

コンクリート舗装軌道の垂直荷重による変形

正員 佐藤 裕*

THE DEFORMATION OF THE RAILWAY TRACK ON CONCRETE PAVEMENT UNDER VERTICAL LOAD

By Yutaka Satoh, C.E.Member

Synopsis: Construction of railway track on a concrete bed has been attempted in numerous instances in Japan and abroad. Here is reported about the fundamental test on the track for the experiment on concrete pavement without ballast, which is proposed as can be generally adopted for section of heavy traffic under high speed operation with no need for maintenance work for a long time.

要旨 コンクリート床上の軌道構造は古くから内外に実例が多いが、ここでは輸送量が多く列車速度の高い線区の一般軌道にも用いることができ、かつ長期間にわたって保修を必要としない軌道の一案として提案された無道床コンクリート舗装軌道構造について、基礎的な実験結果を報告する。

1. 序 言

わが国の重要幹線における輸送量の増大と列車速度の向上は現在の軌道構造をもつては対応しがたい状態に立ち至りつつある。また目下計画されている新幹線では列車の最高速度を 250 km/h まで考慮することになつてゐる。このような事態に応ずるために現在の軌道構造をそのままの形で強化するのみでなく、別種の構造によつて飛躍的に強化することも一応考えておかなくてはならない。その一つの案としてここに報告するコンクリート舗装軌道が提案された。

コンクリート舗装軌道は道床を用いないで路盤に直接コンクリート舗装をし、その上にレールをゴムとばねなどの組合せによる弾性締結装置を用いて敷設するものである。この基本設計は文献¹⁾ の方法によつて行われ²⁾、さらに細部設計を行つた後に国鉄技研の津田沼分所構内に延長 10 m の軌道が試験敷設された³⁾。この試験軌道について各種の実験を行つて同構造を実用に供するための条件を求めるにした。

この試験用コンクリート舗装軌道では、レールは PS 50 kg を用いコンクリート版は無筋であり断面は図-1 の通りである。これは軸重 20 t によつてコンクリート版に生ずる曲げ引張応力が安全率 3 をもつように設計された。路盤は 1/25 の横断勾配をつけてその上には透水性と締固性のよい粒度配合の砂質土基盤を平均厚さ 15 cm に敷き、JIS 支持力比試験および平板載荷試験によつて所定の強度を有するまで十分締固めた。舗装軌道に接続して普通構造の軌道を設け、レールは両区間を通じて新品 25 m レール、まくら木は並とし、道床厚は碎石 25 cm とした。レール締結間隔は両区間を通じて 60 cm とし、また締結装置は比較軌道では大ぐき止めとし舗装軌道ではコンクリート道床用 C 型弾性締結装置を用いた。試験軌道の路盤面はその前後の在来軌道に取りつけるために関東ロームの地表を舗装軌道区間では平均 64 cm また比較軌道区間では平均 54 cm 掘下げたがまだ腐食をうけた表層土の範囲にあつた。

試験軌道の外観は写真-1 の通りで、舗装軌道はレール支持部を残して全体を上でおおつて完成する。試験軌道で行われた各種実験のうちここでは載荷による変形の測定とその理論的検討について報告

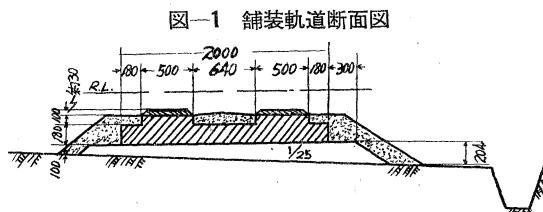


図-1 舗装軌道断面図

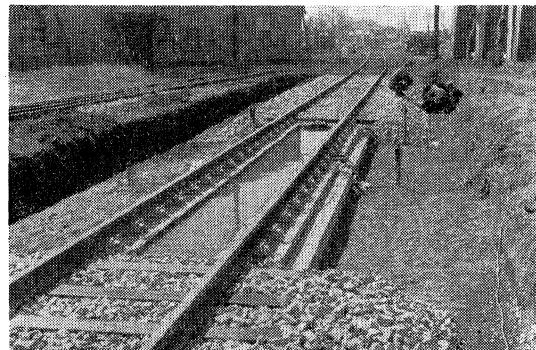


写真-1 コンクリート舗装軌道

* 国鉄鉄道技術研究所、主任研究員

する。

2. 載荷実験

舗装軌道中央部、端部および普通軌道中央部のそれぞれ1カ所において、片レール当り10tまでの荷重を両レールに同時に加えたとき軌道各部に生ずる沈下、応力、圧力などを測定した。荷重を加えるために軌道上に約15tの死重を積んだチキ800型貨車をのせ、車体わく中央部両側を支持点としてそれにシャッキを当てループ式圧力計を介して両レー

