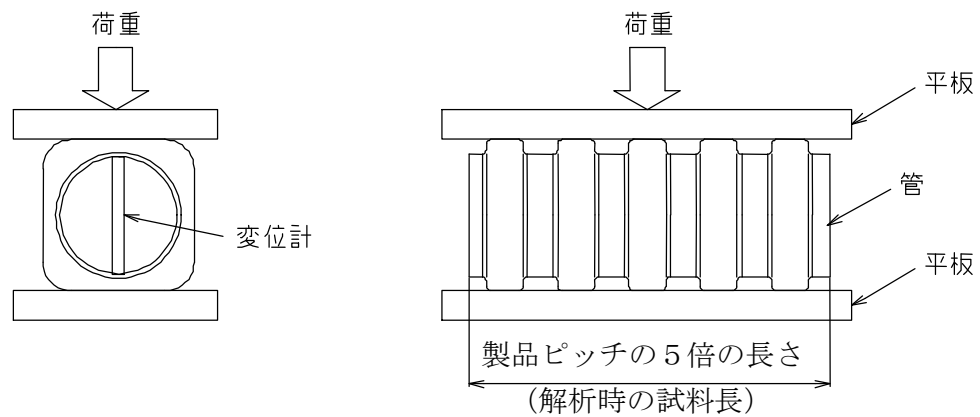


図 2.8 平板圧縮試験

2) 供試体

角型 TAC レックス 呼び径 100

試料長は製品ピッチ長の 5 倍の長さ（解析時と同じ長さ）

3) 装置

載荷装置・・・圧縮試験機（ロードセル 10KN）

測定装置・・・変位計（発生鉛直たわみ測定）

2-3-2 解析結果と構造試験の対比

妥当性確認のため、変位（埋設時及び平板圧縮時）及びひずみの解析結果と構造試験結果の対比を行いました。

a) 変位

1) 埋設時

土圧と管内径変位の関係を図 2.9 に示します。

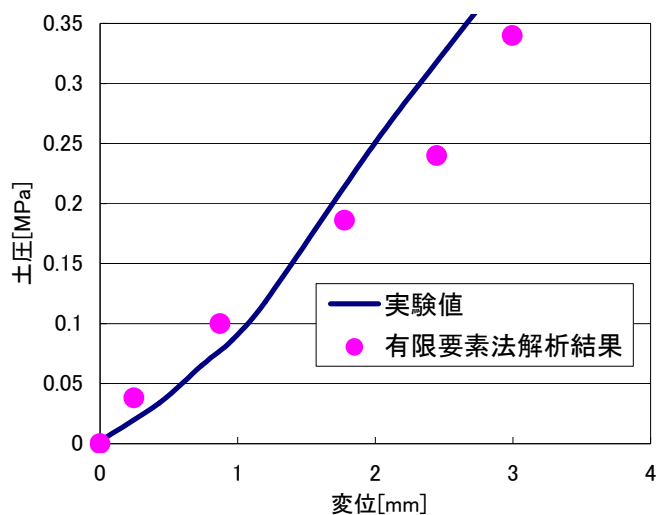


図 2.9 土槽実験における荷重－変位線図

2) 平板圧縮時

荷重を作用させた場合の荷重－変位線図を図 2.10 に示します。

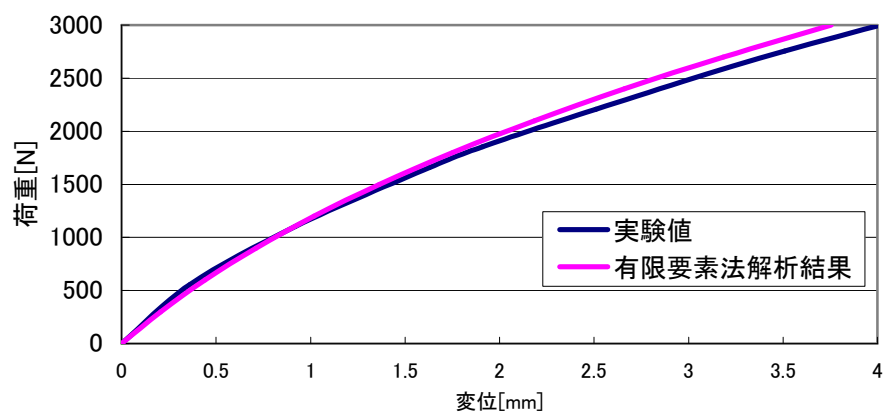


図 2.10 圧縮強度試験及び解析における荷重－変位線図

b) ひずみ

解析結果の妥当性を評価するため、変形のみならず負荷時のひずみ値の解析結果と実験結果を比較しました。比較した箇所は圧縮試験時の解析結果より、荷重点以外の部分で正形状および円形状の其々の部分でひずみが最も大きな値を示した部位で測定しました。測定部位を図 2.11 に示します。

