

鉄道トンネル内路盤コンクリートの設計について

DESIGN OF BED CONCRETE SLAB IN RAILWAY TUNNELS

西 頭 常 彦*

By Tsunehiko Saito

1. 軌道構造の変遷と本研究に至る経過

(1) 従来の軌道構造および新幹線の軌道構造

バラスト軌道は、周知のように列車荷重による動的繰返し载荷によって、バラストが徐々に弛み、軌道狂いを生じ、それが一定の限度に達すると、軌道の補修作業を必要とする。その軌道補修作業は、特に長大トンネル内では、作業条件および気象環境が悪いために困難であるので、バラストを用いなくて、レールをその支承体に直結する軌道構造が考えられた。初期の直結軌道はブロック埋め込み式直結軌道と呼ばれるもので、締結装置をとりつけたレールを、インパルトまたは路盤コンクリート上に適当な間隔材によって上吊りしておき、その周辺に

コンクリートを流し込んでレールを直結する構造である。これは北陸トンネルなどで使用されているが、高速運転用軌道としていくつかの欠点があることがわかった。その後、東海道新幹線における保守の経験をもとり入れて、本格的な省力化軌道構造として、スラブ軌道が開発¹⁾された。スラブ軌道の概要は図-1に示すように、スパン 5m のコンクリートスラブを所定のレベルに合わせて仮り受けしておき、スラブ下の路盤コンクリートとの隙間に緩衝材(セメントアスファルトモルタルなど)をてん充した構造である。このスラブ軌道は、営業線で所要の性能を有することが確かめられたので、山陽新幹線新大阪一岡山間において延長 16 km が敷設された。さらに、第 1 回山陽新幹線建設委員会²⁾(昭和 45 年 7 月)において、岡山一博多間の軌道にも、スラブ軌道が大幅

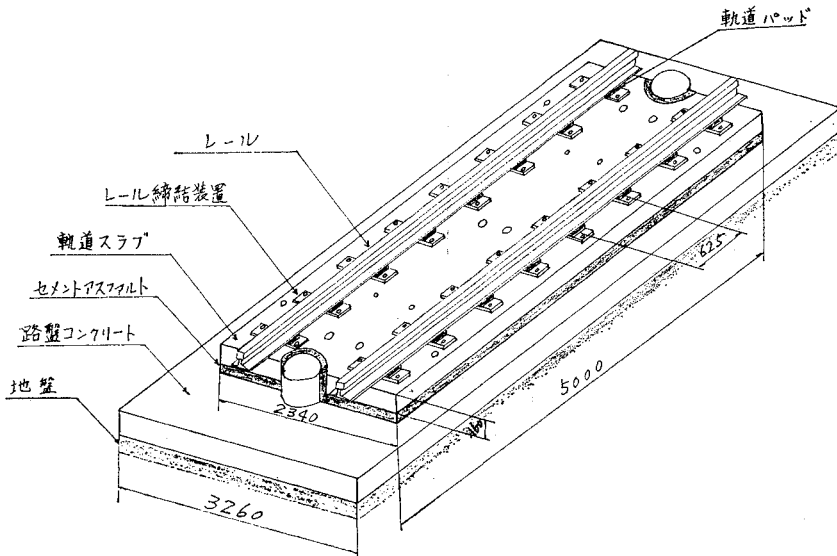


図-1 トンネル内スラブ軌道構造の例 (単位 mm)

* 正会員 国鉄鉄道技術研究所 軌道研究室 主任研究員

に採用されることが決定された。この区間におけるスラブ軌道の施工延長は約 600 km であり、その割合はトンネルの部分が 70%、高架橋の部分が 26%、切取および盛土の部分が 4% となっている。高架橋については、その標準設計がすでにできているが、トンネル内におけるスラブ軌道の基礎構造である路盤コンクリートについては、その応力解析および設計が現状では明らかにされるに至っていない。

(2) 本研究に至る経過

北陸本線の北陸トンネル(敦賀・今庄間)内のブロッ

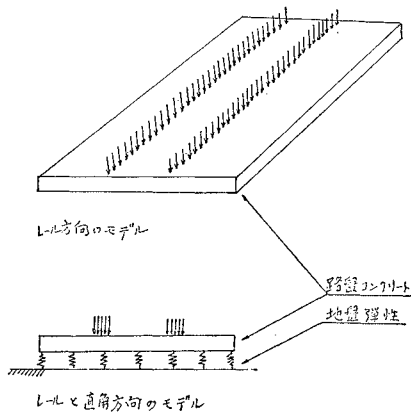


図-2 ブロック埋め込み式直結軌道用(北陸トンネル)路盤コンクリート解析力学モデル

ク埋め込み式直結軌道における路盤コンクリートの設計は、佐藤 裕博士の論文³⁾を参照して行なわれた。その解析のためのモデルは図-2に示すように一様な弾性支承上の路盤コンクリートに、部分的に分布荷重が直接作用しているものである。このようなモデルは次のような理由から、スラブ軌道用路盤コンクリートの解析にただちに適用できない。その一つは、ブロック埋め込み式直結軌道とスラブ軌道とは、その構造が異なっている。次に、トンネルの掘削に基因することがらである。すなわち、一般に、複線トンネルは図-3に示すように、検査、補修用の通路および排水路を上下線の中央に設備することになっている。したがって、通路に相当する部分は、施工基面(F.L.)以下の地山を凹形に掘削している。この場合、余掘りを伴うので、中央通路のコンクリート打ち後、余掘り部分の埋め戻しを行なわなければならないが、埋め戻しとその部分の転圧を十分に行なうことは、一般には困難であるので、この部分と地山との間で地盤強度の急激な変化を生じる。したがって、路盤コンクリートは強度の急変する基盤の上に敷設されることになる。以上はレールと直角方向の断面についてのことであるが、レール方向にも地盤反力係数 K 値のばらつきが考えられる。

