

管路更生の設計手法入門

第2回 埋設管に作用する外圧の種類

1. はじめに

現在、国内では種々の管路が埋設されている。これら埋設管路は、使用目的の違い、内圧の有無や管材の種類によって分類される。一般に国内に埋設されている管路は約180万kmと言われており、そのうちの約40万kmが下水道管路である。

埋設管路に作用する外圧も様々であり、管種や設計の考え方によって使われる算定方法が異なる。既設管内に新たな管路を構築する更生工法も設計の考え方によって作用する外圧が変わってくる。

連載講座の第2回目となる今回は、上記の内容を踏まえて、埋設管路に作用する外圧について、実際に設計に用いられているものを中心に解説をしていく。

2. 埋設管に働く諸荷重¹⁾

埋設管に働く諸荷重は、大きく二つに分けられる。すなわちA. 常時働く荷重とB. 一時的に働く荷重である。さらに細分化するならば一時的に働く荷重は、B-1. 長時間作用、B-2. 短時間作用、B-3. 特殊の3種類に分けることができる。

以下に各荷重の内容を示す。

A. 常時働く荷重

- ・ 管体自重
- ・ 管路に働く垂直方向土圧
- ・ 管路に働く水平方向土圧
- ・ 地上部の常時荷重（家、ビル等）

B-1. 長時間作用する一時的荷重

- ・ 地下水圧
- ・ 交通荷重（自動車、鉄道等）

B-2. 短時間作用する一時的荷重

- ・ 試験圧力（内水圧試験等）

B-3. 特殊一時的荷重

- ・ 地震時圧力

このうち、B-2. 短時間作用、B-3. 特殊一時的圧力は、通常的设计時は考慮する必要がない。

あらゆる種類の管路は、これら荷重を組み合わせ作用させ設計されている。多くの管路設計に

おいて、主要な組み合わせは、A. 常時働く荷重と、B-1. 一時的に働く荷重（長時間作用）および一つのB-2. 一時的に働く荷重（短時間作用）で構成される。

次章より、A. 常時働く荷重として“土圧”と、B-1. 一時的に働く荷重として“交通荷重（活荷重）”について説明していく。

3. 埋設管に働く土圧

3-1. 概要

地中の管路には、鉛直（方向）土圧と水平（方向）土圧が作用する。これら土圧の分布、特に水平土圧は、管種や荷重の種類により異なる。

塩ビ管やFRPM管等の可撓性管では、図3-1に示す二等辺三角形分布が、鋼管ではスパングレーの仮定した放物線分布が用いられている²⁾。但し、農業用水の設計においては、可撓性管でもスパングレーの放物線分布が用いられる³⁾。

下水道埋設管設計において、可撓性管の場合、水平土圧（底面反力も）は曲げモーメントと、たわみ係数に反映されている。

また、剛性管では水平土圧によるモーメントは、鉛直土圧モーメントと逆に作用する傾向があり、管自重や管内流体自重のモーメントにより相殺されるとして考慮しない。

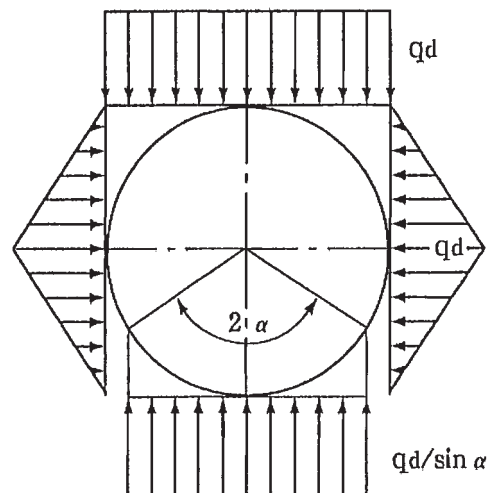


図3-1 土荷重による土圧分布

従って、下水道埋設管設計に際して計算する土圧は、鉛直土圧のみとなる。

3-2. 代表的な土圧算定式

埋設管の設計では、種々の鉛直土圧算定式が用いられる。以下に代表的な土圧算定式を示す。

(1) 垂直公式⁴⁾

垂直公式は、種々の土圧算定式の中で、一番基本となる式であり、既設管の管幅上に分布する土柱の重量が直接管に作用するものとし、土の摩擦力を無視して求める。

この式は、条件を問わず広く用いられており、日本下水道協会規格の可撓性管とされている管 (JSWAS K-1、JSWAS K-2 等) の設計にも使用されている。

$$q = \gamma \cdot H \dots\dots\dots (式 3-1)$$

ここに、 q : 土による鉛直土圧 (kN/m²)
 γ : 土の単位体積重量 (kN/m³)
 H : 土被り (m)

