

高耐圧ポリエチレン管による柔構造樋管の設計について

On the design of a flexibly structured sluice made of high pressure-resistant polyethylene tubes.

近年、河川堤防を横断して設けられる樋門・樋管は堤体と函（管）体との間及び周辺部に沈下差が生じて、堤体の抜け上りやクラック、空洞、ゆるみ等が発生し、洪水時の漏水原因あるいは函（管）体自体に悪影響を与えられようになっている。

このような背景から、軟弱地盤上に設置される樋門・樋管について、従来の支持杭による“剛支持方式”から“柔支持方式”を取り入れることにより、堤防全体の安全性を計ることが進められています。

当樋管においても、管体の新素材として注目されている“高耐圧ポリエチレン管”を使用し、新規堤防の増加荷重に対して樋管自体の軽量化を計ることで、将来の沈下量を是正することを提案致しました。

また、管体自体のたわみ性により、盛土による基礎地盤変形に十分追従出来る性質を兼ね備えており、当該条件に適合するものと判断したものであります。

本稿は、大鳳川の支川である秩父別境川の3丁目右岸樋管に、高耐圧ポリエチレン管を用いた柔構造樋管設計について述べるものであります。

横山 篤^{*)}

酒詰 修一^{**)}



1. はじめに

軟弱地盤上に構築される樋門・樋管は、主として支持杭を用いて強固に支持する工法を採用してきましたが、剛性の違いによる堤体と函（管）体及び周辺地盤との沈下差から、堤体が抜け上り堤体に空洞、ゆるみ等が生じ、函（管）体周りでの水密性の確保が大きな課題となって来ています。これらの対応策として「直接基礎を主体とした柔構造、柔支持方式」が発案され、基礎地盤の沈下に追従できる樋門・樋管形式を考えることで樋門・樋管周辺部の安全性を向上し、堤防全体の治水安全度の向上と維持を図ることを目的としております。

現在、建設省において「樋門・樋管設計指針（案）」が昨年3月に策定されており、当樋管もこれに基づき設計するものであります。

当樋管の設計位置は、一級河川大鳳川の支川である秩父別境川の3.2km付近の右岸側であり、町道橋（3丁目橋）の上流であります。

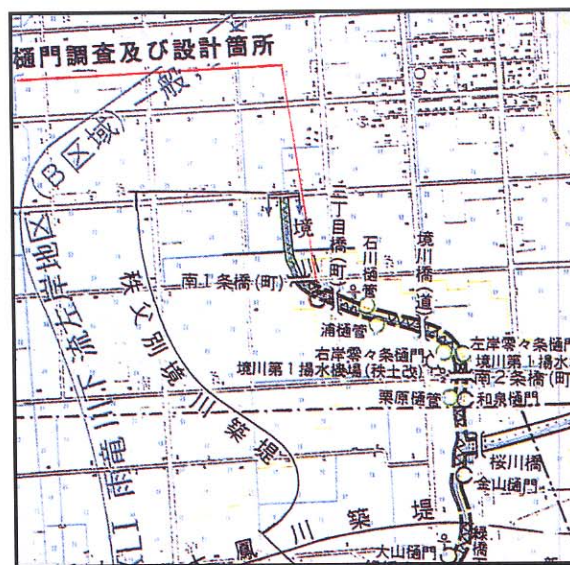


図-1 樋管調査及び設計位置図

2. 設計条件の設定

(1) 断面形状

設計断面は、当樋管が排水対象となる区域の計画排水量を円滑に流下できる断面と致します。また、将来的な維持管理面も踏まえてφ1200の円形断面としました。

流下能力的には、計画排水量 $Q_p = 0.67 \text{ m}^3/\text{sec}$ に対して $Q = 1.85 \text{ m}^3/\text{sec}$ を有しております。