したがって、スラブ軌道の構造および支持力の変化を考慮に入れた路盤コンクリートの応力解析が設計上必要となった。

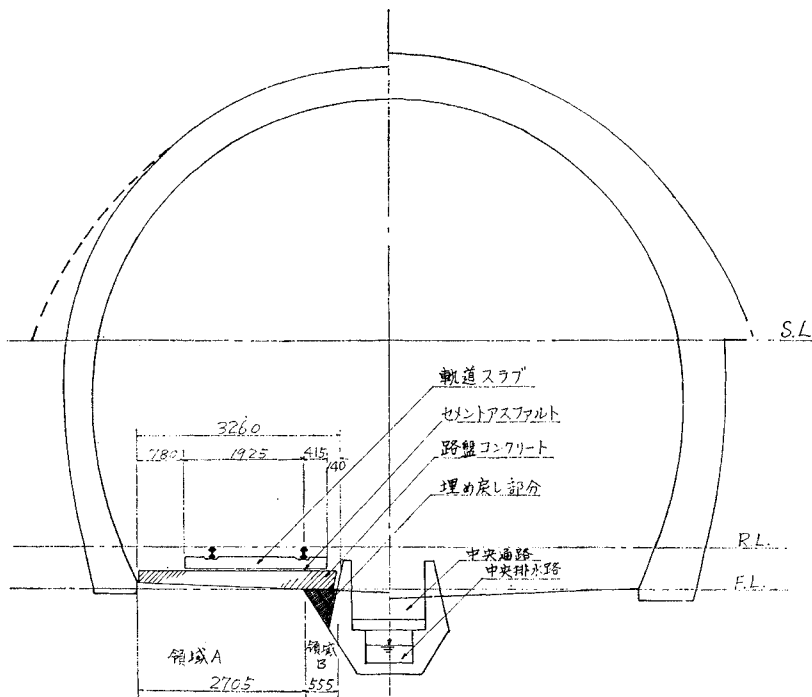


図-3 トンネル内スラブ軌道の断面 (国鉄新幹線の例で単位は mm)

著者は、国鉄におけるスラブ軌道開発研究グループの一員として参加し、路盤コンクリートの変形および応力解析を行ない、その設計方法を研究した。この設計方法は、山陽新幹線帆坂トンネル（相生・岡山間）および神戸トンネル（新神戸・西明石間）の路盤コンクリートの設計にとり入れられた。また、昭和 47 年 3 月営業開始に先立って応力測定が行なわれた。その測定の結果、路盤コンクリートの解析およびその設計方法がほぼ妥当なものであることが裏付けられたのでここに報告する。

2. スラブ軌道用路盤コンクリートの変形力学モデルの提案

変形力学モデルを設定するにあたって、路盤コンクリートを支持する地盤の弾性および路盤コンクリートの構造上の境界について、次のようないくつかの仮定が必要となる。

(1) 路盤コンクリートを支持する地盤の弾性

トンネルにおける路盤コンクリート構造は、道路におけるコンクリート舗装と類似しているため、路盤コンクリートのモデル化にあたって、コンクリート舗装の場合を参照することとする。

a) コンクリート舗装版の輪荷重応力度

コンクリート舗装版に、輪荷重を加えた場合の応力度を求める算定式は、路盤の支持に関する仮定によって、大きく 2 つにわけられる。

第 1 は Westergaard が提案した、いわゆるスプリング路盤の仮定と呼ばれるもので、路盤の反力は鉛直方向だけに作用し、それはたわみに比例し、その支持力係数はあらゆる点で同一であると仮定する。すなわち

$$\sigma = K \cdot y \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 σ ：路盤反力の鉛直方向の強さ (kg/cm²)、 K ：路盤の支持力係数 (kg/cm³)、 y ：路盤のたわみ (cm)、である。

第 2 は、いわゆる弾性路盤の仮定と呼ばれるもので、路盤を半無限弾性体と仮定したものであって、支持力に関する係数 C は、次のように与えられる。

$$C = E / (1 - \mu^2) \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 C ：弾性路盤の支持力に関する係数 (kg/cm²)、 E ：路盤材料のヤング率 (kg/cm²)、 μ ：路盤材料のポアソン比、である。

この弾性路盤の仮定は、スプリング路盤の仮定より合理的であろうが、次のような事情から、コンクリート舗装の設計では、前者を用いることが多い。すなわち、式 (1) の支持力係数 K は、事前に近似的に測定することができるのに対し、式 (2) の路盤材料のヤング率 E とポアソン比 μ とを知ることは容易ではない。また、従来の

諸算定式の数値計算でも、両者であり差のない結果が得られている。

b) 路盤コンクリートの応力解析における地盤弾性

鉄道トンネルの路盤コンクリートも、道路舗装における同様に、Westergaard によるスプリング路盤の仮定によって、応力解析を行なうことが実用的であると考えられる。スプリング路盤を物理的に表わすものは、いわゆる、地盤反力係数 K であり、軌道力学の面からは、 K_{75} が適当であると考えられている。実際には、平板載荷試験によって K_{30} を測定して K_{75} に換算することとした。地盤反力係数の設計上必要な下限値は、土路盤上スラブ軌道 RA の設計条件⁹⁾にしたがって、 $K_{75} = 5 \text{ kg/cm}^3$ とする。

(2) 路盤コンクリートの構造上の境界

a) 図-3 に示したように、レールと直角方向には路盤コンクリートとトンネル側壁および中央通路側壁とは縁が切られているので、路盤コンクリートの周辺の境界条件は自由である。

b) スラブ軌道の場合、標準タイプのスラブではレール方向に 5 m ごとに目地があるが、路盤コンクリートも 5 m ごとに目地があるものと仮定し、目地は重なっているものとする。普通、路盤コンクリートの目地は 20 m ごととされていて、電車 1 両、すなわちボギー台車 2 基が載荷されることになる。したがって、前後台車間のレールには負の曲げが生じるが、路盤コンクリートは軌道スラブの自重のために、負の曲げはかなり小さい値になるものと考えられる。ゆえに、解析のための路盤コンクリートは、1 台車の長さの影響範囲、すなわち軌道スラブの長さとしたものである。

(3) 路盤コンクリートの変形力学モデルの提案

荷重は、図-1 に示したレール、軌道パッド、軌道スラブ、セメントアスファルト、路盤コンクリートを経て地山に伝達されるので、モデルの要素として、レール、軌道スラブおよび路盤コンクリートの 3 つを必要とする。軌道スラブおよび路盤コンクリートの幅は、それぞれ 2 340、3 260 mm で、長さはいずれも 5 000 mm (図-1) としたので、平板構造として解析するのが妥当であろうが、その解析はかなり複雑になるので、従来の方法を踏襲して、はりとして解析を行なうこととする。つまり、レール、軌道スラブ、路盤コンクリート* の 3 本のはりが、不撓性基盤の上に弾性を介して、重なっている構造である。この弾性はモデルとして次のように記述できる。