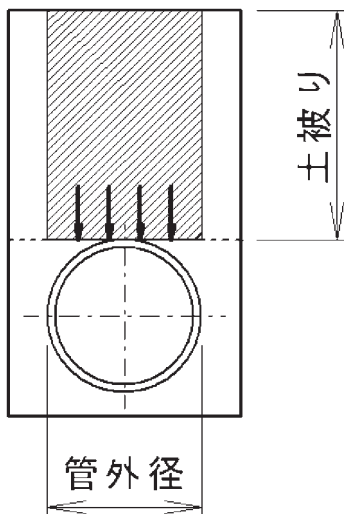


図 3-2 (a) 垂直公式

(2) マーストン溝型式^{5)、6)}

マーストン溝型式は、埋戻し土と掘削溝壁との間に上向きの摩擦力が生じると考え、管上部の掘削溝幅内の土柱重量から、この摩擦力を減じたものが管に作用すると考えるものである。

マーストン溝型式は、一般的に締め固めが十分に行われない場合、または剛性管に適用される。また、マーストン式には、原地盤上の盛土内に管を敷設する場合の設計に使用するマーストン突出型式等もある。

なお、管路更生工事は非開削で行われるため、 B_d は“掘削溝幅”ではなく、“仮想掘削溝幅”⁶⁾と呼ばれる。

$$q = \frac{\gamma}{2K\mu} (1 - e^{-2K\mu H/B_d}) \cdot \frac{B_d^2}{B_c} \dots\dots\dots (式 3-2)$$

ここに、 q : 土による鉛直土圧 (kN/m²)
 γ : 土の単位体積重量 (kN/m³)
 H : 土被り (m)
 B_c : 更生管外径 (= 既設管内径) (m)
 B_d : 掘削溝幅 (m)
 μ : 溝壁と埋戻し土の摩擦係数 (= $\tan \phi$)
 ϕ : 埋戻し土の内部摩擦角 (°)
 K : 埋戻し土の主働土圧係数

$$K = \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi}$$

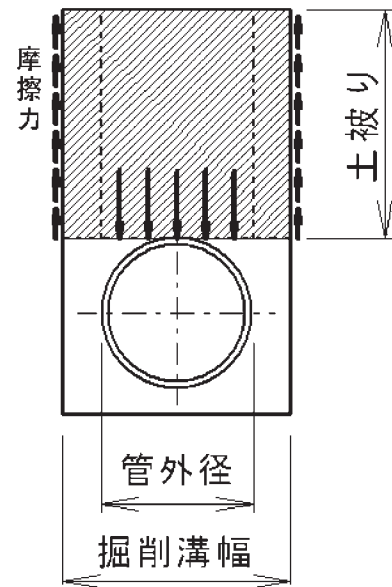


図 3-2 (b) マーストン溝型式

(3) ヤンセン公式^{5)、6)}

ヤンセン公式は、マーストン溝型式と同様、埋戻し土と溝壁の間に上向きの摩擦力が生じると考え、管上部の掘削溝幅内の土柱重量から、摩擦力を減じたものが、溝幅全体に等分布すると考えるものである。

ヤンセン公式は、管側の埋戻し土が十分に突き固められて、管と同程度に上部荷重を支持すると仮定した場合に成立する。

また、ヤンセン公式は可撓性管に用いられることが多い。これは管側の締め固めが不十分でも、土の圧

密とともに管もたわむため、ヤンセン公式の値が実態により近いとめと考えられる。

$$q = \frac{\gamma}{2K\mu} (1 - e^{-2K\mu H/B_d}) \cdot B_d \dots\dots\dots (式 3-3)$$