^{*)} 水工部次長（RCCM：河川・砂防及び海岸） Atsushi YOKOYAMA

^{**)} 水工部主任技師（RCCM：河川・砂防及び海岸） Shuichi SAKAZUME

(2) 地盤性状

当該地の土層構成は、既存のボーリング資料と、当設計に対する現位置ボーリング結果より、図-2に示す通りと考えられます。

(3) 将来沈下量及びキャンバー量

現地採取試料による室内土質試験結果を基に、FEM（有限予想法）解析を行い、当該樋管設置後の将来沈下量を推定した結果、泥炭層での圧密沈下量と施工時の即時沈下量の和である残留沈下量が50cmを越えることから、地盤改良としてプレロード工法を採用し、計画盛土に対する圧密沈下量をゼロと考えるものと致しました。

また、即時沈下量として $S = 12.5\text{cm}$ 程度見込めますので、この対策としてキャンバー盛土が考えられますが、当該樋管の延長が12mと一般的な樋門長（30m～50m）に比べて短く、キャンバー盛土の傾斜角が指針（案）で示されている角度を越えるため、キャンバー盛土は行わないものと判断致しました。

(4) 函材の比較及び形状寸法

地盤解析等を踏まえて、一般に考えられる函材について比較を行い、図-4のような形状で設計することとします。

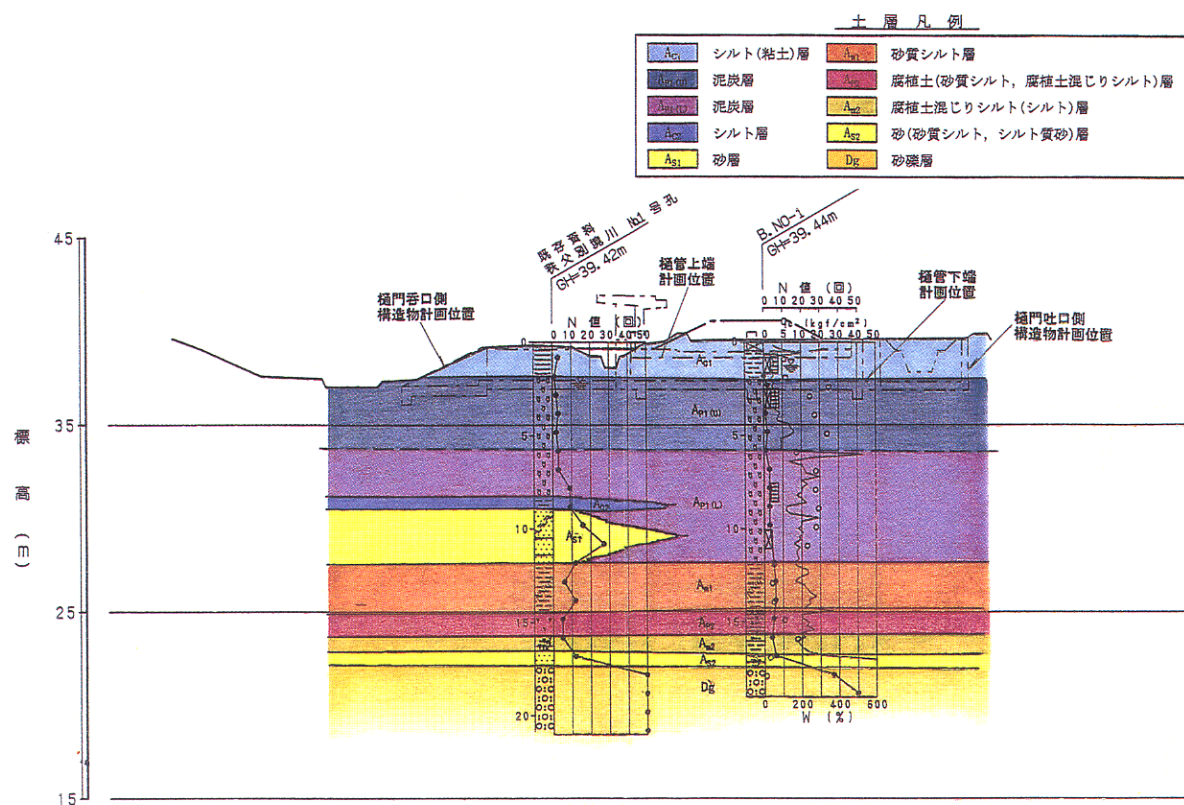


図-2 土層構成

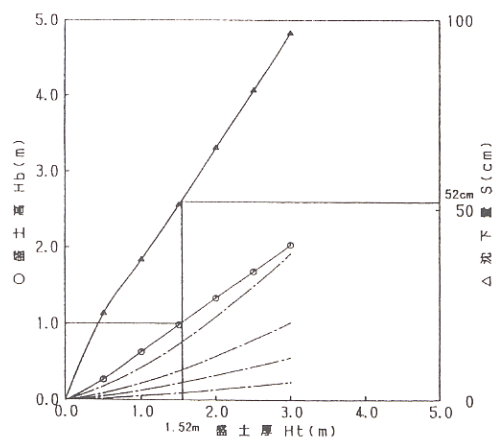
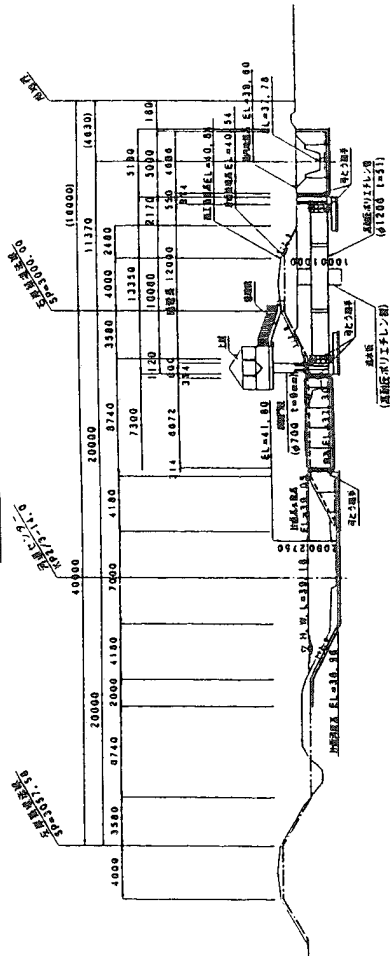