* 路盤コンクリートは排水のため、若干変断面となっているが (図-3、図-12)、これを平均断面とみなす (これによる計算結果の差異は小さい)。

図-1において、軌道パッドの弾性はレール下に連続的に分布する線形のばねとみなすことができ、軌道スラブを支えるセメントアスファルトも、同様に線形のばねとみなすことができる。さらに、路盤コンクリートは上記の地盤反力係数 K 値で表わされる地盤に支持されていることになる。すなわち、レール方向のモデルは、図-4に示すように、三重弾性床上的のりとして表わすこと

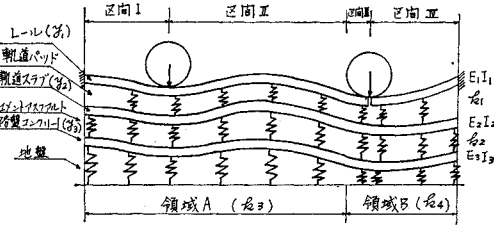


図-4 レール方向の変形力学モデル

ができる。レールと直角方向には荷重は軌道パッドによって分散されるので、この分布荷重を直接に軌道スラブに作用させることで、レールは省略することができるから、図-5に示すように、二重弾性床上的のりとして表わすことができる。

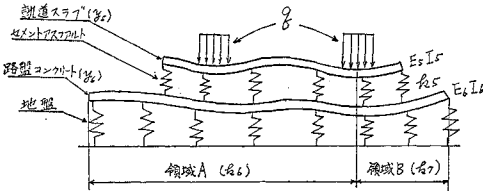


図-5 レールと直角方向の変形力学モデル

支持力の変化を表わすものとして、領域 A および B がある。図-3 および 図-5 における領域 B は、中央通路掘削のさいの余掘り部分を表わし、図-4 における領域 B は、支持力の低下を意味し、いずれも、領域 A より地盤反力係数 K 値が小さいことを意味している。しかし、領域 A および B それぞれにおいては、地盤反力係数のばらつきはないものとする。

3. 路盤コンクリートの解析

(1) レール方向の力のつり合い方程式および一般解

電車の1台車(車輪軸距は約 2.5m)が路盤コンクリートの中央に載荷されるものとし、このうち1つの車輪は軌道スラブの設計⁹⁾にしたがって、レール継目に位置するものとする(図-4)。

いま、 E_1, I_1, y_1, k_1 :レールのそれぞれヤング率(kg/cm²), 断面2次モーメント(cm⁴), たわみ(cm), 支承

体の単位ばね定数(kg/cm²)。

E_2, I_2, y_2, k_2^* :軌道スラブのそれぞれヤング率(kg/cm²), 断面2次モーメント(cm⁴), たわみ(cm), 支承体の単位ばね定数(kg/cm²)。

E_3, I_3, y_3, k_3, k_4 :路盤コンクリートのそれぞれヤング率(kg/cm²), 断面2次モーメント(cm⁴), たわみ(cm), 領域Aの支承体の単位ばね定数(kg/cm²), 領域Bの支承体の単位ばね定数(kg/cm²)。

とすると、領域Aにおける鉛直方向の力のつり合い方程式は、次のように書き表わされる。

$$\left. \begin{aligned} E_1 I_1 (d^4 y_1 / dx^4) &= -k_1 (y_1 - y_2) \\ E_2 I_2 (d^4 y_2 / dx^4) &= k_1 (y_1 - y_2) - k_2 (y_2 - y_3) \\ E_3 I_3 (d^4 y_3 / dx^4) &= k_2 (y_2 - y_3) - k_3 y_3 \end{aligned} \right\} \dots (3)$$

ここに、係数は次のように定義される。

$$\begin{aligned} k_1 / E_1 I_1 &= a, & k_1 / E_2 I_2 &= b, & k_2 / E_2 I_2 &= c, & k_2 / E_3 I_3 &= d, \\ k_3 / E_3 I_3 &= e \end{aligned}$$

ここで、

$$\begin{aligned} a + b + c + d + e &= p, & ac + ad + ae + be + ce &= q, \\ ace &= r \end{aligned}$$

を用いることにすれば、上の3つの微分方程式は、

$$\begin{aligned} (d^4 y_1 / dx^4) + p (d^2 y_1 / dx^2) + q (d^2 y_1 / dx^2) + r y_1 &= 0 \dots \dots \dots (4) \\ y_2 &= (1/a) (d^4 y_1 / dx^4) + y_1 \dots \dots \dots (5) \\ y_3 &= (1/c) \{ (d^4 y_2 / dx^4) - b y_1 + (b+c) y_2 \} \dots (6) \end{aligned}$$

となる。式(4)を演算子記号で表わせば、

$$D^4 + p D^2 + q D^2 + r = 0 \dots \dots \dots (7)$$

となり、ここで、 $z = D^2$ とおけば、式(7)は次のように表わされる。

$$z^2 + p z^2 + q z + r = 0 \dots \dots \dots (8)$$

ここで $z = D^2$ は実軌道の諸元に対して負の値をとるので**、上式は、次のように表わされる。

$$(D^4 + \alpha_1)(D^4 + \alpha_2)(D^4 + \alpha_3) = 0$$

ここで、

$$\lambda_1 = \sqrt[4]{\alpha_1/4}, \lambda_2 = \sqrt[4]{\alpha_2/4}, \lambda_3 = \sqrt[4]{\alpha_3/4}$$

なる記号を用い、 $A_1, A_2 \dots A_{12}$ を積分定数として、式(4)の一般解は、結局次のように表わされる。

$$\begin{aligned} y_{1.1} &= \{ A_1 e^{\lambda_1 x} \sin \lambda_1 x + A_2 e^{\lambda_1 x} \cos \lambda_1 x \\ &\quad + A_3 e^{-\lambda_1 x} \sin \lambda_1 x + A_4 e^{-\lambda_1 x} \cos \lambda_1 x \} \\ y_{1.2} &= \{ A_5 e^{\lambda_2 x} \sin \lambda_2 x + A_6 e^{\lambda_2 x} \cos \lambda_2 x \\ &\quad + A_7 e^{-\lambda_2 x} \sin \lambda_2 x + A_8 e^{-\lambda_2 x} \cos \lambda_2 x \} \\ y_{1.3} &= \{ A_9 e^{\lambda_3 x} \sin \lambda_3 x + A_{10} e^{\lambda_3 x} \cos \lambda_3 x \\ &\quad + A_{11} e^{-\lambda_3 x} \sin \lambda_3 x + A_{12} e^{-\lambda_3 x} \cos \lambda_3 x \} \\ y_1 &= y_{1.1} + y_{1.2} + y_{1.3} \dots \dots \dots (9) \end{aligned}$$