図-2 舗装軌道中央部載荷実験におけるレールおよびコンクリート版の沈下

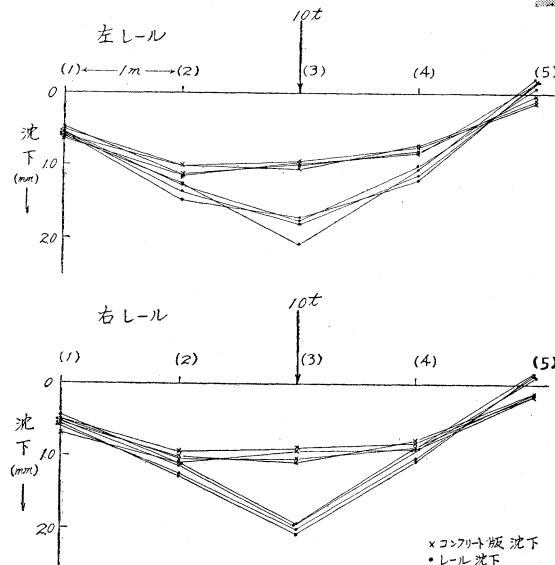


図-3 舗装軌道端部載荷実験におけるレールおよびコンクリート版の沈下

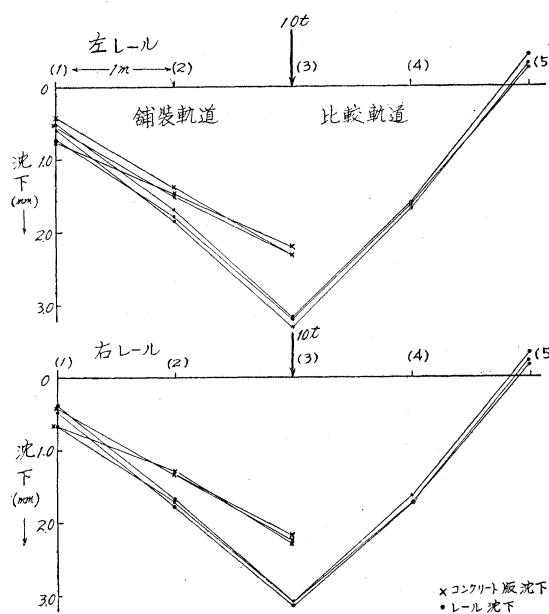
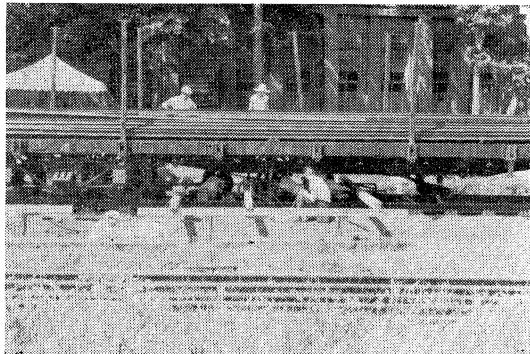


写真-2 載荷実験状況



ルを圧した。実験の状況は写真-2の通りで荷重の大きさは片レール当りで0から10tまで2tごとに3回往復してかけた。

載荷によるレールおよびコンクリート版の沈下を測定するため、レール方向に載荷点を中心として1m間隔に左右レールおよびコンクリート版にそれぞれ5点ずつの測点をとり、さらにコンクリート版の横断方向の沈下を測るために載荷点の外に中央と両端に3測点をとつた。これらレール上に10点、コンクリート版上に13点の位置にダイヤルゲージを取りつけた。

荷重の大きさと沈下量との関係は多少の残留はあるが大体比例する。そこでレール方向の沈下分布を見るために片レール当り10tのときの値を図示したのが、舗装軌道中央部については図-2であり、端部については図-3である。図から左右レールについても同様であることがわかる。また図-2につ