図-3 盛土高と盛土厚と沈下量の関係

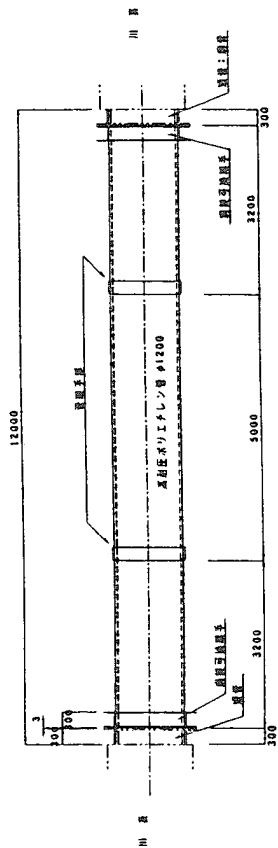
表-1 秩父別境川3丁目右岸樋門函材比較表

図 形 状	施 工 性	得 来 予 測 下 量 (毎時社下)	安 全 性、そ の 他
① R C 函 材	・現場掘削 58 ・管体工機鉄筋施工、埋立 12 ・コンクリート打設(型枠撤去) 7 ・埋戻、盛土 10 ・ゲート、管理棟、上屋敷付 3 ・掘削工 20 - 計 57日≒2ヶ月	・管体部 (18t/㎡) ・門柱部 (8.3 t/㎡) ・社口部 (4.7 t/㎡) ・管口部 (4.7 t/㎡)	工事的には鋼管杭設計に比べ基礎部の費用が削減されるが、当該地盤での将来的な予測低下量が大きく、函体・門柱部と管・社口部との社下量に差があることから、掘削部の形状が許容値を超えることが考えられ、将来的に安全性が確保されない。
② P C 函 材	・現場掘削 58 ・管体付設、築構 3 ・門柱、社口工、管口工、鉄筋、型枠撤去、コンクリート打設、管体埋立 5 ・埋戻、盛土 10 ・ゲート、管理棟、上屋敷付 3 ・掘削工 20 - 計 46日≒1.5ヶ月	・管体部 (18t/㎡) ・門柱部 (8.3 t/㎡) ・社口部 (4.7 t/㎡) ・管口部 (4.7 t/㎡)	P C 函材により、施工日数は削減され工事費も削減できるが、①鋼管杭函体、門柱部と管・社口部との得来予測低下量に差があることから、掘削部の形状が心配である。また、築構での築構作業が伴うため掘削工を必要とする。
③ グ ラ イ ル 管	・現場掘削 58 ・管体付設 2 ・門柱付設 1 ・社口工、管口付設 3 ・ゲート、管理棟、上屋敷付 10 ・埋戻、盛土 3 ・掘削工 20 - 計 44日≒1.5ヶ月	・管体部 (7.0 t/㎡) ・門柱部 (4.0 t/㎡) ・社口部 (2.6 t/㎡) ・管口部 (2.7 t/㎡)	河内での地盤による掘削深さは一番多く、安全性に問題は無い。 得来予測低下量も極低なものであり、掘削部での形状も小さいものと考えられる。ただし、工事的には一番高価となる。
④ 鋼管出先型鋼管	・現場掘削 58 ・管体付設、埋戻 5 ・門柱付設 1 ・社口工、管口付設 3 ・築構盛土 3 ・ゲート工、管理棟、上屋敷付 20 ・掘削工 20 - 計 40日	・管体部 (8.0 t/㎡) ・門柱部 (4.0 t/㎡) ・社口部 (2.6 t/㎡) ・管口部 (2.7 t/㎡)	管材が重いので、将来的な社下量は最も少なく、施工性も良い。(掘削工若しくは鉄管の埋り込み) また、鋼管材による掘削工事費とほぼ同等となるが施工日数(3ヶ月)に対し、40日)の差は、鋼管等の削減につながるものと考えられ、トータルコストでは鋼管が有利である。将来的には海外でのものが多いが、掘削後の掘削面でも問題が生じないため、安全性も十分である。