いま、

$$\begin{aligned} B &= 1 - 4 \lambda_1^4 / a, & D &= 1 - 4 \lambda_2^4 / a, \\ G &= 1 - 4 \lambda_3^4 / a \end{aligned}$$

* k_2 = セメントアスファルトの弾性/レール締結間隔

** 数値計算結果による。

とおけば、軌道スラブのたわみ y_2 は、

$$y_2 = By_{1.1} + Dy_{1.2} + Gy_{1.3} \dots \dots \dots (10)$$

となる ($y_{1.1}, y_{1.2}, y_{1.3}$ については式 (9) 参照)。また、

$$E = \{(b+c)B - b - 4\lambda_1^4 B\} / c$$

$$F = \{(b+c)D - b - 4\lambda_2^4 D\} / c$$

$$H = \{(b+c)G - b - 4\lambda_3^4 G\} / c$$

とおけば、路盤コンクリートのたわみ y_3 は

$$y_3 = Ey_{1.1} + Fy_{1.2} + Hy_{1.3} \dots \dots \dots (11)$$

となる ($y_{1.1}, y_{1.2}, y_{1.3}$ については式 (9) 参照)。

一方、領域Bにおいては、

$$e = k_3 / E_3 I_3 \rightarrow e' = k_4 / E_3 I_3$$

となるので、パラメーターが次のように変わってくる。

$$a + b + c + d + e' = p',$$

$$ac + ad + ae' + be' + ce' = q', \quad ace' = r'$$

したがって、式 (8) は次のように表わされる。

$$z^3 + p'z^2 + q'z + r' = 0 \dots \dots \dots (12)$$

よって、構造系の特性値が次のように変わる。

$$\lambda_1 \rightarrow \lambda_1', \quad \lambda_2 \rightarrow \lambda_2', \quad \lambda_3 \rightarrow \lambda_3'$$

したがって、次のようになる。

$$B \rightarrow B', \quad D \rightarrow D', \quad G \rightarrow G', \quad E \rightarrow E', \quad F \rightarrow F',$$

$$H \rightarrow H'$$

いま、

$$y_{1.1}' = \{A_1' e^{\lambda_1' x} \sin \lambda_1' x + A_2' e^{\lambda_1' x} \cos \lambda_1' x + A_3' e^{-\lambda_1' x} \sin \lambda_1' x + A_4' e^{-\lambda_1' x} \cos \lambda_1' x\}$$

$$y_{1.2}' = \{A_5' e^{\lambda_2' x} \sin \lambda_2' x + A_6' e^{\lambda_2' x} \cos \lambda_2' x + A_7' e^{-\lambda_2' x} \sin \lambda_2' x + A_8' e^{-\lambda_2' x} \cos \lambda_2' x\}$$

$$y_{1.3}' = \{A_9' e^{\lambda_3' x} \sin \lambda_3' x + A_{10}' e^{\lambda_3' x} \cos \lambda_3' x + A_{11}' e^{-\lambda_3' x} \sin \lambda_3' x + A_{12}' e^{-\lambda_3' x} \cos \lambda_3' x\}$$

とすると、たわみは次のようになる。

レールのたわみ y_1' :

$$y_1' = y_{1.1}' + y_{1.2}' + y_{1.3}' \dots \dots \dots (13)$$

軌道スラブのたわみ y_2' :

$$y_2' = B'y_{1.1}' + D'y_{1.2}' + G'y_{1.3}' \dots \dots \dots (14)$$

路盤コンクリートのたわみ y_3' :

$$y_3' = E'y_{1.1}' + F'y_{1.2}' + H'y_{1.3}' \dots \dots \dots (15)$$

以上の式によって、変形が求められると、応力度は弾性学の示すところによって算定できる。

(2) レールと直角方向の力のつり合い方程式および一般解

軌道の変形は、輪荷重直下が最大であって、荷重点を離れると漸次小さくなるが、一締結間隔においては変形が一様であると仮定する。つまり、レールと直角方向には、幅が路盤コンクリートの全幅、奥行は一締結間隔で切り出した弾性床上的のりとして考える。いま、

E_5, I_5, y_5, k_5 : 軌道スラブのそれぞれヤング率 (kg/cm²), 断面 2 次モーメント (cm⁴), たわみ (cm), 支

体の単位ばね定数 (kg/cm²), q : 軌道パッドにより分散された等分布荷重強度 (kg/cm)。

E_6, I_6, y_6, k_6, k_7 : 路盤コンクリートのそれぞれヤング率 (kg/cm²), 断面 2 次モーメント (cm⁴), たわみ (cm), 領域Aにおける支承体の単位ばね定数 (kg/cm²), 領域Bにおける支承体の単位ばね定数 (kg/cm²)。

とすると、領域Aにおける等分布荷重区間*の鉛直方向の力のつり合い方程式は、次のように表わされる。

$$\left. \begin{aligned} E_5 I_5 (d^4 y_5 / dx^4) &= q - k_5 (y_5 - y_6) \\ E_6 I_6 (d^4 y_6 / dx^4) &= k_5 (y_5 - y_6) - k_6 y_6 \end{aligned} \right\} \dots \dots (16)$$

ここで、

$$q / E_5 I_5 = f, \quad k_5 / E_5 I_5 = g, \quad k_5 / E_6 I_6 = h, \quad k_6 / E_6 I_6 = i$$

$$g + h + i = U, \quad gi = V, \quad fi + fh = W$$

とおくと、式 (16) は次のように表わされる。

$$d^4 y_5 / dx^4 + U (d^4 y_6 / dx^4) + V y_5 = W \dots \dots (17)$$

$$y_6 = (1/g) \{d^4 y_5 / dx^4 + g y_5 - f\} \dots \dots (18)$$

また、

$$\lambda_5, \lambda_6 = [\{(g+h+i) \mp \sqrt{(g+h+i)^2 - 4gi}\} / 8]^{1/4}$$

とし、 c_1, c_2, \dots, c_8 を積分定数として、微分方程式 (16) の余関数 y_c は、次のように表わされる。

$$y_c = \{c_1 e^{\lambda_5 x} \sin \lambda_5 x + c_2 e^{\lambda_5 x} \cos \lambda_5 x + c_3 e^{-\lambda_5 x} \sin \lambda_5 x + c_4 e^{-\lambda_5 x} \cos \lambda_5 x\} + \{c_5 e^{\lambda_6 x} \sin \lambda_6 x + c_6 e^{\lambda_6 x} \cos \lambda_6 x + c_7 e^{-\lambda_6 x} \sin \lambda_6 x + c_8 e^{-\lambda_6 x} \cos \lambda_6 x\} \equiv y_{c.1} + y_{c.2} \dots (19)$$