「管更生の手引き(案)」⁶⁾では、式 3-3 に埋戻し土の粘着力を加えた次式が用いられている。

$$q = \left(\frac{\gamma \cdot B_d}{2} - f \right) \cdot \left(\frac{1 - e^{-2K\mu H/B_d}}{K \cdot \mu} \right) \dots\dots (式 3-4)$$

f : 埋戻し土の粘着力 (kN/m²)

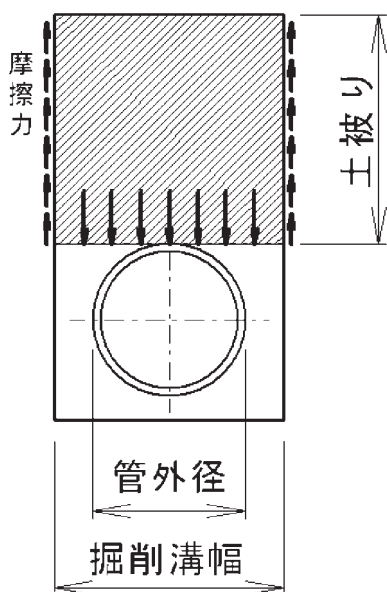


図 3-2 (c) ヤンセン公式

(4) テルツァギー公式⁵⁾

非開削管きょ敷設工法として、よく知られているのが推進工法とシールド工法である。これらの工法の設計において、よく用いられる土圧算定式がテルツァギー公式である。

テルツァギー公式は、推進管またはシールド機の動きによって管体上部の一部が“ゆるむ”とする考え方である。

$$\left. \begin{aligned} q &= \frac{(\gamma \cdot B_e - 2f)}{2k \cdot \mu} (1 - e^{-2k\mu H/B_e}) \\ B_e &= B_t \left\{ \frac{1 + \sin(45^\circ - \phi/2)}{\cos(45^\circ - \phi/2)} \right\} \\ B_t &= B_c + 0.1 \end{aligned} \right\} \dots\dots (式 3-5)$$

ここに、 q : 土による鉛直土圧 (kN/m²)
 γ : 土の単位体積重量 (kN/m³)

- H : 土被り (m)
- B_c : 更生管外径 (= 既設管内径) (m)
- B_t : トンネル直径 (m)
- B_e : 土のゆるみ幅 (m)
- f : 土の粘着力 (kN/m²)
- \square : 土の摩擦係数 (= $\tan \phi$)
- ϕ : 土の内部摩擦角 (°)
- k : 側方土圧係数 (= 1 としている)

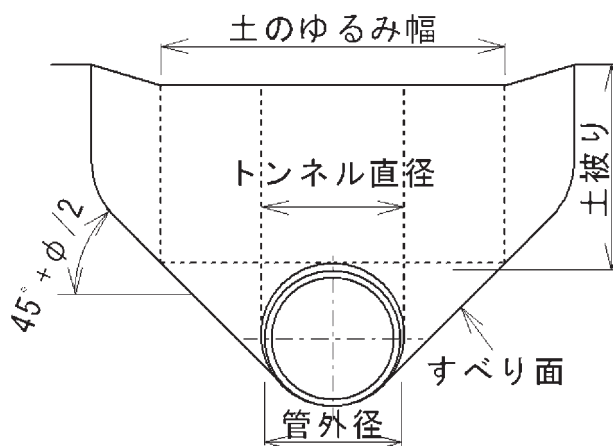


図 3-2 (d) テルツァギー公式

3-3. 土圧算定式に用いられる土質定数

(1) 単位体積重量 “ γ ”

単位体積重量は、土質試験により決定することが望ましい。管路更生工事の場合、ほとんどが非開削工事であるため、土質試験は行わないことが多い。

この様に実測値が得られない場合には、「道路橋示方書 I 共通編」(社)日本道路協会 2002⁷⁾に示す 18kN/m³ の値が採用される場合が多い。

(2) 内部摩擦角 “ ϕ ”

内部摩擦角は、三軸圧縮試験により求める方法や、標準貫入試験で得られる N 値から換算式で求める方法等がある。

これら土質試験を行わない場合、管路設計では埋戻し土の種類に応じた内部摩擦角を使用することが多い。

一般的には、「道路土工 擁壁工指針」(社)日本道路協会 1999⁸⁾において土圧算定に用いられている砂質土の内部摩擦角 = 30° を用いることが多い。

(3) 粘着力 “ f ”