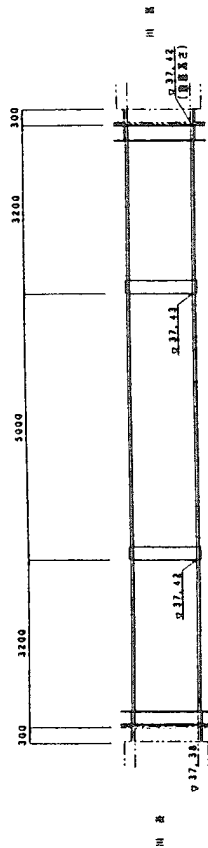
側面図



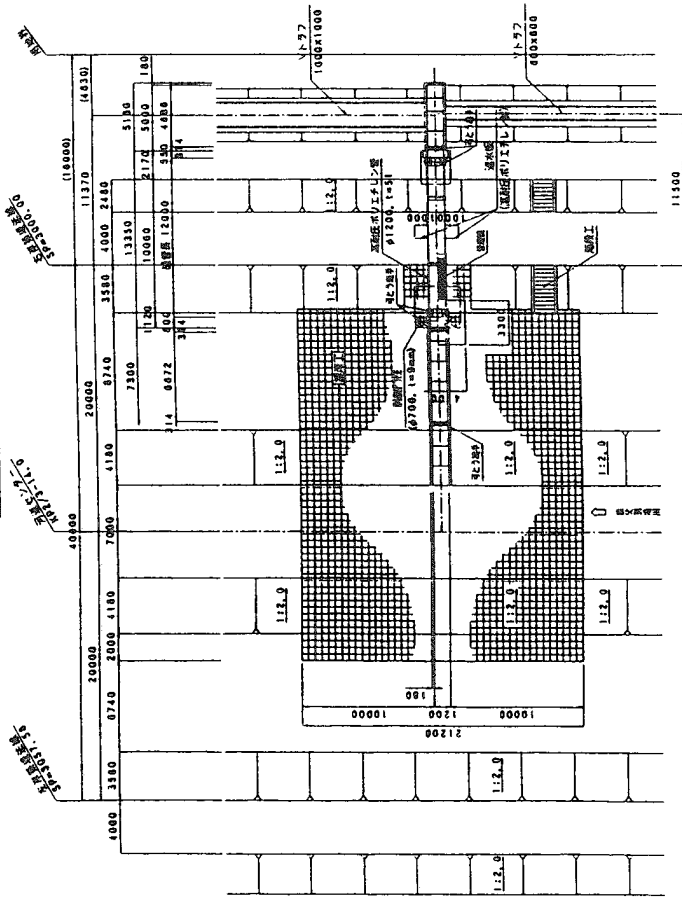
管体平面図



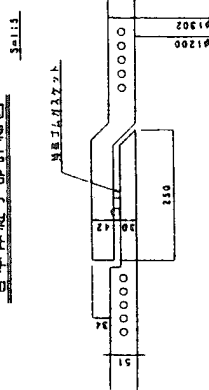
管体布設図



平面図



管本体継手部詳細図



管体断面図

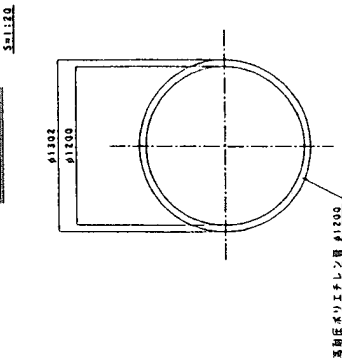


図-4 一般計画図

3. 管体の設計

最終地盤形状にて使用管体の応力計算を行い、管体の安全性を確認するものとします。

3-1. 管体の横方向の計算

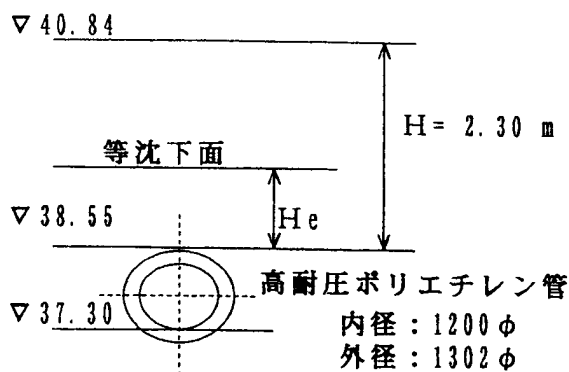
1. 検討項目

高耐圧ポリエチレン管の構造計算は、以下の項目の計算値が許容値以下であることを確認する。

- ①管体のたわみ率の検討
- ②管体に発生する曲げ応力の検討

2. 検討条件

使用管種：ハウエル管（IF種）φ1200
 管剛性： $SR=EI/r_m^3=0.30(\text{kg}/\text{cm}^2)$
 管外径： $D=130.2(\text{cm})$
 管体の平均半径： $r_m=62.24(\text{cm})$
 土被り： $H=230$
 上載荷重： $W_v=0$
 活荷重： $T=25$
 施工支持角：360度砂基礎
 設計支持角： $2\alpha=120(^{\circ})$
 埋戻し土の単位体積重量： $\gamma_t=0.0018(\text{kg}/\text{cm}^3)$
 埋戻し土の内部摩擦角： $\phi=30(^{\circ})$
 土の受働抵抗係数： $e'=28(\text{kg}/\text{cm}^2)$
 埋設方法：突出型