図-4 チキの載荷支点の隣接車軸からの距離

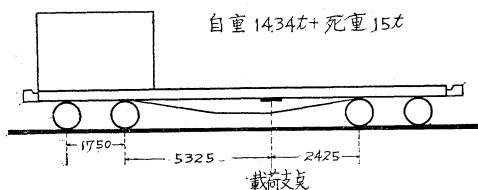
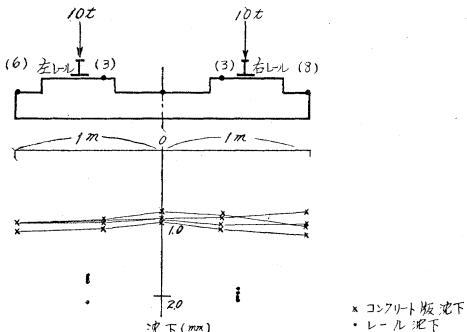


図-5 舗装軌道中央部載荷実験におけるコンクリート版の直角方向の沈下



いて見ると載荷点の前後で対称になつてないが、これは載荷用貨車の軸距および支点位置が図-4に示すようになつてゐるため、近い方の台車の影響が現われたものであつて、この点は後に検討する。さらに横断方向の沈下は中央部では図-5、端部については図-6に示すようになり、図からコンクリート版はほとんど曲らずに一様に沈下していることがわかる。

3. 理論計算

舗装軌道の設計は路盤反力係数を $K=5 \text{ kg/cm}^3$ とし、コンクリートのヤング率を $E=2.0 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ として行つた。これに対して K 値の実測によれば切取つた素地の K_{75} は $2.2 \sim 2.6 \text{ kg/cm}^3$ であったので K_{75} が $7 \sim 8 \text{ kg/cm}^3$ になるような基盤を作つた。またコンクリートのヤング率の実測値は $3.3 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ であった。これらの値を用いて理論計算をすると、レールおよびコンクリート版の沈下実測値は理論値よりはなはだ大きくなる。そこでまず路盤 K 値を変えて計算し載荷点直下の沈下量が実測値と等しくなる K 値を求め、ついでその K 値を用いて各部の変形を計算し理論値と実測値とをつき合わせた。

計算条件はつぎの通りである。

軌道 レール : 50 kg PS

$$\text{曲げ剛さ } E_1 I_1 = 2.1 \times 10^6 (\text{kg/cm}^2) \times 1744 (\text{cm}^4) = 366 \times 10^7 \text{ kg cm}^2$$

レール締結 : コンクリート道床直結用C型

$$\text{締結間隔 } 60 \text{ cm, ばね常数 } 45 \text{ t/cm}$$

片レール単位長さ支持ばね常数

$$k_1 = 45000 (\text{kg/cm}) / 60 \text{ cm} = 750 \text{ kg/cm}^2$$

コンクリート版 : 断面は図-1の通り

片レール当り断面2次モーメント

$$I_2 = 129 \times 10^3 \text{ cm}^4$$

$$\text{コンクリートのヤング率 } E_2 = 3.3 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{曲げ剛さ } E_2 I_2 = 426 \times 10^8 \text{ kg cm}^2$$

$$\text{断面係数 上面 } 8112 \text{ cm}^3 \quad \text{下面 } 10753 \text{ cm}^3$$

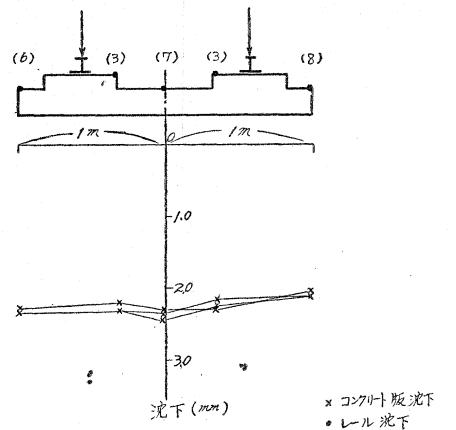
路盤反力係数 : K 値は K_{30} の実測からの換算 K_{75} は $7 \sim 8 \text{ kg/cm}^3$

