UDC 625.143.48.042.3

溶接軌道に関する一考察

正員 小林 勇*
准員 浜口 篤弘**

AN INVESTIGATION ON THE WELDED RAIL

Isamu Kobayashi C.E., Member &
Atsuhiro Hamaguchi C.E., Assoc. Member

Synopsis To lay the welded continuous rail, several methods are considered; welding in hot season and giving the initial stress to the rail before welding, etc.

Now we have made a theoretical investigation on the method of giving the initial stress, and have determined the initial stress from the neutral temperature (no stress occuring in the rail) and the laying temperature of rails.

The tie restraint is generally taken as constant, but here we have taken it as a function of the distance from the unmovable point.

要旨 軌条の継目は軌条構造の最弱点である。近年次第に長尺軌条が使用され，更に進んで溶接による超長尺軌条の実施に至らんとしている。こゝに問題となるのは温度応力であつて，如何に処理するかその方法は色々考えられているが，まず溶接前に応力を与えておいて溶接する方法について一考してみた。

§1 緒 言

本研究は文部省科学研究費による「軌道構造に関する研究」の一部である。

軌条継目の存在は軌道の連続性を欠き，また軌道保守作業上極めて面白くない。これを溶接し連続軌条とすることにより，軌条の寿命の上からも，軌道保守の上からも大いに費用を節減出来ることは明らかである。しかし長大な軌条を敷くことは，トンネル内，路面鉄道は別として，普通の露出軌道では必ず温度応力，挫屈などの問題が起つてくる。アメリカでは，軌条は引張には強いから，軌条の溶接はなるべく夏季とか，気温の高いときに行つて敷設すればよいといわれている(1)。事実 1940 年以後の溶接時期を調べてみても 6～9 月の暑い時季に行われ，しかも 14 716 ft (約 4.5 km) に及ぶ長い溶接が実施されている(2)。イタリーでは溶接の前に軌条を加熱すればよいといつている人もある(3)。またドイツの Wattmann(4) は機械的に軌条に初応力を与えておいて溶接し，これによつて温度変化により生ずる応力をうまく加減し，継目無し軌道を敷設する方法を考えた。すなわち軌条に温度応力のない時の温度を中性温度と名付け，この中性温度をその土地の状態に応じて適当に定め，この温度と軌道敷設時の軌条温度との温度差によつて呼起される軸応力に等しい初応力を溶接前に与えておく。そして溶接後，軌条の緊締を順次解いて応力の平均分配する方法を用いるならば，この軌条が中性温度に達したとき応力は 0 となり，こゝを起点として温度上昇並びに降下に対して軌条に合理的な応力を生ぜしめることが出来る。

この場合予め定めた中性温度に対して敷設時にどれだけの初応力を与えればよいかについて，Wattmann は道床抵抗 $r=$ 一定と仮定しているが，こゝでは一般に $r=kx^n$ として前者と合せて解いてみた。

§2 応力線と応力面積

軌条と枕木とは充分固く締めつけられているとし，軸方向に初応力 P を与えた場合，この力は枕木の抵抗(道床抵抗) r と釣合わねばならない。すなわち $P=\Sigma r$ である。図—1 で枕木の間隔が軌条長に対して極めて小であると考えれば，軌条 dx 間の道床抵抗は rdx，また dx 間の応力差 $d\sigma$ は，

---

* 京都大学教授
** 京都大学大学院特別研究生

(1) H.F. Fifield, "Continuous Welding of Rail" Proceedings of the A.R.E.A. 1936, vol. 37.
(2) I.H. Schram, "Continuous Welded Rail" Proceedings of the A.R.E.A. 1949, vol. 50, Feb.
(3) Felice Corini, "Track Laying for High Speeds" Bulletin of the I.R.C.A. 1936, vol. 18, Apr.
(4) D. Wattmann, "Schweissung luckenloser Gleise mit Vorspannung" Gleistechnik und Fahrbahnbau, 1938, 14. Jahrg., Heft 5/6, 7/8.

$$\left.\begin{array}{ll} d\sigma=rdx/F \quad \text{または} \quad \sigma_a-\sigma_b=\dfrac{1}{F}\displaystyle\int_b^a rdx \\ \tan\varphi=\dfrac{d\sigma}{dx}=\dfrac{r}{F} \qquad (F:\text{軌条断面積}) \end{array}\right\} \cdots\cdots(1)$$