3. 構造計算

地中に埋設する高耐圧ポリエチレン管の構造計算は、計画する土被り及び上載荷重により管に作用する荷重と基礎構造により管体に発生するたわみ率及び最大曲げ応力を計算し、そのいずれもが許容値を満足することを確認する手法により行うものとします。

①土圧計算

土被り $H>2$ (m) より、埋設管に作用する土圧はマーストン公式（突出型）によるものとします。

②活荷重の計算

「道路橋示方書、同解説」（日本道路協会発行）によるものとします。

③構造計算

「農水省構造改善局：パイプライン設計指針」に準じる「ハウエル管技術資料・設計マニュアル」によるものとします。

(1) 鉛直荷重及びたわみ量の計算

①等沈下面：He

$$e^{-2K\mu Hc/D} = -2K\mu \cdot He/D - 2K\mu \cdot \gamma_{sd}P + 1$$

$$He = 98.4$$

He：等沈下面 (cm)

ϕ ：埋戻し土の内部摩擦角 ($^{\circ}$) = 30

K：主働土圧係数

$$[K = \tan^2 (45 - \phi/2)] = 0.3333$$

μ ：摩擦係数 [$\mu = \tan \phi$] = 0.5774

D：管外径 (cm) = 130.2

γ_{sd} ：沈下比 = -0.1

P：突出比 = 1

②突出型の土圧係数：Cc

・ $H \geq He$ の場合

$$Cc = (1 - e^{-2K\mu Hc/D}) / 2K\mu + (H - He) / D \cdot e^{-2K\mu Hc/D}$$

$$Cc = 1.4114$$

Cc：突出型の土圧係数

H：土被り (cm) = 230

He：等沈下面 (cm) = 98.4

ϕ ：埋戻し土の内部摩擦角 ($^{\circ}$) = 30

K：主働土圧係数

$$[K = \tan^2 (45 - \phi/2)] = 0.3333$$

μ ：摩擦係数 [$\mu = \tan \phi$] = 0.5774

D：管外径 (cm) = 130.2

③土圧、上載荷重による鉛直荷重：Wv

$$W_v = \alpha \cdot Cc \cdot \gamma_t \cdot D + W_v'$$

$$W_v = 0.331$$

Wv：土圧、上載荷重による鉛直荷重

(kg/cm²)

α ：土圧割増し係数 = 1.0

Cc：突出型の土圧係数 = 1.4114

γ_t ：土の単位体積重量 (kg/cm³) = 0.0018

D：管外径 (cm) = 130.2

Wv'：上載荷重 (kg/cm²) = 0

④鉛直荷重による管のたわみ量：ΔXi

$$\Delta X_i = \frac{2F \cdot Fk \cdot W_v \cdot r_m}{(SR + 0.061 \cdot e')}$$

$$\Delta X_i = 2.31$$

ΔXi：鉛直荷重による管体のたわみ量 (cm)

F : 変形遅れ係数=1.25
 W_v : 土圧による鉛直荷重(kg/cm²)=0.331
 F_k : 鉛直荷重に関する基礎の支持角係数
 $=0.089$
 r_m : 管体の平均半径 (cm) =62.24
 $S R$: 管剛性(kg/cm²) =0.30
 e' : 土の受働抵抗係数(kg/cm²) =28

F_k : 自動車荷重に関する基礎の支持角係数=0.089
 W_v : 自動車荷重による鉛直荷重(kg/cm²)
 $=0.194$
 r_m : 管体の平均半径 (cm) =62.24
 $S R$: 管剛性(kg/cm²) =0.30
 e' : 土の受働抵抗係数(kg/cm²) =28