実験結果及び解析結果を表 2.2 に示します。

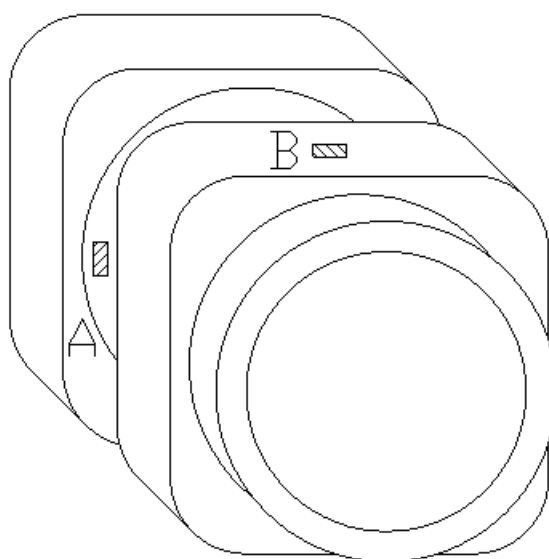


図 2.11 ひずみ測定及び解析箇所

表 2.2 ひずみの解析値と実測値

	埋設（設計荷重 340kN/m ² ）時		圧縮強度試験（荷重 1710 N）時	
	土槽実験による ひずみ測定値	有限要素法による ひずみ解析値	圧縮強度試験による ひずみ測定値	有限要素法による ひずみ解析値
A	-2.7×10^{-3}	-3.0×10^{-3}	-3.7×10^{-4}	-2.7×10^{-4}
B	-5.5×10^{-3}	-6.2×10^{-3}	-2.6×10^{-3}	-2.7×10^{-3}

2-3-3 解析の妥当性

変位、ひずみとも実測値と解析値はよく一致しており、この解析の妥当性は十分あることが確認できました。

3. 強度評価

JIS C 3653 附属書 3 で規定された強度評価基準に基づき評価しました。

3-1 有限要素法による解析

前述のように充分妥当性・整合性がある解析手法・解析プログラムと同一の方法で全サイズ、埋設した場合及び2枚の平板に挟んだ場合について有限要素法による解析を行いました。

3-2 圧縮試験荷重の設定

前述の解析により埋設された角型TACレックスにおいて設計荷重 340 kN/m^2 が作用した時、管に発生する最大相当応力を有限要素法で求めました。また、平板圧縮強度試験において圧縮荷重と最大相当応力との関係を有限要素法で求めると図 3.1 のようになります。この圧縮荷重-最大相当応力曲線を使用し、埋設時において設計荷重が作用した時に発生する最大相当応力値より圧縮強度試験時にそれと等価となる最大相当応力発生する圧縮荷重を図 3.1 から求めることができます。

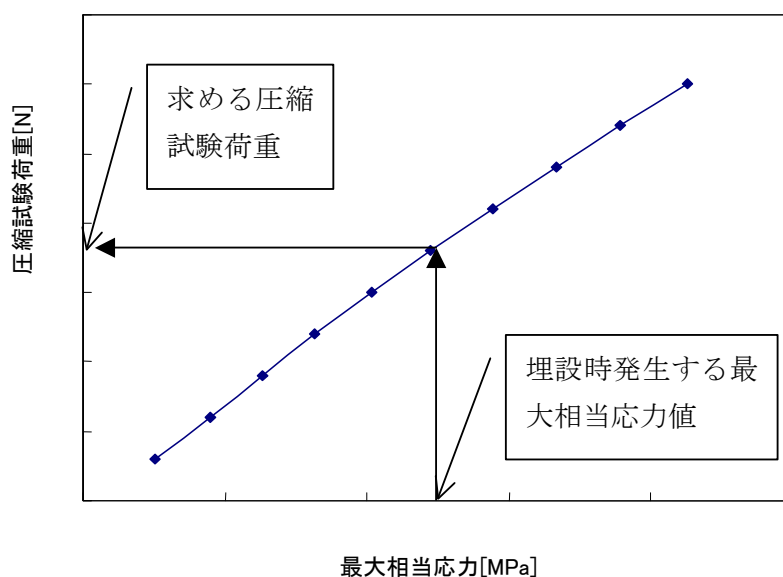


図 3.1 圧縮強度試験解析における最大相当応力と荷重の関係

この様にして各呼び径の設計荷重340 kN/m²が作用した時、管に発生する最大相当応力とそれと等価となる最大相当応力が発生する圧縮試験荷重を表 3.1 に示します。