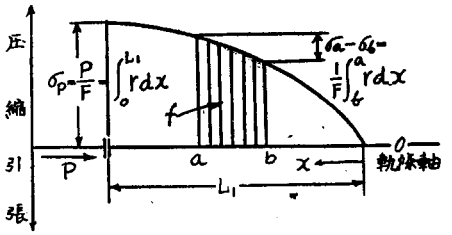
応力 σ のために生ずる軌条 dx 当りの伸縮量 $\Delta\delta$ は，

$$\Delta\delta=\frac{\sigma dx}{E}=\frac{\Delta f}{E} \quad \text{よつて} \quad \delta=\frac{f}{E} \cdots\cdots(2)$$

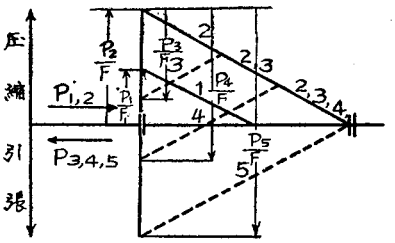
（E：軌条の弾性係数）

すなわち応力面積 f を E で割つたものは軌条の伸縮量に等しい。応力が変化した場合はその面積差が軌条に新たに生じた伸縮量となる。軌条の伸縮が拘束されている場合は，加わつた面積と減つた面積とが等しいこととなる。

図—1



図—2



以下図においては上側に圧縮，下側に引張をとる。図—2で P_1 なる圧縮力を加えたときの1なる応力線は，順次力を加えて行くと，2なる応力線となり，その足が軌条端に達した後は，もし軌条が継いでないならば，更に力を増しても，軌条は全体が移動するだけでこれより応力面積は増加しない。次に引張力を加えてゆくと，応力線は3,4,5のように生ずる。最後は5となつて，それ以上は軌条の移動となり応力面積は増加しない。

今1つの継目力を与えた場合，応力線と応力面積は如何になるか，これを道床抵抗 $r=kx^n$ において $n=0$ 及び $n>0$ の2つの場合について考えてみる。

A）$n=0$ すなわち $r=$一定の場合（図—3A）

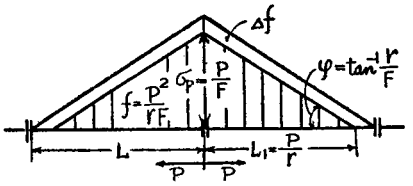
継目における最大応力　$\sigma_p=\dfrac{P}{F}$

底線　$L_1=\dfrac{P}{r}$ ……(3)

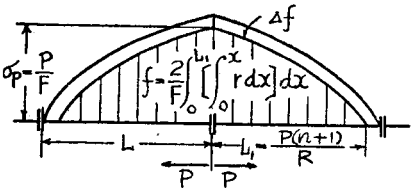
応力面積　$f=\dfrac{P}{F}\dfrac{P}{r}=\dfrac{P^2}{Fr}$ ……(4)

B）$n>0$ すなわち $r=kx^n$ の場合（図—3B）

図—3A



図—3B



$$\sigma_p=\frac{1}{F}\int_0^{L_1} rdx=\frac{1}{F}\int_0^{L_1} kx^n dx=\frac{1}{F}\left[\frac{1}{n+1}kL_1{}^nL_1\right]$$

$kL_1{}^n$ は $x=L_1$ における道床抵抗でこれを R で表わせば，

$$\sigma_p=\frac{R}{F(n+1)}L_1 \quad \text{また} \quad L_1=\frac{P(n+1)}{R} \cdots\cdots(5)$$

従つて応力面積は，

$$f=\frac{2}{F}\int_0^{L_1}\left[\int_0^x rdx\right]dx=\frac{2RL_1{}^2}{F(n+1)(n+2)}=\frac{2P^2(n+1)}{RF(n+2)} \cdots\cdots(6)$$

以上のような応力を与えておいて溶接後軌条の緊締を弛め応力を軌条全長に亘つて平均分配し，再び緊締する

のである。

一方中性温度以上または以下の温度差 t_u が生ずるとき，その軌条には，

$$\sigma_a = t_u \alpha E \qquad (\alpha:\ \text{軌条の熱膨張係数}) \quad \cdots\cdots(7)$$