特解 y_e は、

$$y_e = V/W = (k_5 + k_6)q / k_5 \cdot k_6$$

したがって、一般解 y_5 は、次のようになる。

$$y_5 = y_c + y_e \dots \dots \dots (20)$$

次に、

$$F = (b - 4\lambda_5^4) / b, \quad G = (b - 4\lambda_6^4) / b$$

とすれば、路盤コンクリートのたわみ y_6 は、

$$y_6 = F y_{c.1} + G y_{c.2} + q / k_6 \dots \dots \dots (21)$$

となる ($y_{c.1}, y_{c.2}$ については式 (19) 参照)。

領域Bにおいては、

$$k_6 / E_6 I_6 = g \rightarrow k_7 / E_6 I_6 = g'$$

となることを考慮して、 y_5 および y_6 を定めるとよい。また、等分布荷重区間以外のたわみも、同様な手法で求められる。このようにしてたわみが求められると、応力度が計算できる。

(3) レール方向の応力度計算例

a) 計算条件

軌道構造として、レール重量は 60 kg/m, 軌道パッドの弾性は 60 t/cm, 軌道スラブ厚は 16 cm, てん充材の弾性は 900 t/cm^{**}, 路盤コンクリート厚は 20, 25, 30 cm

* 等分布荷重区間以外の力のつり合い方程式は、式 (16) の第 1 式右辺の $q=0$ とすることによって求められる。

** 実験値 (スラブ半幅で 1 締結間隔あたり)

とする。

地盤反力係数は、従来の経験を参考にして、計算の対象を次の3つに分ける。

case 1：領域A $K_{75}=20 \text{ kg/cm}^3$
 領域B $K_{75}=5\sim 19 \text{ kg/cm}^3$
 (2 kg/cm³ きざみ)

case 2：領域A $K_{75}=15 \text{ kg/cm}^3$
 領域B $K_{75}=5\sim 15 \text{ kg/cm}^3$
 (2 kg/cm³ きざみ)

case 3：領域A $K_{75}=10 \text{ kg/cm}^3$
 領域B $K_{75}=5\sim 10 \text{ kg/cm}^3$
 (1 kg/cm³ きざみ)

設計輪重 P は輪重変動を 30% とすると、 $P=8t \times 1.3=10.4t$ となる。その他の計算諸元は次のように定められる。

$E_1=2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$, $I_1=3090 \text{ cm}^4$, $k_1=960 \text{ kg/cm}^2$
 $E_2=3.5 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$, $I_2=39900 \text{ cm}^4$, $k_2=14400 \text{ kg/cm}^2$
 $E_3=2.4 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$, I_3 は次のようにする。
 $I_3=108300 \text{ cm}^4$ ($h=20 \text{ cm}$), 211600 cm^4 ($h=25 \text{ cm}$)
 365600 cm^4 ($h=30 \text{ cm}$)。

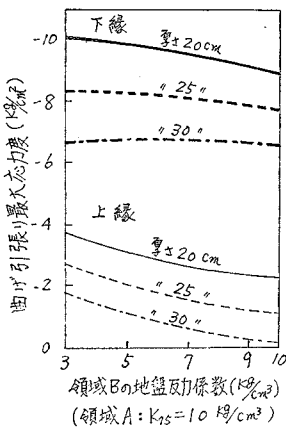


図-6 レール方向の曲げ応力度 (case 1)

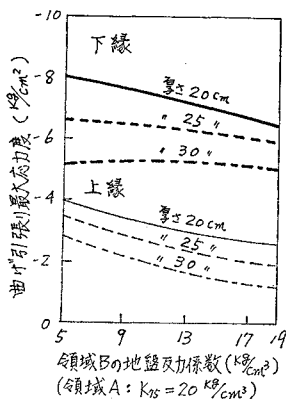


図-7 レール方向の曲げ応力度 (case 3)

k_3 (領域A), k_4 (領域B) については前述の case のものを用いる。

b) 境界条件

図-4 において、レールは軌道スラブの設計⁵⁾ になって、その両端において固定であるとし、区間IおよびIIの境界においてはたわみ、たわみ角、曲げモーメントおよびせん断力は連続である。また、区間IIIおよびIVの境界は継目が介在する。軌道スラブおよび路盤コンクリートは、それぞれその両端においては自由である。また、区間 I, II, III およびIVの境界において、たわみ、たわみ角、曲げモーメントおよびせん断力は当然連続である。

e) 計算結果

① 路盤コンクリートのたわみ、曲げモーメントおよび曲げ応力度：路盤コンクリートのたわみは、レール継目の影響もあって、領域B側が大きい。曲げモーメントは、領域Bの地盤反力係数が小さいほど、A, B いずれの領域においても大きくなっている。case 1 および case 3 に対する曲げ応力度の計算結果を 図-6 および 図-7 に示す。

② レールおよび軌道スラブのたわみ、曲げモーメン

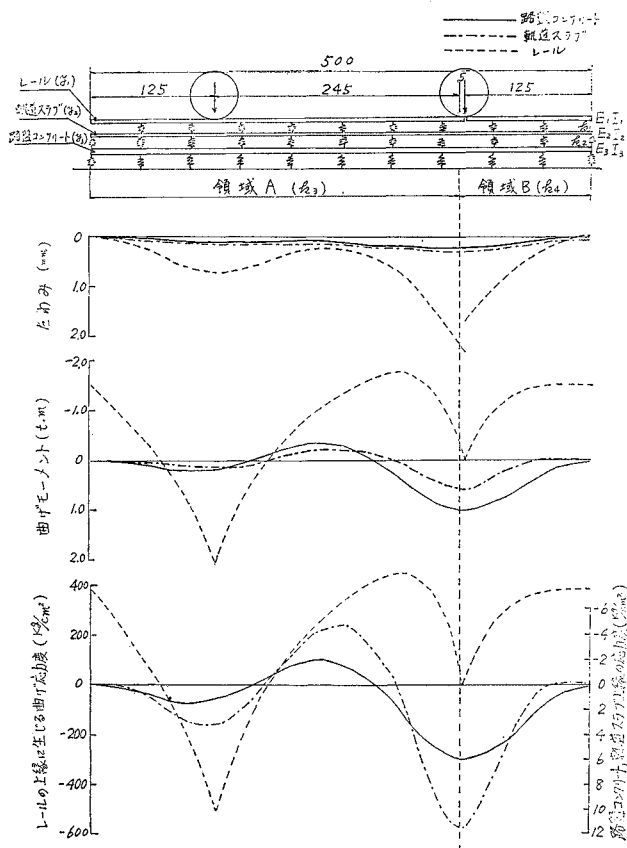


図-8 レール方向のたわみ、曲げモーメントおよび応力度 ($k_3=20 \text{ kg/cm}^3$, $k_4=19 \text{ kg/cm}^3$)