表 3.1 最大相当応力と等価な最大相当応力を生じる圧縮試験荷重

呼び径	50	75	81	100	130	150
最大相当応力(MPa)	17.4	17.7	15.2	17.7	19.7	15.8
圧縮試験荷重(N)	1140	1840	1800	1710	4240	5040

この結果より、弊社として設定した圧縮試験荷重および試料長を表 3.2 に示します。

表 3.2 圧縮試験荷重および試料長

呼び径	50	75	81	100	130	150
圧縮試験荷重(N)	1200	1900	1900	1900	4300	5100
試料長	(製品ピッチ長)×5					
(参考長 [mm])	(202.5)	(247.5)	(247.5)	(247.5)	(372.5)	(372.5)

3-3 強度評価結果

2-3-1 b)の方法で圧縮強度試験を行い、表 3.2 に示した試料長および圧縮試験荷重時における管外寸の変形率及び試料の状態を表 3.3 に示します。

尚、外寸の変形率は下式により求めました。

$$\delta = \frac{D_1 - D_2}{D_1} \times 100$$

ここに、 δ : 外寸のたわみ率 (%)

D_1 : 圧縮前の外寸 (mm)

D_2 : 圧縮後の外寸 (mm)

表 3.3 試験結果

呼び径	50	75	81	100	130	150
変形率(%)	3.0	2.4	2.5	2.2	1.8	2.5
試料の状態	ひび又は割れ等異常なし					

以上の様に、全ての呼び径において強度評価を行った結果、変形率は外寸の 3.5%以下であり、各部にひび又は割れが生じないことが確認できました。

4. 管相互を直接段積みする場合

角型TACレックスは角型構造を有するため、位置の安定性が良くコンパクトに多条管路を形成することができる製品です。JIS C 3653 附属書3では、管相互を直接段積みするものについても、管単体と同様な取扱をするように規定されていますが、そのJIS C 3653の解説において「管相互を直接段積みしたものと、管単体の変形率を比較した場合、管単体よりも管相互を直接段積みしたものの方が設計上変形率が小さくなることが明らかにされ、かつ実験にて検証されれば管単体で強度評価を行っても良い。」とされています。

そこで、有限要素法による解析を行い、実験にてその検証を行いました。

4-1 段積みした場合の解析

4-1-1 解析手法

解析対象が多段のため、モデル同士の衝突を考慮する必要があります。そこで本解析では、シェル要素とビーム要素を組み合わせました。具体的には、モデルが隣接する箇所にはビーム要素を設定し、ビーム要素に圧縮応力が作用する場合は剛性を持たせることでモデル同士が接触しないようにし、逆に引張応力が作用する場合は剛性を極端に低下させることにより、ビーム要素の影響をなくしました。

a) 要素モデル

多段埋設試験解析ではコンピュータの能力上、フルモデルでの解析は実用的ではありません。そこで本解析では境界条件を考慮して 1/4 モデルを採用しました。採用した有限要素モデルの図 4.1 に示します。なお、総節点数は 4851、シェル要素数は 9216、ビーム要素数は 430 です。