なる応力が軌条全長に亘つて生じ，その時の応力面積は，

$$f_u = t_u \alpha E L \quad \cdots\cdots(8)$$

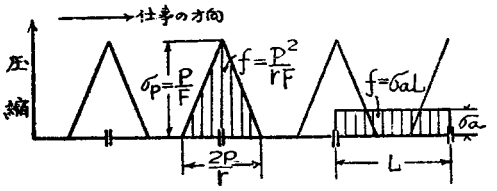
で $f_u = f$ より P と t_u の関係が導かれる。

§3 圧縮初応力を与える場合

A) $n=0$ のとき

i) $L > 2L_1 = \dfrac{2P}{r}$ すなわち応力三角形の底線が互に重ならない場合（図—4）

図—4



応力三角形の面積は式(4)より $f = \dfrac{P^2}{rF}$

かくして溶接された後緊締を解き応力を平均させると，

応力は $\sigma_a = \dfrac{f}{L} = \dfrac{P^2}{rFL}$

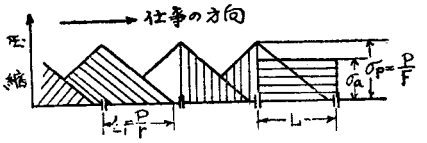
平均応力 σ_a に相当する上昇温度は式(7)より

$$t_u = \frac{\sigma_a}{\alpha E} = \frac{P_2}{\alpha E F r L}$$

$$\therefore\ P = \sqrt{\alpha E F r L t_u} \quad \cdots\cdots(9)$$

ii) $L < 2L_1 = \dfrac{2P}{r}$ すなわち応力三角形の底線が互に重なる場合（図—5）

図—5



図よりして $f = \dfrac{L}{F}\left(P - \dfrac{rL}{4}\right)$

同様にして溶接後軌条の緊締をとけば，

$$\sigma_a = \frac{f}{L} = \frac{1}{F}\left(P - \frac{rL}{4}\right), \qquad t_u = \frac{1}{\alpha E F}\left(P - \frac{rL}{4}\right)$$

$$P = \alpha E F t_u + \frac{1}{4} r L \quad \cdots\cdots(10)$$

B) $n>0$ の場合

i) $L > 2L_1 = \dfrac{2P(n+1)}{R}$ のとき（図—3 B，図—4 参照）

応力面積は式(6)より， $f = \dfrac{2P^2(n+1)}{RF(n+2)}$

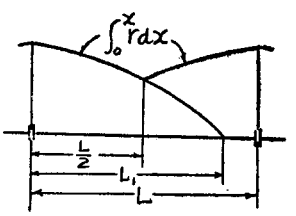
r 一定の場合と同様にして，

$$t_u = \frac{f}{\alpha E L} = \frac{2P^2(n+1)}{\alpha E F R L(n+2)}$$

$$P = \sqrt{\frac{\alpha E F R L t_u (n+2)}{2(n+1)}} \quad \cdots\cdots(11)$$

ii) $L < 2L_1 = \dfrac{2P(n+1)}{R}$ のとき（図—6）

図—6



その応力面積は，

$$f = \frac{2}{F}\int_{L_1 - \frac{L}{2}}^{L_1} \frac{k x^{n+1}}{n+1} dx \fallingdotseq \frac{L}{F}\left(P - \frac{RL}{4}\right)$$

$$t_u = \frac{f}{\alpha E L} \fallingdotseq \frac{1}{\alpha E F}\left(P - \frac{RL}{4}\right)$$

$$P \fallingdotseq \alpha E F t_u + \frac{1}{4} R L \quad \cdots\cdots(12)$$

§4 引張初応力を与える場合

A) $n=0$ のとき（図—4,5 参照）

i) $L > 2L_1$

これは圧縮の場合と図が反対側に出来るだけでやはり

$$P=\sqrt{\alpha EFrLt_u} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \text{前出 (9)}$$

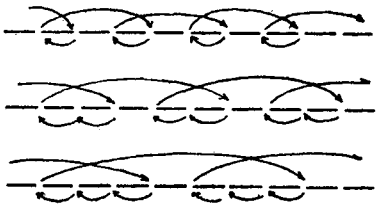
ii）$L<2L_1$

之も圧縮の場合と同様に

$$P=\alpha EFt_u+\frac{1}{4}rL \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \text{前出(10)}$$