荷重 大きさ : 片レール当り 10 t まで

位置 : 舗装軌道中央部および端部

計算は文献2)の式および表によるが、同印刷には次の正誤がある。

図-6 舗装軌道端部載荷実験におけるコンクリート版の直角方向の沈下



頁	行	誤	正
5 左	(24) 式	$\sqrt{(a-c)^2 + ab}$	$\sqrt{(a-c)^2 + 4ab}$
5 右	2.2 表	$w = \frac{1}{4(\epsilon-1)} \cdot \frac{W}{4E_1 I_1}$	$\cdot \frac{W}{2E_1 I_1}$
6	2.3 表 中のらんの下 から1,2行目	$4\epsilon\beta, 4\epsilon\beta$	$4\epsilon\beta^2/\alpha, 4\epsilon\beta^2/\alpha$
7	2.4 表 右のらんの下 から4行目	$-\frac{2(\epsilon-1)(\alpha-\epsilon\beta^2)}{\alpha\beta}$	$-\frac{2(\epsilon-1)(\alpha^2-\epsilon\beta^2)}{\alpha\beta}$

3.1 路盤 K 値を変えたときのレールおよびコンクリート版の最大沈下量の計算

文献2)の第(2.9)式と第2.2表および第2.4表によつて計算すると、レールおよびコンクリート版の最大沈下量は図-7および図-8のようになる。この結果と前節の実験値とを比べると実験値は前記のように貨車の台車の影響が入つてゐるので正確ではないが、路盤反力係数として転圧前の素地で測定された値の 2.5 kg/cm^3 をそのままとすると計算値と実験値が合うことがわかる。

舗装軌道のコンクリート版は広い範囲に沈下するので、路盤の圧縮は深くまでおよび、そのため路盤反力は転

図-7 補装軌道中央部の荷重点下の沈下量の計算値

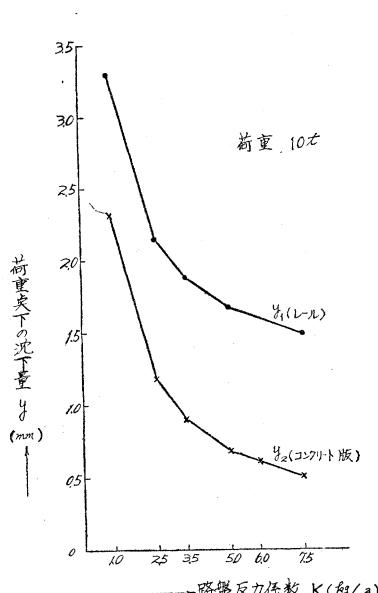
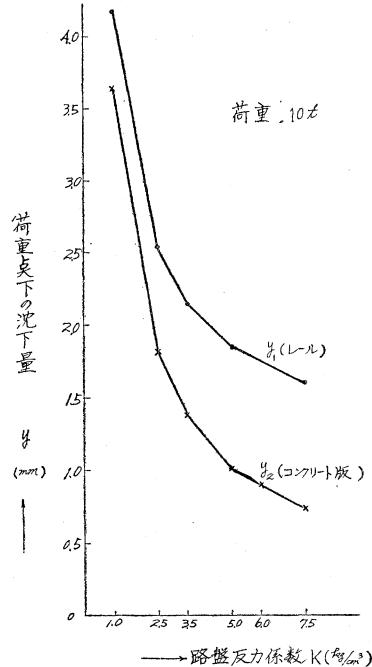


図-8 補装軌道端部の荷重点下の沈下量の計算値



圧された基盤の圧縮によつて生ずる部分は非常に小さいものと考えると、上記のこととはむしろ合理的であり、また最大沈下量のみでなく、沈下全般がよく合うようになることを以下に示す。

3.2 路盤 K 値を 2.5 kg/cm^2 としたときの軌道変形の計算

計算の基本的な係数はつぎのとおりである。

$$W=10 \text{ t}, \alpha=0.606 \times 10^{-2} \text{ cm}^{-1}$$

$$\beta=1.537 \times 10^{-2} \text{ cm}^{-1}, \eta=-0.0888$$

$$\varepsilon=-0.0912$$

軌道の各変形はつぎのようになる。

補装軌道中央部について

レール沈下

$$y_1=1.29 \varphi_1(\alpha x)+0.864 \varphi_1(\beta x)$$

コンクリート版沈下

$$y_2=1.26 \varphi_1(\alpha x)-0.0767 \varphi_1(\beta x)$$

コンクリート版曲げモーメント

$$M_2=391 \times 10^3 \varphi_3(\alpha x)-155 \times 10^3 \varphi_3(\beta x)$$

これを図示すれば図-9となる。

補装軌道端部について

レール沈下

$$y_1=0.653 \varphi_2(\alpha x)+1.927 \varphi_4(\alpha x) + 1.113 \varphi_2(\beta x)+0.617 \varphi_4(\beta x) \text{ mm}$$