粘着力は、三軸圧縮試験により求める方法や、標準貫入試験で得られる N 値より換算して求める方法等がある。

一般的に、管路設計においては、砂質土は粘着力 = 0 と考えて内部摩擦角で評価し、粘性土は粘着力

で評価する。管路設計では、砂質土で埋戻すと考えるため、粘着力は考慮しない。

但し、管路更生の設計においては、埋戻しからかなりの年数が経過しているため、原地盤の粘着力が土質試験により得られるのであれば、粘着力を考慮した方が良い。

3-4. 管路更生設計での土圧算定式

(1) 「管更生の手引き(案)」⁶⁾ の考え方

「管更生の手引き(案)」では、既設管周辺の地盤が“乱されない場合”と、“乱される場合”とで土圧の考え方を分けている。

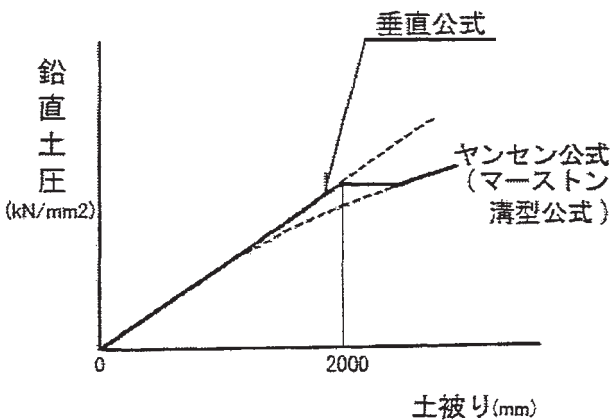
地盤が“乱される場合”とは、将来、既設管上部で下水道もしくは他企業埋設物の施工予定がある、または施工が予想される場合を示す。

“乱されない場合”と“乱される場合”どちらの場合においても、「管更生の手引き(案)」における土圧算定式は“ヤンセン公式”が基本となっている。

更生工事を行う既設管は、敷設から数十年が経過しているものが多く、周辺地盤は十分に圧密され力学的強度も増し、安定状態にあるといえる。このことから、“垂直公式”相当の土圧が作用しないと考えられる。

従って、地盤が“乱されない場合”には土被りに関わらず“ヤンセン公式”を用いる。“乱される場合”には図3-3に示すように土被りにより、“垂直公式”と“ヤンセン公式”とを組み合わせて用いる。

すなわち、土被りが2.0mまでは垂直公式で、土被り2.0m以上の場合は、土被り2.0m時の垂直公式の値とヤンセン公式で求めた値の大きい方を採用している。この考え方は、更生工法の設計に限らず、その他の管種の設計でも用いられている考



(管周辺の地盤が乱される場合)

図3-3 土圧算定式の適用

え方である。

また、「管更生の手引き(案)」では、シールド工法や推進工法等の非開削工法で施工された既設管を更生する場合も記述されている。この場合、既設管が設計された時に使用された土圧算定式を用いる。非開削工法の設計で 사용되는代表的な土圧算定式が、前節に記述した“テルツァギー公式”である。

(2) “ヤンセン公式”と“マーストン溝型式”

“ヤンセン公式”と“マーストン溝型式”は、非常に似ているので、混同されることが多い。

図3-2(b)と図3-2(c)を見比べれば判るように、“マーストン溝型式”では、掘削溝幅内の等分布荷重の全てが管幅に作用するのに対して、“ヤンセン公式”では等分布荷重が溝幅全体に作用する。

参考として、同条件(管径、土被り、掘削幅等)における土圧を前節で紹介した4つの土圧算定式を用いて算出した。表3-1に算出結果をまとめる。

この表より、同条件での土圧算定値は、“マーストン溝型公式”>“垂直公式”>“ヤンセン公式”>“テルツァギー公式”となった。

“マーストン溝型公式”の算定値は、“ヤンセン公式”の約2.8倍、“垂直公式”と比較しても約1.1倍～約2.1倍と大きい値であることが分かる。

表3-1 管径300の場合の土圧算定結果

単位：kN/m²

土被り	土圧算定式			
	垂直公式	マーストン溝型公式 ¹⁾	ヤンセン公式 ¹⁾	テルツァギー公式
1.5 m	27.0	55.5	19.6	9.9
3.0 m	54.0	83.7	29.5	10.7
5.0 m	90.0	100.9	35.6	10.8