なおこの場合，$L<L_1$ で，応力線の足が次の継目を越えている場合には，次の継目を溶接するとき，継目鈑を取除くと応力線はこゝで切断され複雑な形となる。その時はこの式は用いられない。それで図—7に示すようにある本数づゝを応力をかけずに溶接し，相当の長軌条になつて応力線が継目に達しなくなつたものを上記の方法で溶接することにすればよい。

図—7



B）$n>0$ のとき

この場合も §3 の場合と同様に行える。但し応力線の足が次の継目を越える場合は A）ii）に述べたようにすればよい。

§5　溶接部の収縮の影響を考慮した場合

溶接継目は冷却につれてこゝに収縮が現われる。以下その影響を求めてみる。

A）圧縮力を与えて溶接した場合（図—8）

$r=$一定，$r=kx^n$ の場合共溶接後の収縮を δ_w とすれば，この δ_w に相当する軌条の温度変化は，

$$t_w=\frac{\delta_w}{\alpha L} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (13)$$

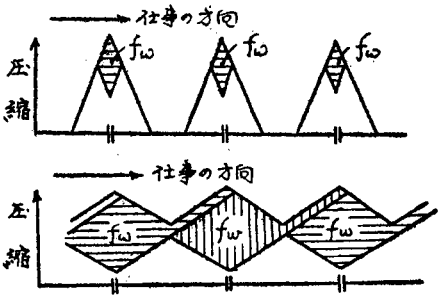
B）引張力を与えて溶接した場合

I）$n=0$ の場合

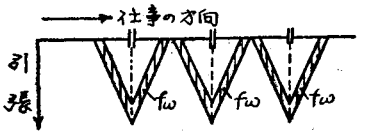
i）$L>2L_1$（図—9A）

この場合も上と同様に　$t_w=\dfrac{\delta_w}{\alpha L}$

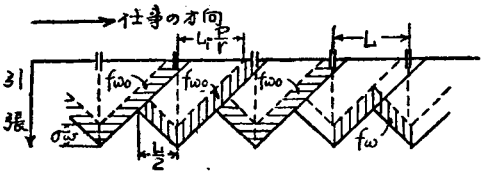
図—8



図—9A



図—9B



ii）$L<2L_1$（図—9B）

継目の収縮 δ_w によつて生ずる応力面積 f_{w0} は図よりして近似的に

$$f_{w0}=\left(\frac{L}{2}+L_1\right)\sigma_w=\left(\frac{L}{2}+\frac{P}{r}\right)\sigma_w=\delta_w E$$

$$\therefore\ \sigma_w=\frac{2r\delta_w E}{rL+2P}$$

ところが引続き溶接を完了した後，軌条長 L につき実際に増加した応力面積 f_w は $f_w=L\sigma_w$

$$\frac{f_w}{L}=\sigma_w=\alpha Et_w$$

従つて

$$t_w=\frac{2r\delta_w}{\alpha(rL+2P)} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (14)$$

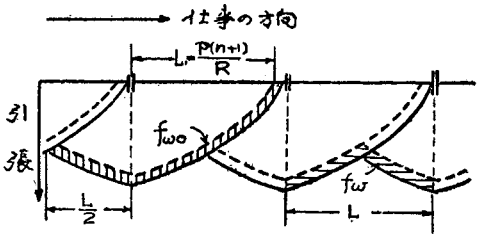
II）$n>0$ の場合

i） $L>2L_1$

I）の場合と同様重なる面積はなく $t_w=\dfrac{\delta_w}{\alpha L}$

ii） $L<2L_1$（図—10）

図—10



収縮 δ_w による増加面積 f_{w0} の平均縦距(応力)を σ_w とすると近似的に，

$$\sigma_w=\frac{f_{w0}}{L_1+\dfrac{L}{2}}=\frac{\delta_w E}{\dfrac{P(n+1)}{R}+\dfrac{L}{2}}$$

全線溶接後に於ける実際の増加面積は，

$$f_w=\sigma_w\times L=\frac{\delta_w EL}{\dfrac{P(n+1)}{R}+\dfrac{L}{2}},\qquad \frac{f_w}{L}=\alpha Et_w$$