コンクリート版沈下

$$y_2=0.036 \varphi_2(\alpha x)+1.869 \varphi_4(\alpha x) - 0.099 \varphi_2(\beta x)-0.055 \varphi_4(\beta x) \text{ mm}$$

コンクリート版曲げモーメント

$$M_2=-585 \times 10^3 \varphi_2(\alpha x)+199 \times 10^3 \varphi_4(\beta x) + 109 \times 10^3 \varphi_2(\beta x)-199 \times 10^3 \varphi_4(\beta x) \text{ kgcm}$$

これを図示すれば図-10となる。

図-9 補装軌道中央部についての変形

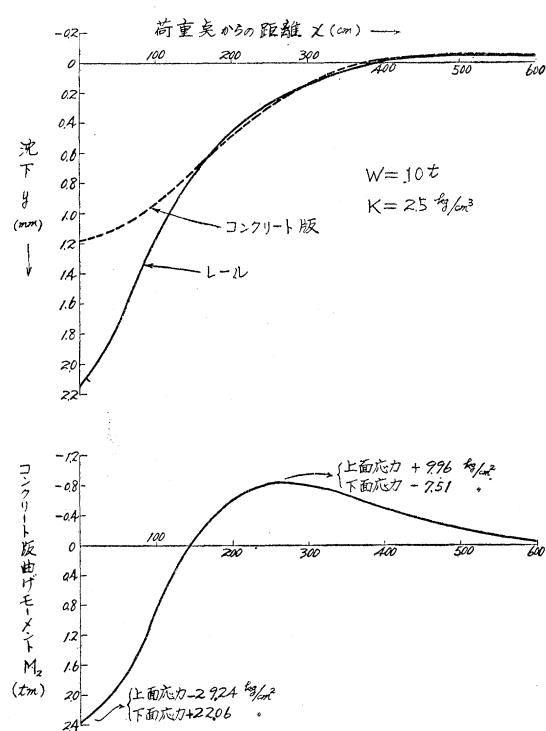
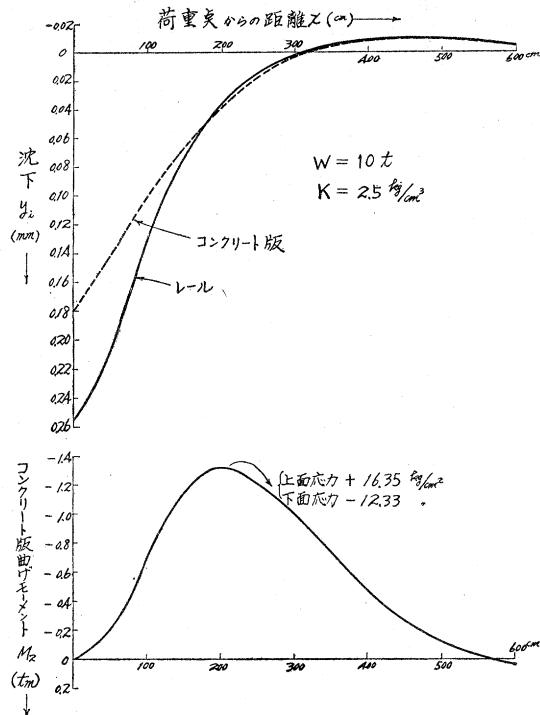


図-10 補装軌道端部についての変形

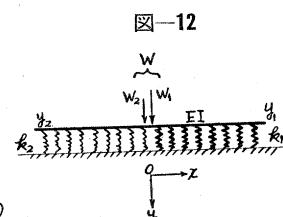
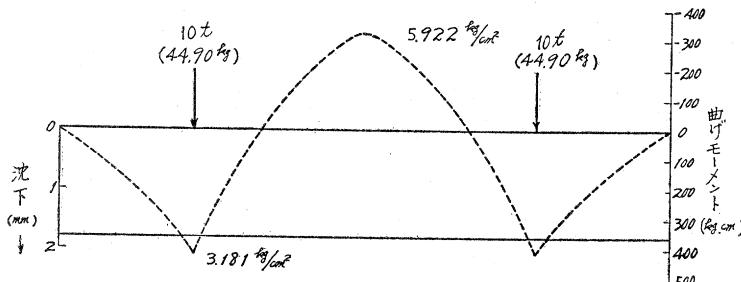