表-2 基礎の支持角係数: F_k

設計支持角	0	30	45	60	90	120	180
支持角係数	0.110	0.108	0.105	0.102	0.096	0.089	0.083

表-3 土の受働抵抗係数: e' の標準値

パイプの裏込め材料の種類 統一分類法 (a)	裏込めの締固め度に応じた e' (kg/cm ²)			
	ダンプしたままの状態	緩い状態 $\gamma_d \max(b)$ <85% 相対密度 <40%	普通の状態 $\gamma_d \max$ 85%~95% 相対密度 40%~70%	密な状態 $\gamma_d \max$ >95% 相対密度 >70%
・粘土のよい土 (LL<50) ・中位から無塑性の土で25%以上の粗粒分を含む CL, ML, WL-CL	3.5	14	28	70
・粘土のよい土 (LL<50) ・中位から無塑性の土で25%以上の粗粒分を含む CL, ML, WL-CL ・細粒分を含む粗粒土で12%以上の細粒分を含む GH, GC, SW, SC	7	28	70	140
・細粒分を含んでないか、少量含んでいる粗粒土で12%以下の細粒分を含む GW, GP, SP, SP	14	70	140	210
・破砕岩	70	210	210	210

(a) ASTM企画D-2487 USBR企画E-3
 (b) $\gamma_d \max$: standard proctorの最大乾燥密度に対する比

(2) 自動車荷重による鉛直荷重及びたわみ量の計算

①自動車荷重による鉛直荷重: W_v

$$W_v = 2 P \cdot (1+i) \beta / C (a + 2 H \tan \theta)$$

$$W_v = 0.194$$

W_v : 自動車荷重による鉛直荷重(kg/cm²)

P : T-25後輪荷重=10000 kg

i : 衝撃係数 ($H \leq 150\text{cm}$, $i=0.5$,
 $150\text{cm} < H < 650\text{cm}$,
 $i=0.65-H/1000$,
 $H \leq 150\text{cm}$, $i=0$)

β : 低減係数=0.9

C : 車体占有幅=275cm

a : タイヤの接地長さ=20cm

θ : 荷重の分散角=45°

②自動車荷重による管体のたわみ量: ΔX_2

$$\Delta X_2 = 2 \cdot F_k \cdot W_v \cdot r_m / (S R + 0.061 \cdot e')$$

$$\Delta X_2 = 1.08$$

ΔX_2 : 自動車荷重による管体のたわみ量
 (cm)

(3) 管体のたわみ率の計算

①管体のたわみ量: ΔX

$$\Delta X = \Delta X_1 + \Delta X_2$$

$$\Delta X = 3.39$$

ΔX : 管体のたわみ量 (cm)

ΔX_1 : 鉛直荷重による管体のたわみ量 (cm)
 $=2.31$

ΔX_2 : 自動車荷重による管体のたわみ量
 (cm) =1.08

②管体のたわみ率: V

$$V = \Delta X / 2 r_m \times 100$$

$$V = 2.7$$

V : 管体のたわみ率 (%)

ΔX : 管体のたわみ量 (cm) =3.39

r_m : 管体の平均半径 (cm) =62.24

(4) 管体に発生する最大曲げ応力 (管底部) の計算

①鉛直荷重, 管内水重による水平荷重: P_v

$$P_v = 1 / F \cdot e' / r_m \cdot \Delta X_1 / 2$$

$$P_v = 0.416$$

P_v : 鉛直荷重による水平荷重(kg/cm²)

F : 変形遅れ係数=1.25

e' : 土の受働抵抗係数(kg/cm²) =28

r_m : 管体の平均半径 (cm) =62.24

ΔX_1 : 鉛直荷重による管体たわみ量 (cm)
 $=2.31$

②自動車荷重による水平荷重: P_w

$$P_w = e' / r_m \cdot \Delta X_2 / 2$$

$$P_w = 0.243$$

P_w : 自動車荷重による水平荷重

e' : 土の受働抵抗係数(kg/cm²) =28

r_m : 管体の平均半径 (cm) =62.24

ΔX_2 : 自動車荷重による管体のたわみ量
 (cm) =1.08

③最大曲げモーメント (管底部): M

$$M = k \cdot (W_v + W_w) \cdot r_m^2 + k_p \cdot (P_v + P_w) \cdot r_m^2$$

$$M = 136$$

M : 最大曲げモーメント (管底部)
 (kg·cm)

k : 基礎の支承角による曲げモーメント係数 = 0.275
 k_p : 基礎の支承角による曲げモーメント係数 = -0.166
 W_v : 土圧による鉛直荷重 (kg/cm²) = 0.331
 W_w : 自動車荷重による水平荷重 (kg/cm²) = 0.243
 r_m : 管体の平均半径 (cm) = 62.24