トおよび曲げ応力度：図-8には、一例として、領域Aの $K_{rs}=20 \text{ kg/cm}^2$ 、領域Bの $K_{rs}=19 \text{ kg/cm}^2$ の場合の、レール、軌道スラブ、路盤コンクリートのたわみ、曲げモーメントおよび曲げ応力度を示す。地盤反力係数が無限大で、路盤コンクリートがたわまないと仮定した従来の計算による軌道スラブの最大曲げモーメントは $0.32 \text{ t}\cdot\text{m}$ であり、路盤コンクリート厚が 25 cm で、地盤反力係数が上記の場合の軌道スラブの最大曲げモーメントは $0.43 \text{ t}\cdot\text{m}$ である。すなわち、路盤コンクリートがたわむと軌道スラブの曲げモーメントが大きくなることは注意を要する。レールのたわみは領域B側が大きく、同曲げ応力度は通常値に比較して大きくなっている。

(4) レールと直角方向の応力度計算例

a) 計算条件

軌道構造は 3.(3)a) と同様であるが、輪重は軌道パッドによって分散され、軌道スラブに伝わる。地盤反力係数は 3.(3)a) に記述した case 1, 2 および 3 の数値を用いる。路盤コンクリート厚は $20, 25, 30 \text{ cm}$ とする。

荷重は、レール方向の変形解析において得られた路盤コンクリートの最大たわみと、等価なたわみ*を生じさせるものをとることとすると、その大きさ q (図-5 参照) は次のようになる。

$$q = P_e / e = P_e / (e_p + e_s) \dots\dots\dots (22)$$

ここに、 P_e : レール方向の最大たわみを直角方向の断面について生じさせる集中荷重(kg), e : 荷重分布幅(cm), e_p : 軌道パッドの幅(cm), e_s : 軌道スラブの有効高(cm), である。

その他の計算諸元は、軌道スラブおよび路盤コンクリートをレール方向に一締結間隔すなわち 62.5 cm で切り出したはりとして取り扱うので、次のようになる。

$I_s = 21\,330 \text{ cm}^4$,
 $k_s = 7\,692 \text{ kg/cm}^2$
 ただし、 $E_s = 35 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$, $E_0 = 24 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ とし、
 k_0 および k_1 は、

3.(3)a) における領域AおよびBに相

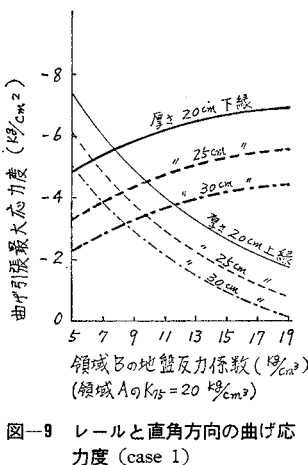


図-9 レールと直角方向の曲げ応力度 (case 1)

* レール方向の最大変位と領域A側の等分布荷重区間の平均鉛直変位とを合致させた。

当する値を用いる。境界条件は 3.(3)b) を参照して定めればよい。

b) 計算結果

① 路盤コンクリートのたわみ、曲げモーメントおよび曲げ応力度：路盤コンクリートのたわみは、埋め戻し部分である領域B側が当然大きい。曲げモーメントは、地盤反力係

数が小さいほど、領域B側は小さく、領域A側は大きい。case 1 および case 3 に対する曲げ応力度の計算結果を図-9 および 図-10 に示す。

② 軌道スラブのたわみ、曲げモーメントおよび曲げ応力度：図-11には、一例として、領域Aの $K_{rs}=20 \text{ kg/cm}^2$ 、領域Bの $K_{rs}=5 \text{ kg/cm}^2$ とした場合の、軌道

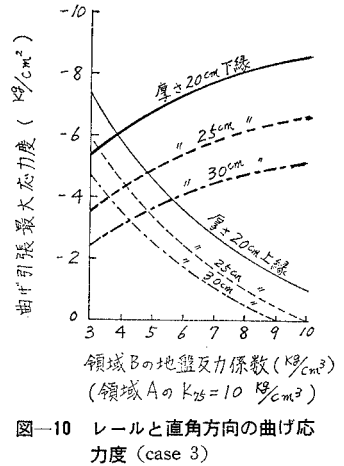


図-10 レールと直角方向の曲げ応力度 (case 3)

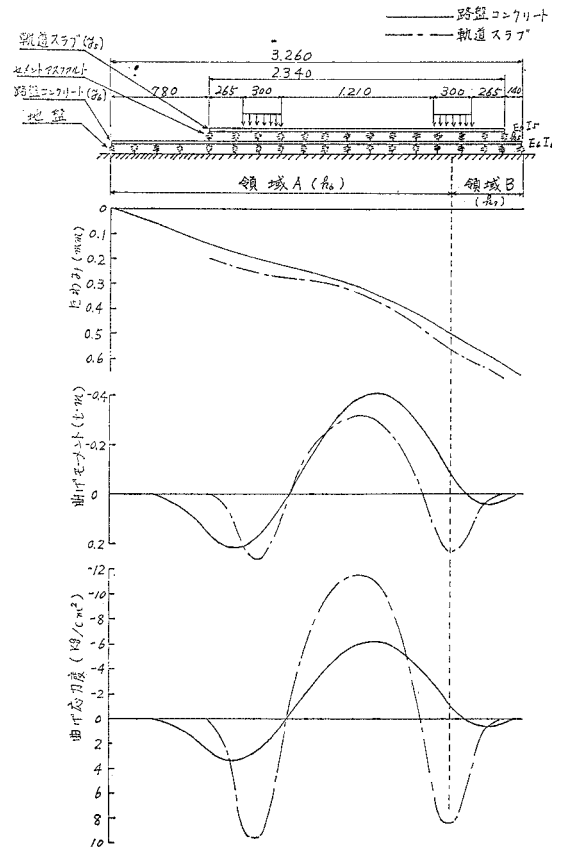


図-11 レールと直角方向のたわみ、曲げモーメントおよび曲げ応力度 ($k_0=20 \text{ kg/cm}^2$, $k_1=5 \text{ kg/cm}^2$)