*1：掘削幅 $B_d = 0.85m^3$

(3) 仮想掘削溝幅

先に述べたように、管路更生工事は、非開削工事であるため、開削工事のように実際に溝を掘削することはない。従って、管路更生の設計においては、掘削溝幅は仮想掘削溝幅と呼ばれる。

既設管上部の土が“乱されない場合”として設計する時は、仮想掘削幅＝既設管内径(更生管外径)として良いと考えられる。

一方、土が“乱される場合”として設計する時は、各自治体の標準掘削断面を参考にすることが望ましい。但しこの場合、掘削溝幅がひろくなるため、管に作用する土圧も大きくなる。

4. 管路に働く活荷重

4-1. 概要

管路に働く活荷重は、“長時間作用する一時的荷重”であり、主として“交通荷重”を指す。埋設管上を車輛、もしくはその他の活荷重が通過する時、この荷重による圧力が土圧荷重に加算される。

道路下の管においては、その道路上を通過する最大の車輛を考慮する必要がある。その他に軌道下の管では電車による活荷重を考慮する。特殊なものでは、無限軌道荷重や飛行機荷重がある。¹⁾

可撓性管の活荷重による土圧分布は、図4-1に示すとおりである。活荷重による水平土圧分布は、土荷重と異なり直角三角形分布となる。やはりこの土圧分布も下水道用硬質塩化ビニル管（JSWAS K-1）に準拠したものである。

可撓性管の活荷重による水平土圧も設計においては曲げモーメント係数とたわみ係数に反映されているので、実際に計算する必要はない。

また、剛性管の活荷重による水平土圧も、土荷重による水平土圧と同じ理由により考慮しない。

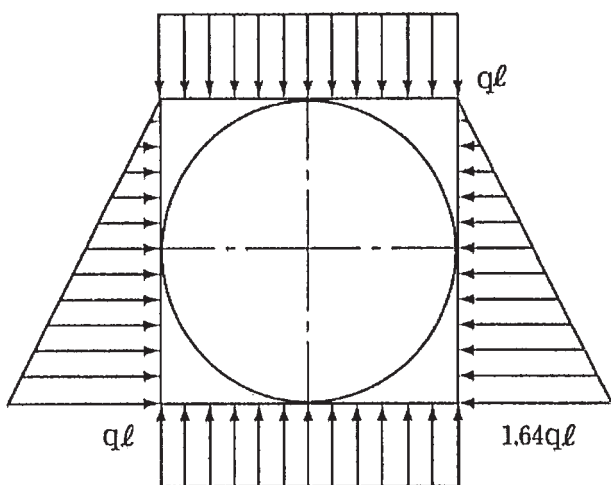


図4-1 活荷重による土圧分布

4-2. 荷重計算式

現在、使用されている活荷重による土圧を算定する主な式は、次に紹介する2つの式である。

- (1) 45°分散公式
- (2) ブーシネスク公式

45°分散公式は、鉄筋コンクリート管や硬質塩化ビニル管等で使用され、ブーシネスク公式はダクタイル鋳鉄管等で使用されている。更生管路は、硬質塩化ビニル管もしくは鉄筋コンクリート管に準拠した設計としているので、基本的に45°分散公式を使

用する。

(1) 45°分散式

45°分散式は、多くの埋設管設計に使用されており、日本下水道協会規格の多くの管種でも使用されている。更生管路は、この日本下水道協会規格に準じて設計するため、45°分散式を通常使用する。

活荷重による鉛直土圧は、地表面よりある角度で分布すると考える。分布角は、車輛の進行方向については45°に分布するものとし、それと直角方向については、車輛が並列することを考慮して、車体占有幅の範囲に分布するものとする。