以上の計算結果の要点はつぎのようになる。

変形位置	最大沈下		最大圧力			最大コンクリート版曲げ応力	
	レール mm	コンクリート版 mm	レール支点 kg	レール支点の負 kg	路盤 kg/cm ²	上面 kg/cm ²	下面 kg/cm ²
中央部	2.16	1.18	3729	105	0.295	9.96	22.06
端部	2.54	1.81	3086	98	0.454	16.35	0.25

つぎにコンクリート版の直角方向の沈下と曲げ応力を計算し舗装軌道端部について示すと 図-11 に示すようになる。図から沈下はほとんど一様に生じ、また曲げ応力は非常に小さいことがわかりることは実測と合致する。しかし沈下の大きさは接続軌道の影響で実測の方がやや大きいがこの点についてはつぎに検討する。

図-11 補装軌道端部についてコンクリート版の直角方向の沈下と曲げ応力



3.3 補装軌道と普通軌道との接続

舗装軌道と普通軌道とを接続するときは文献 1), 2)にあげた条件によつて普通軌道のまくら木間隔を調節すれば、両軌道の境界に働く荷重は両軌道に均等に配分されるが、今回の試験軌道ではこのまくら木間隔の調節を行わなかつたので、舗装軌道部分の荷重分担の方が大きくなつてることになる。その割合はつぎのようになる。

レールが共通でレール支持ばね常数が 図-12 に示すように左右で異なる軌道境界上に荷重 W が働いたとき、両側での荷重分担はそれぞれ

$$\frac{W_1}{W} = \frac{\sqrt{k_1}}{\sqrt{k_1} + \sqrt{k_2}}, \quad \frac{W_2}{W} = \frac{\sqrt{k_2}}{\sqrt{k_1} + \sqrt{k_2}}$$

となる。

【証明】

荷重点を原点として横軸右に x , 下方に y をとり, 原点から右のレールの沈下を y_1 , 左のそれを y_2 とすれば, 弹性支持のはりの理論から一般解は A, B, C, D を未定常数として

$$y_1 = A e^{(-1+i)\beta_1 x} + B e^{(-1-i)\beta_1 x}, \quad \beta_1 = \sqrt{\frac{k_1}{4EI}}$$

$$y_2 = C e^{(1+i)\beta_2 x} + D e^{(1-i)\beta_2 x}, \quad \beta_2 = \sqrt{\frac{k_2}{4EL}}$$

と表わすことができる。

境界条件は $x=0$ において

$$y_1 = y_2, \quad \frac{dy_1}{dx} = \frac{dy_2}{dx}, \quad \frac{d^2y_1}{dx^2} = \frac{d^2y_2}{dx^2}, \quad EI \frac{d^3y_1}{dx^3} = W_1, \quad EI \frac{d^3y_2}{dx^3} = -W_2$$

となる。

これを解けば

$$A = \frac{i\beta_1 + \beta_2}{4i\beta_1(\beta_1 + \beta_2)(\beta_1^2 + \beta_2^2)} \cdot \frac{W}{EI}, \quad B = \frac{i\beta_1 - \beta_2}{i\beta_1 + \beta_2} A,$$

$$C = \frac{\beta_1(i\beta_2 - \beta_1)}{\beta_2(i\beta_1 + \beta_2)} A, \quad D = \frac{\beta_1(i\beta_2 + \beta_1)}{\beta_2(i\beta_1 + \beta_2)} A$$

となつて

$$\frac{W_1}{W} = \frac{\beta_1^2}{\beta_1^2 + \beta_2^2} = \frac{\sqrt{k_1}}{\sqrt{k_1} + \sqrt{k_2}}$$

が得られる。

図-12 の右側が舗装軌道で左側が普通軌道とし,

$$k_1 = \frac{750 \times 250}{750 + 250} \text{ kg/cm}^3 \quad (3.2 \text{ の記号では } \frac{k_1 \cdot k_2}{k_1 + k_2} \text{ に相当する}) = 187 \text{ kg/cm}^3$$

$k_2 = 98.2 \text{ kg/cm}^3$ (普通軌道の沈下実測から求められる。3.2 の記号では k_3 である)

の値を用いれば $W_1/W = 0.58$ となる。つまり 3.1, 3.2 で行つた舗装軌道端部の変形計算は荷重 10 t の 1/2 が舗装軌道に働くとしたものであるから、実験値と対応させるには計算値を 1.16 倍してから行わねばならないことになる。