スラブおよび路盤コンクリートのたわみ、曲げモーメントおよび曲げ応力度を示す。この図より、たわみは領域B側が当然大きく、軌道スラブの曲げモーメントは中央部の埋め戻し側が大きい。

4. 山陽新幹線トンネルにおける路盤コンクリートの設計および応力度測定結果

(1) 神戸および帆坂トンネルにおける設計

山陽新幹線神戸および帆坂トンネルにおいては、地盤反力係数を測定した結果、領域AのK値は、レール方向およびレールと直角方向いずれも、 $K_{75}=20 \text{ kg/cm}^3$ 、領域Bのレール方向のK値は $K_{75}=20 \text{ kg/cm}^3$ 、レールと直角方向のK値は $K_{75}=5 \text{ kg/cm}^3$ とされた。これらの地盤反力係数を用い、3.(3) および 3.(4) で示した条件にしたがって計算した。

計算結果は国鉄本社におけるスラブ軌道研究会で検討され、路盤コンクリート厚さは平均約25cmとされた。この場合コンクリートに生じる曲げ引張最大応力度は、レール方向の下縁と直角方向の上縁でそれぞれ約 -6.0 kg/cm^2 、 -6.2 kg/cm^2 であることが 図-8 および 11 からわかる。これらの曲げ応力度の場合には、国鉄建造物設計標準⁶⁾ によって、主鉄筋を必要とする。施工上の試みとして、現場で鉄筋の組み立ては行わず、溶接金網を使用することとした。

鉄筋の疲労強度は、通常の繰返し載荷⁷⁾ に対するものを考えて、単鉄筋長方形断面として計算の結果 $\phi 6$ 、

150×150 mm の金網でよいことになった。これらをもとにして、 図-12 に示す設計案ができて、採用されるに至った。

(2) 神戸トンネル内路盤コンクリートの応力度の実測結果⁸⁾

新幹線電車を 30, 70, 110 km/h で走行させて、軌道スラブおよび路盤コンクリートスラブのレール方向および同直角方向に生じるひずみが測定された。例として、レールと直角方向の断面のゲージの配置を 図-13 上方に示す。同図下方に見るように、路盤コンクリートに生じる曲げ引張最大応力度は、ゲージ③において生じ、約 -3 kg/cm^2 であり、これに対応する計算値は -4 kg/cm^2 である。また、軌道スラブの鉄筋に生じる最大曲げ応力度(ゲージ番号①)は、約 120 kg/cm^2 であり、これに相当する概算値は約 140 kg/cm^2 である。

(3) 路盤コンクリートの標準的設計

設計および施工の省力化のため、若干の仮定を設け、その設計の標準化を考えた。

a) 路盤コンクリートの厚さ

厚さはスラブ軌道研究会での検討結果をもととして、平均 25 cm とする。

b) 鉄筋の疲労強度

軌道スラブは 50 年の耐用命数が期待されているので、路盤コンクリートも同等以上の寿命を必要とする。スラブの設計では、50 年間の荷重の繰返し数を、レール方向

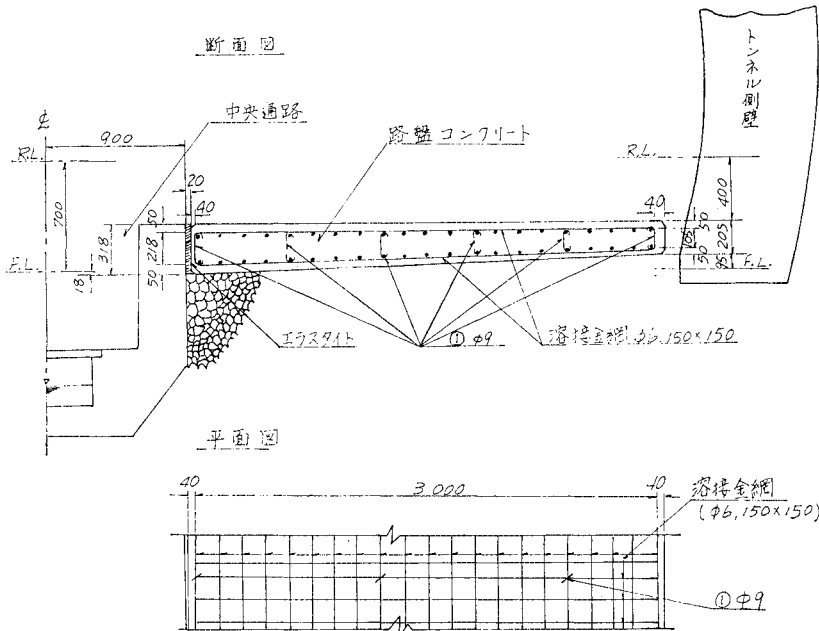


図-12 神戸および帆坂トンネルにおける路盤コンクリート設計例 (単位 mm)

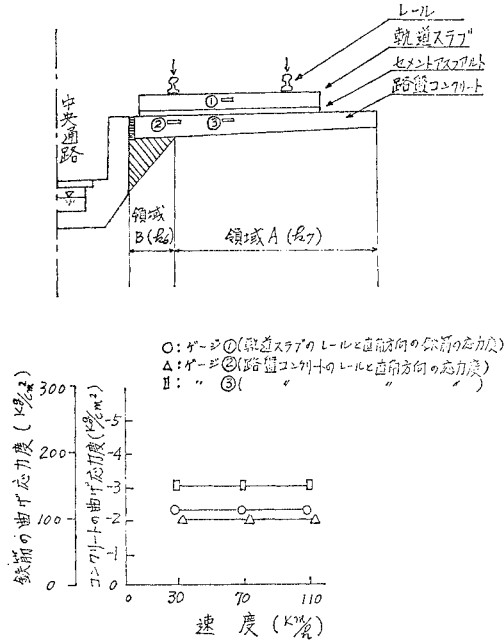


図-13 神戸トンネルにおける応力度測定結果

では 3500 万回、レールと直角方向では 7000 万回として疲労強度をとった。

一方、トンネル内で長い延長にわたって軌道を敷設する場合、現場での鉄筋の組み立ては、施工速度に与える影響が大きい。したがって、適当な径の鉄筋を工場で溶接し、金網の形として現場に持ち込むのが得策である。ただし、現在のところ、溶接部の疲労強度は明らかにされていない。ここでは、その疲労強度は、上記の繰返しをうけた状態での 80% 程度とする。したがって、設計値としての鉄筋の疲労強度は、レール方向で 460 kg/cm²、