「道路橋示方書 I 共通編」（社）日本道路協会 2002)において、自動車の場合、車体占有幅 $C = 2.75\text{m}$ 、車輪設置長さ $\alpha = 0.2\text{m}$ としている。また、断面力の低減係数 β について、T荷重の時は0.9、T荷重以外の時は1.0とする。

$$p = \frac{2P(1+i) \cdot \beta}{C(\alpha + 2H \cdot \tan \theta)}$$

ここに、 p : 活荷重による鉛直土圧 (kN/m^2)

H : 土被り (m)

P : 後輪荷重 (kN)

T-25 : 100kN、T-14 : 56kN

α : 車輪設置長さ (m)

β : 低減係数

C : 車体占有幅 (m)

θ : 分布角 (= 45°)

i : 衝撃係数 (下表参照)

表 衝撃係数⁹⁾

$H(\text{m})$	$H < 1.5$	$1.5 \leq H < 6.5$	$6.5 \leq H$
i	0.5	$0.65 - 0.1H$	0

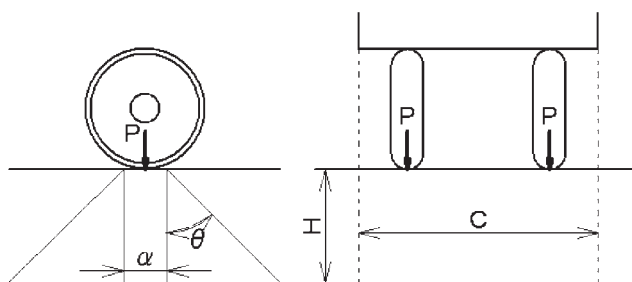


図4-2 輪荷重の分布

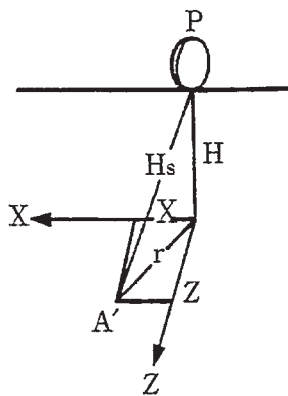
(2) ブーシネスク式

ブーシネスク公式は、古典的な弾性理論方程式であり埋設管の設計をする場合には、基本的な式といえる。

ただし、ブーシネスク式によって求まるのは、地下の任意の一点における圧力である。そのため管に作用する全体の荷重を求めるには、管上の p を積算しなければならない。

厳密には積分する必要があるが、計算が複雑になるので、一般的には、管を幾つかの正方形で区分し、正方形に掛かる荷重を合計して全体荷重とする。

一般に、 α を求めるには $H - \alpha$ 線図を用いる。



$$\begin{aligned}
 p &= \frac{3}{2\pi} \cdot \frac{H^3}{H_s^5} P \\
 &= \frac{3}{2\pi} \cdot \frac{H^3}{(H^2 + r^2)^{5/2}} P \\
 &= \frac{3}{2\pi} \cdot \frac{H^3}{(H^2 + X^2 + Z^2)^{5/2}} P
 \end{aligned}$$

$$W_t = 1.5\alpha \cdot P$$

$$P = \frac{4}{5} \cdot \frac{1}{2} U$$

$$\alpha = \frac{\sum (\Phi \cdot a)}{\sum a}$$

$$\Phi = \frac{3}{2\pi} \cdot \frac{H^3}{(H^2 + X^2 + Z^2)^{5/2}}$$

- ここに、 P : 集中荷重 (kN)
 p : 地下の任意の点 A' における垂直圧力 (kN/m²)
 H : A' 点の地表面下の深さ (m)
 H_s : P の作用点から A' までの距離 (m)

W_t : 路面荷重による土圧 (kN/m²)

P : トラック 1 後輪荷重 (kN)

U : トラック重量 (kN)

1.5 : 衝撃係数

α : 管径、土被りにより定まる係数 (m⁻²)

a : 正方形面積 (m²)

4-3. 設計荷重

(1) 自動車荷重

計算に用いる自動車荷重としては、「道路橋示方書 I 共通編」⁷⁾ に示す T 荷重を用いる。

T 荷重は、車輛総重量 (T-25; 250kN、T-14; 140kN) のトラックにおける後輪荷重をモデル化したものである。前後輪の荷重比率を 1:4 としているので、T-25 の場合、後輪は軸重で 200kN、輪荷重で 100kN と規定されている。なお、T-14 の場合は、軸重で 112kN、輪荷重で 56kN となる。