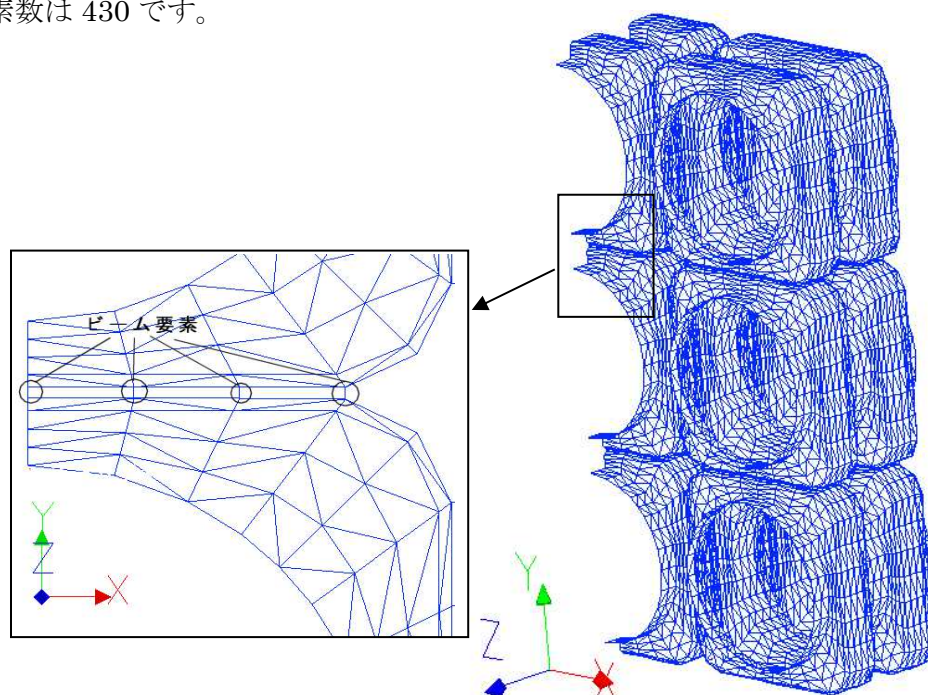


図 4.1 段積みした時の要素モデル

b) 拘束条件

対称性を考慮した拘束条件を図 4.2 に示します。

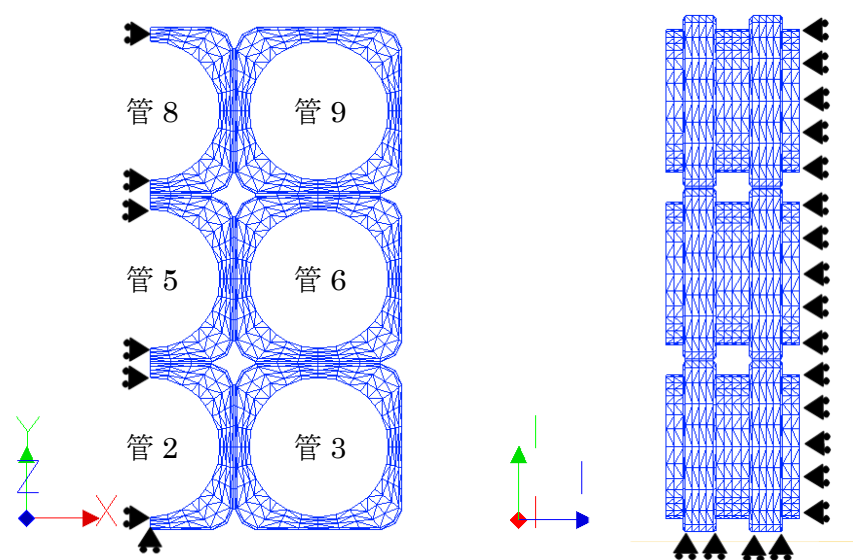


図 4.2 拘束条件

c) 解析結果

設計荷重 $340\text{kN}/\text{m}^2$ を作用させた時の多段試験解析の管内変形量を表 4.1 に示します。

表 4.1 多段埋設試験の管内変形量(設計荷重 $340\text{kN}/\text{m}^2$ 時)

管 9	管 6	管 3	管 8	管 5	管 2
2.55[mm]	0.87[mm]	1.63[mm]	1.67[mm]	1.01[mm]	1.10[mm]

前述の 1 条埋設の解析結果 (図 2.9) に示したように管単体の場合の変形量は 3.0mm であったことより、全ての管において直接段積みした時の変形量は管単体の時より小さくなっています。

4-2 段積みにおける土槽実験

以上の様に段積みされた状態においては管相互が支持し合い、拘束し合う事により変形を抑制することになります。そこでその検証のため段積み状態で地中埋設時の管の挙動について実験を行いました。

a) 実験方法

図 4.3 に示すように土槽に管を 9 条埋設し土槽の上方開口部にほぼ同面積の載荷板をのせ、ここに油圧ジャッキで荷重を加え、その際管に発生する管内径たわみ量を測定しました。