4. 実験値と理論値との対比

前節の計算結果に図-4 で示した貨車の台車の影響を入れ、さらに端部については普通軌道と接続したための荷重分担割合の増加の影響を入れて実験値と対比した。実験値は荷重 10 t の 3 回の測定値を平均しさらに左右レールについて平均した値を用いた。

レールおよびコンクリート版の沈下については、中央部では図-13、端部では図-14 に示すようになる。図から実験と理論は大体合致することがわかる。端部の沈下実験値がやや大きいのは、荷重点がコンクリート版の端ではなく 20 cm 内部にあつたので荷重の分担割合が 3.3 で示した値より実際はやや大きかつたことによるであらう。

コンクリート版の曲げモーメントについてはコンクリート強度を分担した三浦技師の資料⁴⁾から示すと、中央部については図-15、端部については図-16 のようになる。図から実験と理論は大体一致しているが端部については上記荷重点が端より 20 cm 内部にあつた影響が認められる。

図-13 舗装軌道中央部におけるレールおよびコンクリート版の沈下

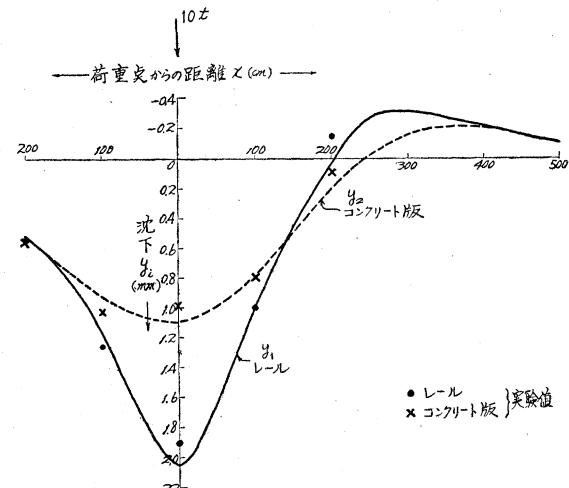


図-14 舗装軌道端部におけるレールおよびコンクリート版の沈下

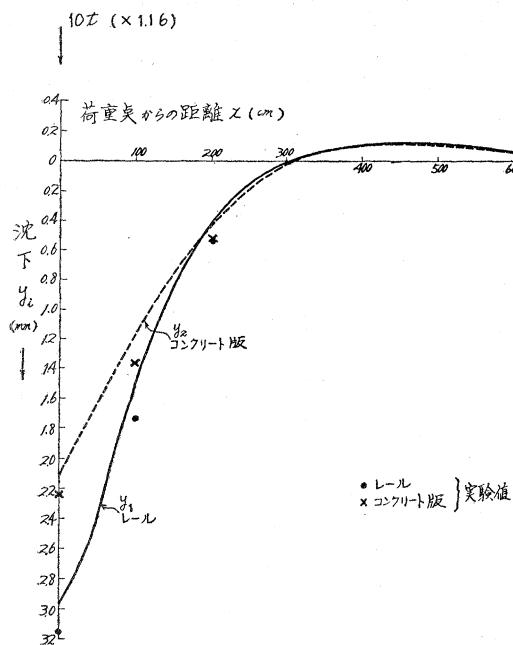
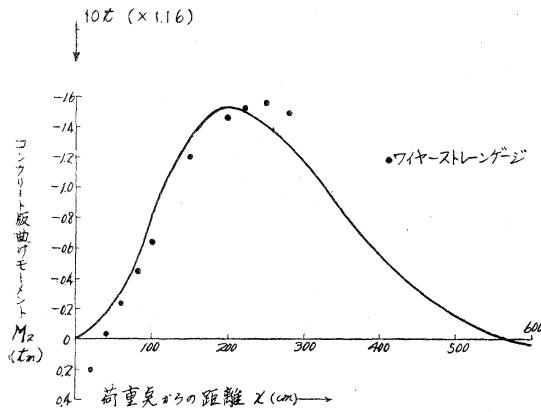


図-16 舗装軌道端部におけるコンクリート版曲げモーメント



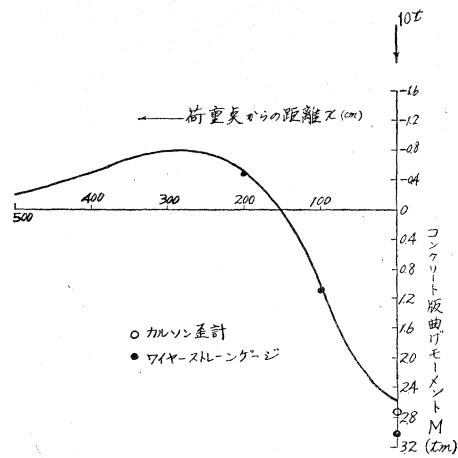
本試験軌道に関してはこのほか各種の項目をそれぞれ分担して実験を行つたのでこれらは別に報告される。