T-25 と T-14 の使い分けに関しては、工事発注者により考え方が分かれる。大型車輛の通行があれば T-25 を使用し、大型車輛の入れない生活道路や歩道には T-14 を使用するといった考え方が一般的である。

(2) 列車荷重

列車荷重は、自動車荷重と異なり政府や行政機関が活荷重を一義的に定めるのではなく、各鉄道事業者が独自に定めることが多い。

鉄道は、車輪の荷重が枕木や道床 (バラスト等) によって軸方向に分散されるため、設計においては軸重のみを考慮し、1 輪のみの輪荷重を考慮することは、一般的にしない。

また鉄道は、運行計画に応じて列車の形態が限定されるので、軸重を規定の軸距により組み合わせた連行荷重が列車荷重として規定されている。

列車荷重の例としては、KS 荷重 (蒸気機関車荷重)、EA 荷重 (新型機関車荷重)、M 荷重 (旅客列車荷重)、H 荷重 (新幹線荷重) 等がある。以下に幾つかの荷重について説明する。

EA 荷重は、国鉄が JR グループに移行した後に規定された JR グループの標準機関車重量である。EA 荷重は電気機関車をベースとしており、E 荷重と A 荷重の 2 種類の荷重が規定されている。E 荷重は EF65 形の軸重群と牽引貨物列車を等分布荷重としてモデル化したもの、一方、A 荷重は 2 組の軸重と先従輪 (動力を受け取らない車輪) を組み合わせたもので、その軸重は E 荷重より若干大きい。