なお、発生するたわみの測定については左右の列の管は対称なので図 4.3 の様に中央の列と端の列の計 6 条の管について測定を行いました。

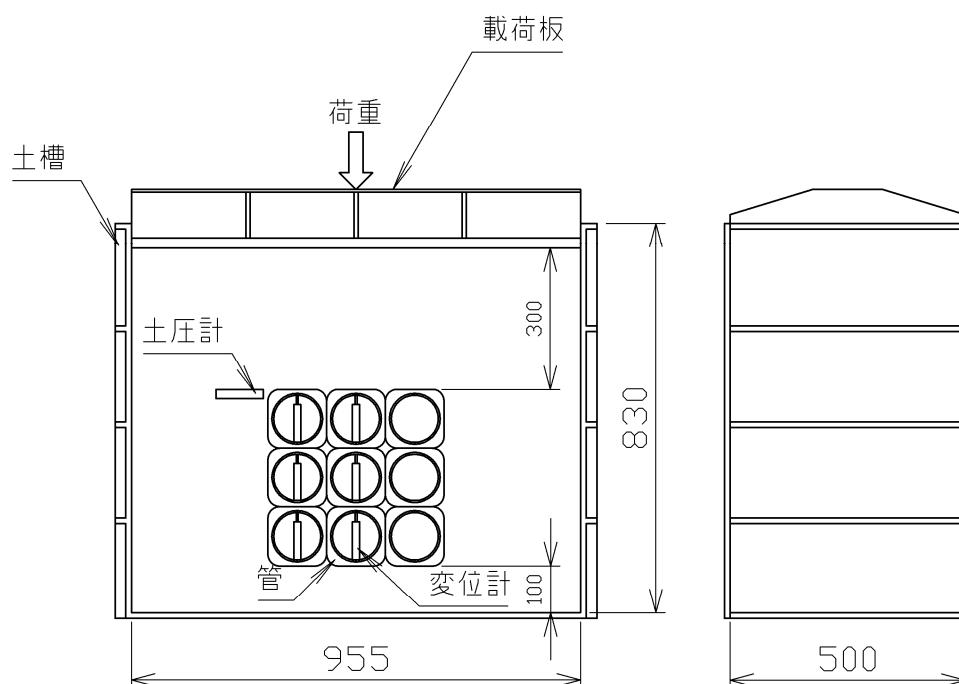


図 4.3

b) 供試体

角型 TAC レックス 呼び径 100 9 条
試料長は製品ピッチ長の 5 倍の長さ

c) 装置

載荷装置・・・30 トン油圧ジャッキ
測定装置・・・ロードセル 200 kN
変位計（発生鉛直たわみ測定）
土圧計（定格容量 1MPa）

d) 埋め戻し材料

埋め戻し材料は前述の土槽実験と同一の川砂としました。

e) 段積みにおける土槽実験結果

設計荷重 $340\text{kN}/\text{m}^2$ に於ける上記段積み埋設時の実験結果を表 4.2 に示します。また同様に設計荷重 $340\text{kN}/\text{m}^2$ における 1 条埋設時の実験結果を表 4.3 に示します。尚、測定管路の位置・管番号を図 4.5 に示します。

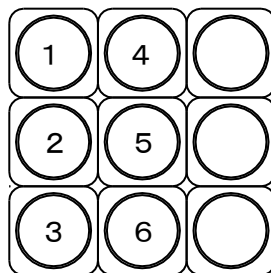


図 4.5 9 条土槽実験内径変位量測定管番号

表 4.2 9 条埋設時の内径変位量（設計荷重 $340\text{ kN}/\text{m}^2$ 時） (mm)

	No.	管 1	管 2	管 3	管 4	管 5	管 6
内径変位量	1	2.12	1.62	1.16	1.99	1.60	2.02
	2	2.14	1.28	0.30	1.00	1.33	1.55
	3	1.78	1.08	0.78	0.93	0.98	1.40

表 4.3 1 条埋設時の内径変位量（設計荷重 $340\text{ kN}/\text{m}^2$ 時） (mm)

項 目	No.	内径変位量
1 条埋設時	1	2.60
	2	2.32
	3	2.40

上記結果より段積みした場合の各管の変形量は 1 条埋設時の場合より小さい値になっています。従って、1 条の場合の圧縮試験荷重で評価しても良いことが実証されました。

以上の結果より弊社「角型 TAC レックス」は JIS C 3653 附属書 3 に規定された強度評価基準を満足するとともに、その他の性能をも満足しているため、この規定に適合した管路材です。

以上