表-4 撓性管の設計支承角による最大曲げモーメント係数 (管底)

基礎の設計支承角	0	30	60	90	120	180
k	0.587	0.468	0.377	0.314	0.275	0.250
k_p	0.166					

④管体に発生する最大曲げ応力: σ
 $\sigma = M/Z = 6 \cdot M/t^2$
 $\sigma = 40.84$
 σ : 管体に発生する最大曲げ応力 (kg/cm²)
 M : 最大曲げモーメント (管底部) (kg·cm) = 136
 Z : 断面係数 (cm³)
 t : 換算肉厚 (cm) = 4.47

(5) 安全性の確認

①構造設計の許容値

- ・許容たわみ率: $V_a = 5.0$ (%)
- ・許容発生曲げ応力: $\sigma_a = 136$ (kg/cm²)

②計算結果

- ・たわみ率
 $V = 2.7$ (%) < $V_a = 5.0$
- ・最大発生曲げ応力
 $\sigma = 40.84$ (kg/cm²) < $\sigma_a = 136$ (kg/cm²)

以上の検討結果より、許容たわみ率、許容曲げ応力を全て満足しており、使用に十分耐えうるものと判断されます。

また、管体の縦方向及び可撓継手についても、鉛直荷重、活荷重に対して安全な構造となっていることを計算により確認致しました。

4. おわりに

本樋管位置は、新規堤防を施す区間であり現況形状に比べ増加荷重が発生する特徴を持ち合わせていたため、高耐圧ポリエチレン管の特質を最大限活かすことが出来ました。

さらに、川表・川裏の構造を鋼製にすることにより、管体と同様な沈下量とすることが出来たことは、呑口・吐口を含めた樋管の附帯施設についても一連の構造物として、管体と同様な沈下を許容し、常に敷高に段差を生じない望ましい設計結果とすることが出来たと思われます。

しかし、工事費的には従来の剛支持方式によるものより割高となり、継手部及び鋼製部分に工事費の大部分が割かれることは、今後の柔構造方式を進める上で改善していかなければいけない要素と考えられます。

参考文献

- 1) 土木学会: 水理公式集
- 2) ㈱日本河川協会: 建設省河川砂防技術基準 (案) 同解説 設計編〔Ⅱ〕1997.9
- 3) ㈱日本道路協会: 道路橋示方書Ⅰ,Ⅳ 1996.12
- 4) ㈱日本道路協会: 道路土工 擁壁・カルバート・仮設構造物工指針
- 5) 農水省構造改善局: 土地改良事業計画設計基準 パイプライン 1988.3
- 6) ㈱国土開発技術研究センター: 樋門設計指針 (案) 1997.9

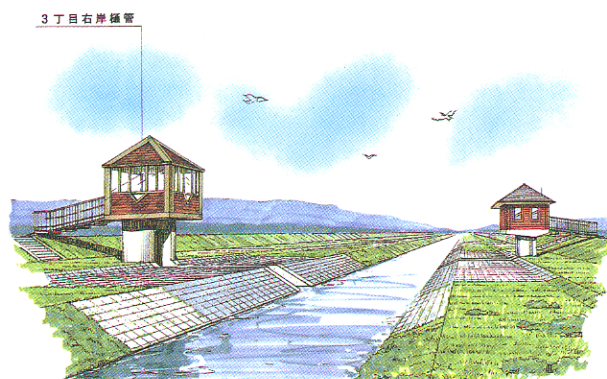


図-5 完成景観図