従つて

$$t_w=\frac{2R\delta_w}{\alpha\{RL+2P(n+1)\}}\quad\cdots\cdots(15)$$

上記収縮の影響を考慮して継目に加うべき初応力を夫々の場合につき求めると次のようになる。

A） 軌条温度が中性温度以上の場合与えるべき圧縮力

I） r=一定のとき

$$\begin{cases} L>2L_1: & P=\sqrt{\alpha EFrL(t_u+t_w)}\quad\cdots\cdots(16\text{ a})\\ L<2L_1: & P=\alpha EF(t_u+t_w)+\dfrac{1}{4}rL\quad\cdots\cdots(17\text{ a})\end{cases}$$

こゝに $L_1=\dfrac{P}{r},\quad t_w=\dfrac{\delta_w}{\alpha L}$

II） $r=kx^n$ のとき

$$\begin{cases} L>2L_1: & P=\sqrt{\dfrac{\alpha EFRL(n+2)(t_u+t_w)}{2(n+1)}}\quad\cdots\cdots(16\text{ b})\\ L<2L_1: & P=\alpha EF(t_u+t_w)+\dfrac{1}{4}RL\quad\cdots\cdots(17\text{ b})\end{cases}$$

こゝに $L_1=\dfrac{P(n+1)}{R},\quad t_w=\dfrac{\delta_w}{\alpha L}$

B） 軌条温度が中性温度以下の場合与えるべき引張力

I） r=一定のとき

$$\begin{cases} L>2L_1: & P=\sqrt{\alpha EFrL(t_u-t_w)},\quad t_w=\dfrac{\delta_w}{\alpha L}\quad\cdots\cdots(18\text{ a})\\ L<2L_1: & P=\alpha EF(t_u-t_w)+\dfrac{1}{4}rL,\quad t_w=\dfrac{2r\delta_w}{\alpha(rL+2P)}\quad\cdots\cdots(19\text{a})\end{cases}$$

こゝに $L_1=\dfrac{P}{r}$

II） $r=kx^n$ のとき

$$\begin{cases} L>2L_1: & P=\sqrt{\dfrac{\alpha EFRL(n+2)(t_u-t_w)}{2(n+1)}},\quad t_w=\dfrac{\delta_w}{\alpha L}\quad\cdots\cdots(18\text{ b})\\ L<2L_1: & P=\alpha EF(t_u-t_w)+\dfrac{1}{4}RL,\quad t_w=\dfrac{2R\delta_w}{\alpha\{RL+2P(n+1)\}}\quad\cdots\cdots(19\text{ b})\end{cases}$$

こゝに $L_1=\dfrac{P(n+1)}{R}$

§6 道床抵抗 r の値と中性温度の選定

A） 道床抵抗 r の値

道床抵抗 rの値は国鉄軌道整備心得解説によれば，50,37,30 kg の各種軌条に対して何れも 200 kg/m としている。又堀越—三氏[5]はその国鉄に於ける実験の結果 $r\propto\delta^n$ 従つてまた $r\propto x^n$ なる関係があるとし，この n の値は道床の種類により異り，すなわち切込道床では $1/4$，精選並びに砕石道床では $1/6$ としている。その実験結果より道床抵抗の最大値を求めると，大略切込道床では 320 kg/m，精選道床では 390 kg/m，砕石道床では 430 kg/m となる。但しいずれも 24 m 軌条に普通枕木 36 挺を配置しかつ枕木の露出量は 0 とした場合である。又星野

(5) 堀越一三 "軌条の挫屈について" 鉄道省業務研究資料，昭和9年6月，22 巻 18 号

陽一氏[6]も上記実験の結果よりして $r=K\delta^n$ の K の値を各種軌道状態について求めている。次にドイツの例をみると道床抵抗は一般に 200～800 kg/m（軌間 1.435 m）とし之が一様に分布するものとして取扱つている。