参考文献

- 1) 佐藤 裕: 連続弾性支持二重ばかりの点荷重による変形, 土木学会論文集, 49, 1957
- 2) 星野陽一・佐藤 裕: 舗装軌道の設計, 鉄道技術研究資料, 14-14, 1958
- 3) 星野・三浦・都・柿沢: 試験用舗装軌道の敷設工事報告, 鉄道技術研究報告, 30, 1958
- 4) 星野陽一・三浦一郎・佐藤 裕・都 淳一: コンクリート舗装軌道の実験的検討, 鉄道技術研究報告, 83, 1959

(昭.34.4.20)

図-15 舗装軌道中央部におけるコンクリート版曲げモーメント



5. 結 言

試作舗装軌道について実施した各種実験のうち載荷による沈下および応力の測定値を理論的に検討しておもにつぎのことがわかつた。

舗装軌道の変形は筆者の提案した理論計算によるものと実用上十分な合致を示すからこれによつて設計することができる。

設計のときとるべき路盤反力係数はつきのようにしなければならない。素地で $K_{75} = 2.5 \text{ kg/cm}^3$ であつたので厚さ 15 cm 程度の基盤を作りこれを転圧して $7 \sim 8 \text{ kg/cm}^3$ (K_{35} より推定) になつたが、実験値は素地そのままの値 2.5 kg/cm^3 を用いた理論値と良く合う。舗装軌道では沈下範囲が広いのでこの実験の程度に作られた基盤の影響は反力係数に対して少ない。

コンクリート版の曲げ応力は長手方向を重視すべきで横断方向はこれに比べて非常に小さい。試作されたコンクリート版断面では無筋では強度が不足である。

論文要旨

instant to instant in plunging of breaking waves to the breakwaters, the velocities of water particles in the breakers, and the behaviours of air bubbles entrained in them, were clarified by the synchronised use of a 16 millimeter high speed movie camera taken at a rate of 3 000 frames per second and an electro-magnetic oscillograph.

Formulas for the prediction of the maximum shock pressure and the vertical distribution of the maximum simultaneous shock pressures were derived for the vertical walls of composite-type breakwaters.

本論文は昭和 28 年から 34 年 3 月までに行つた混成防波の直立部に働く碎波の衝撃圧力に関する研究結果をまとめたものである。従来全く知られなかつた碎波が防波堤に衝突するときの各瞬間ににおける波形および水分子の速度、気泡の状態、波圧と波形との関係などを、高精度映画と電磁オシログラフを同時作動させることにより究明することができた。また直立壁における最大波圧式、最大同時波圧の鉛直分布および最大同時波圧の合力式を導いた。

土木学会論文集編集委員会

委員長	最上 武雄	委員	君島 博次	委員	田島 二郎	委員	松原 健太郎
委員員	芦田 和男	佐藤 裕	竹内 俊雄	竹下 春見	原口 好郎	丸安 隆和	三野 栄三郎
〃	井上 広胤	斎藤 昭太郎	竹下 春見	平嶋 政治	鷲井 敏夫	光易 恒	森 麟樹
〃	伊東 茂富	斎藤 義治	原口 好郎	藤波 哲二	細井 昌晴	山口 柏	渡辺 隆
〃	伊藤 文人	鷲井 裕之	平嶋 政治	藤崎 彰	松崎 彰	幹事 徳平 淳	
〃	伊藤 和幸	鈴木 信太郎	藤波 哲二				
〃	大久保 忠良	千秋 信一	細井 昌晴				
〃	大島 太市	高橋 国一郎	松崎 彰				
〃	奥村 敏恵	高橋 彦治					
〃	木村 俊晃						

昭和 34 年 11 月 10 日 印刷
昭和 34 年 11 月 15 日 発行

土木学会論文集第 65 号

定価 120 円 (手取料 20 円)

編集兼発行者 東京都新宿区四谷 1 丁目 末森 猛雄
印刷所 東京都港区赤坂溜池 5 番地 株式会社 技報堂

発行所 法人 土木学会

東京都新宿区四谷一丁目 電話 (35) 5138 (代表) 振替 東京 16828 番