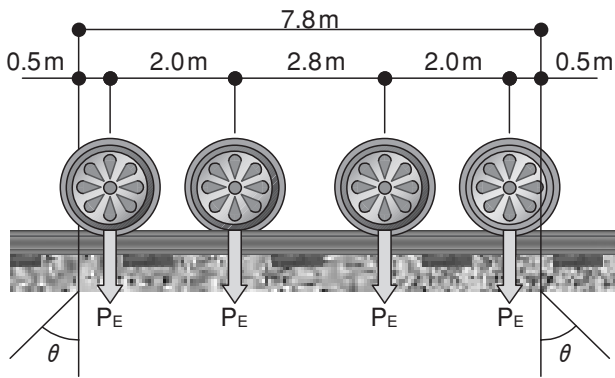


図 4-3 (1) 列車荷重の分布 E 荷重

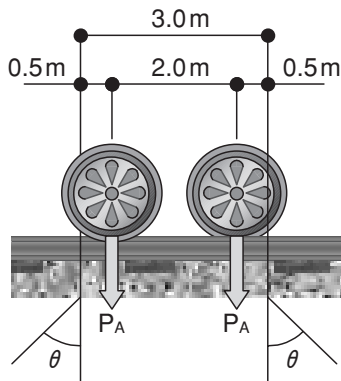


図 4-3 (2) 列車荷重の分布 A 荷重

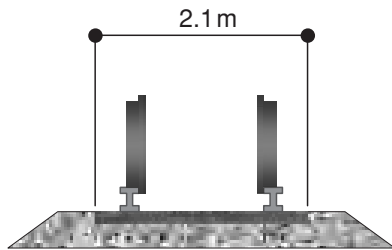


図 4-3 (3) 列車荷重の分布 まくら木長さ

路線の規格に合わせて EA-10 から EA-17 までの 8 段階が設定されている。

M 荷重は、EA 荷重と同様 JR 発足後の荷重である。M 荷重は電車やディーゼル車などの旅客列車をモデル化した列車荷重である。

電車のみが走ることの多い私鉄では、独自の列車荷重を設定しているが、M 荷重を適用している会社もある。

(3) 群集荷重

荷重計算を行わない上乗荷重として、群集荷重がある。

群集荷重は、道路橋示方書では 5.0kN/m^2 とされている。

なお、「土地改良計画設計基準 パイプライン」では、群集荷重を 3.0kN/m^2 と 5.0kN/m^2 とに分け

ている。前者は“大型自動車の入らない耕作道”に適用され、後者は“路面等で大型自動車が入る場合および公道の歩道”に適用される。

5. 管路に働く水圧¹⁾

土質力学的に、地下水は以下のように分類される。

- 1) 自由水（重力水）
- 2) 毛管水
- 3) 吸着水

このうち、管路に多くの影響を与えているのは 1) 自由水である。自由水は、土の間隙を満たし静的状態で存在している。

自由水は、管路に静水圧を与える。この圧力は、下図に示すような、管路横断面に曲げを生じる不均等圧、および定常な円周力を生じる均等外圧とに分けられる。単独管の設計においては、後者の均等外圧のみを外水圧として考慮する。

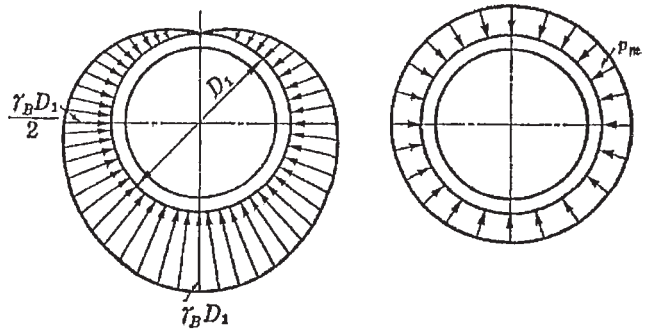


図 5-1 管路に働く地下水圧

この他に自由水は、土の単位体積重量を減少させたり、土のせん断抵抗を減少させ管路に働く圧力を増大させたりする作用を生じる。

単独管設計には、既設管管底高に作用する外水圧を用いる。

$$P_w = (H + t + D - H_w) \times \gamma_w$$

ここに、 P_w : 管路に働く外水圧 (kN/m^2)

H : 既設管土被り (m)

t : 既設管管厚 (m)

D : 既設管内径 (m)

H_w : 地下水位 (GL. - m)

γ_w : 地下水の単位体積重量 (kN/m^3)

6. 管路更生設計における外圧

最初に述べたように、管路の設計は、作用する外力の組み合わせによって、設計の考え方が変化してくる。更生管路の設計においても例外ではない。

管路更生は、構造分類で“単独管”と“複合管”に分けられ、さらに“単独管”は機能分類で“自立管”と“二層構造管”に分けられる。この分類に関しても作用する外力の組み合わせで、次のように表すことができる。

自立管：管路に働く土圧＋交通荷重

複合管：管路に働く土圧＋交通荷重

土圧・活荷重に対する二層構造管

：管路に働く土圧＋交通荷重、地下水圧

外水圧に対する二層構造管：地下水圧

これら外圧を作用させ、それぞれの設計式を用いて更生管厚を算定し、更生管路の設計を行う。

次回からは、これら“自立管”、“二層構造管”および“複合管”の考え方について説明をしていく。

【参考図書】

- 1) 「埋設管設計法」 原田干三 編 森北出版株式会社
 - 2) 「土地改良事業計画設計基準 設計パイプライン」 基準書・技術書 平成 10 年 3 月 農林水産省構造改善局
 - 3) 「地中埋設管の調査・設計から施工まで」 土質工学会
 - 4) 「下水道用硬質塩化ビニル管 技術資料」 平成 17 年 6 月 塩化ビニル管・継手協会
 - 5) 「ヒューム管設計施工要覧」 平成 12 年 5 月改定 全国ヒューム管協会
 - 6) 「管更生の手引き(案)」 平成 13 年 6 月 (社)日本下水道協会
 - 7) 「道路橋示方書 I 共通編」 2002 年 (社)日本道路協会
 - 8) 「道路土工 擁壁工指針」 1999 年 (社)日本道路協会
 - 9) 「下水道用硬質塩化ビニル管 JSWAS K-1」 平成 14 年 7 月 (社)日本下水道協会
-

連載講座小委員会

委員長	宮川 恒夫	EX ダンビー協会・技術委員
委員	安井 聡	FFT 工法協会・技術委員
委員	池ヶ谷貴之	オールライナー協会・技術委員
委員	上垣 潔	パルテム技術協会・技術部長
委員	真田 和彦	光硬化工法協会・技術委員長