レールと直角方向で 660 kg/cm² となる。

e) 地盤反力係数と溶接金網の径および間隔

路盤コンクリートのかぶりを 3 cm、その厚さおよび疲労強度として上記の値を使用し、地盤反力係数は 3. (3) a) で記述した case の K 値を使用して、計算を行なうと表-1 が求められる。

地盤反力係数のばらつきを十分に調査し、これらのばらつきをカバーするように表-1 を適用すれば、設計の標準化は可能になると思われる。

5. 考 察

軌道の支持弾性のモデル化にあたっては、軌道パッド、セメントアスファルトおよび地盤を線形のばねであると仮定し、構造のモデル化は、実軌道の構成要素をそのまま取り入れて、レール方向には三重弾性床上的のはり、レールと直角方向には二重弾性床上的のはりであるとした。このようなモデルによる計算結果は、著者がすでに行なった解析、すなわち路盤コンクリートに直接荷重が作用するものとして設定した簡単なモデル（一重弾性床上的のはり）による結果⁵⁾と比較すると、その精度がよくなっていて、二重および三重弾性床上的のはりとしたことの意義は十分に認められる。

これらの計算をもととして、神戸トンネルにおける路盤コンクリートを設計した。レールと直角方向の断面について路盤コンクリートの曲げ応力の実測値は -3 kg/cm² であり、これに対応する計算値は -4 kg/cm² である。また、軌道スラブの鉄筋の曲げ応力の実測値は 120 kg/cm² であり、これに対応する概算値は 140 kg/cm² である。実測値が計算値よりも小さいのは、実際にはレ

表-1 地盤反力係数と溶接鉄筋網の径および間隔 (寸法単位は mm)

| 領域Aにおける 地盤反力係数 (kg/cm ²) | 方 向 別 | 上 下 別 | 領域 B における地盤反力係数 (kg/cm ²) | | | | | | | | |
|--|-------------|-------------|---------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--|
| | | | 5 | 7 | 9 | 11 | 13 | 15 | 17 | 19 | |
| 10 | レール 方 向 | 上 側 | * | * | * | | | | | | |
| | | 下 側 | D13, 150 | D13, 150 | D13, 150 | | | | | | |
| | レール と直角 | 上 側 | D10, 200 | * | * | | | | | | |
| | | 下 側 | D10, 200 | D10, 170 | D10, 150 | | | | | | |
| 15 | レール 方 向 | 上 側 | D10, 170 | * | * | | | | | | |
| | | 下 側 | D13, 160 | D13, 160 | D13, 160 | D13, 160 | D13, 170 | D13, 170 | | | |
| | レール と直角 | 上 側 | D10, 190 | D10, 300 | * | * | * | * | | | |
| | | 下 側 | D10, 280 | D10, 230 | D10, 190 | D10, 170 | D10, 160 | D10, 150 | | | |
| 20 | レール 方 向 | 上 側 | D10, 170 | D10, 170 | * | * | * | * | * | * | |
| | | 下 側 | D13, 170 | D13, 170 | D13, 170 | D13, 180 | D13, 180 | D13, 190 | D13, 200 | D13, 200 | |
| | レール と直角 | 上 側 | D10, 150 | D10, 210 | D10, 280 | * | * | * | * | * | |
| | | 下 側 | D10, 330 | D10, 280 | D10, 240 | D10, 220 | D10, 200 | D10, 190 | D10, 180 | D10, 170 | |

(注)*印はコンクリートの緑維応力が 3 kg/cm² 以下、従来の経験によれば φ6, 150×150 のメッシュを施工

ールに継目がないことを考慮すると当然である。したがって、新規提案した力学モデルおよび手法がほぼ妥当なものであると考えられる。

6. む す び

本文においては、地盤を Westergaard の提案したスプリング路盤とし、軌道スラブおよび路盤コンクリートをそれぞれはりとして、力学モデルを新規に提案し、これに基づいて解析したが、その計算結果は、実測値と比較的よく対応している。また、これらの計算結果に基づいて、路盤コンクリートの設計の標準化を試みたが、これらはその設計および施工の省力化に結びつくものと思われる。

謝 辞

本研究を進めるにあたって、国鉄鉄道技術研究所軌道研究室前室長 佐藤 裕博士より、軌道力学の観点から御指導をいただき、国鉄大阪工務局長 小林正宏氏(前大阪新幹線工務局長)より、設計について有益なる助言をいただいた。また、本文作製にあたっては、名大教授 成岡昌夫博士および京大教授 後藤尚男博士より広い視

野からの御批判、御指導をいただいた。ここに、深く感謝の念を表わしたい。

なお、資料の整理にあたり、御協力をいただいた国鉄鉄道技術研究所軌道研究室 湯浅博吉氏、同切敷啓介氏に対しても、ここに謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 無道床軌道構造研究グループ：コンクリートスラブ式アスファルトてん充形軌道の開発，鉄道技術研究報告 No. 632 (1968.4)
- 2) 高原清介・太田昌男：岡山一博多間工事計画，鉄道線路，20-3，pp. 48～53 (1972.3)
- 3) 佐藤 裕：連続弾性支持二重ばりの垂直荷重による変形，土木学会論文集，49，pp. 42～49 (昭和 32.9)
- 4) 伊藤友太郎：山陽新幹線のスラブ軌道区間における土木構造物，鉄道線路，19-8，pp. 59～63 (1971.8)
- 5) 国鉄スラブ軌道研究会：スラブ軌道の設計施工，日本鉄道施設協会，昭和 46 年 4 月。
- 6) 国鉄施設局・建設局・山陽新幹線建設部編：建造物設計標準 (RC)，昭和 45 年 3 月。
- 7) 近藤時夫：RC 構造物の鉄筋許容応力度のとり方，国鉄構造物設計資料，24，pp. 17～18 (昭和 45.12)
- 8) パラストレス軌道構造研究グループ：新幹線スラブ軌道の動的性状，鉄道技術研究所速報，No. 72-131，pp. 7～18 (昭和 47.7)

(1971. 9. 3・受付)
(1972.10.24・再受付)