この道床抵抗の値とその分布に関しては，なお今後の研究に俟つべき点が多い。

B）中性温度の選定

中性温度は，その土地に於ける軌条の受ける温度変化の外に，軌条の挫屈強度，溶接強度（特に引張強度）などを考慮して適当に選定せねばならぬ。国鉄軌道整備心得解説によれば，軌条継目整正に関し，札鉄局管内およびこれに準ずる線路では，−30°～52°C すなわち 82°C の温度範囲を，また上記以外の線路では，−15～60°C すなわち 75°C の温度範囲をとつている。その平均温度は大略前者では 11°C，後者では 23°C であるから，中性温度としてはこれより可成り高い温度をその地方に応じて適当に定めるべきであろう。

§7　計算例

A）中性温度 30°C と仮定し PS 50 kg 軌条（$F=64.33\ \mathrm{cm}^2$）をあらかじめ溶接して $L=4@25=100$ m とし，これを軌条温度 35°C の時敷設溶接するものとする。すなわち $t_u=35°-30°=5°$C なお $\alpha=0.000\,011/°$C，$E=2\,100\,000\ \mathrm{kg/cm}^2$，$\alpha E=24$ として計算を進める。

i）$n=0$ の場合

こゝでは $r=200$ kg/m とする。$\delta_w=0.3$ cm とすれば式(13)より

$$t_w=\frac{\delta_w}{\alpha L}=2.7°$$

今式(16 a)を用いると $P=15.8$ t で $L>2L_1=\dfrac{2P}{r}$ を満足しない。故に式(17 a)を用いて，

$$P=\alpha EF(t_u+t_w)+\frac{1}{4}rL=16.9\ \mathrm{ton}\ (\text{圧縮})$$

ii）$n>0$ の場合

堀越氏の実験に従いこれを精選道床 50 kg 軌条で枕木 41 挺/25 m（枕木露出量 0）を配した場合に換算すると道床抵抗 r は次式[6]のようになる。

$$r=310\delta^{1/6}(\mathrm{kg/m})\ (\text{但し}\ r_{\max}=310\times7^{1/6}=428\ \mathrm{kg/m},\ \delta\fallingdotseq7\ \mathrm{mm}\ \text{のとき})$$

この場合の相当温度上昇量は $t=t_u+t_w=7.7°$ で結局軌条の一端では $\delta=\dfrac{1}{2}\alpha Lt=4.2$ mm だけ圧すればよいことになる。従つて軌条端における最大道床抵抗 R は上式より

$$R=310\times4.2^{1/6}=394\ \mathrm{kg/m}$$

この値を式(17 b)に入れると　$P=\alpha EF(t_u+t_w)+\dfrac{1}{4}RL=21.7$ ton（圧縮）

そして

$$L=100<2L_1=\frac{2P(n+1)}{R}=128\ \mathrm{m}$$

それ故この計算でよい。

B）軌条温度 15°C すなわち $t_u=30°-15°=15°$C で溶接する場合

i）$n=0$ の場合

$r=200$ kg/m，$\delta_w=0.3$ cm と仮定する。この場合 $L=100$ m として計算すれば，$L<L_1=\dfrac{P}{r}$ となり前に述べたようにこのまゝでは式(19 a)は用いられない。それ故に $L=8@25=200$ m に溶接し式(14)を(19 a)に入れて P を求めると　$P=31.6$ ton（引張）

そして $L=200>L_1=\dfrac{P}{r}=158$ m なる故上の計算でよい。

ii）$n>0$ の場合

道床抵抗は $r=310\delta^{1/6}<428$ kg/m としてまた軌条長は i)の場合とおなじく $L=200$ m とする。この場合温度差 $t_u=15°$C で，これに収縮の影響 t_w を考慮すれば相当温度降下量は，$t=t_u-t_w=10°$～$15°$C である。今 $t=12°$C とすると，$\delta=\dfrac{1}{2}\alpha Lt=1.32$ cm だけ引伸ばさねばならない。従つて，

$$R=310\times1.32^{1/6}=470\ \mathrm{kg/m}$$

それ故 $R=423$ kg/m を用いねばならない。この R 並びに以上既知の数値を用いて式(19 b)によつて P を求めると，　$P=38.3$ ton

しかして

$$L=200<2L_1=\frac{2P(n+1)}{R}=209\ \mathrm{m}\ (\text{引張})$$

それ故この計算でよい。

(6)　星野陽一"無接目軌条使用の可能性"鉄道省業務研究資料，昭和 13 年 2 月，26 巻 4 号