

論 說 報 告

第 29 卷 第 10 號 昭和 9 年 10 月

軌 條 の 挫 屈 に 就 て

會 員 工 學 博 士 堀 越 一 三*

On the Buckling of Rails.

By Ichizo Horikoshi, Dr. Eng., Member.

内 容 梗 概

長尺軌條が普通軌道に敷設される様になつてから挫屈に對する軌條の抵抗力に關する問題は急に重要性を増して來た。長尺軌條を敷設した軌道の繼目遊間は軌條自由伸縮に對する値より遙かに小にする。従つて軌條は夏期酷暑の候に軸壓力を受ける。この軸壓力が大になると軌條は挫屈の傾向を示す様になる。

種々の状態にある軌條の挫屈抵抗を知るために大宮驛構内に試験軌道を作り種々の實驗を施行した。試験軌道は長さ 48m でその兩端はコンクリート・ブロックに固定されて居る。軌條の軸壓力は機關車からとつた蒸氣で軌條を温めて發生せしめ或は試験軌道端とコンクリート・ブロックの間に挿入した水平加壓器によつて直接これを加へた。試験軌道の軌條は 30 kg, 37 kg, 50 kg であつた。軌道は直線又は曲線に敷設した。道床には碎石、精選又は切込砂利を用ひた。道床の幅又はそれが枕木を包む厚さは種々に變へた。これ等の構造を有する試験軌道で軸壓力の大小水平及び垂直方向に於ける軌道の變形、軌條の壓縮量、材木移動に對する道床の抵抗等を測定した。

測定した結果を用ひて軌條の挫屈抵抗の計算をなし軌條に許容し得る最大軸壓力の大きさを研究した。これと同様の計算によつて普通軌條に就ても種々の研究を行つた。

本論文は鐵道省發行業務研究資料第 23 卷第 18 號「軌條ノ挫屈ニ就テ」(昭和 9 年 6 月 25 日)を簡約したものである。

目 次

目 次	頁
緒 言	1
第 1 章 軌條挫屈の實驗	2
第 1 節 實驗施設	2
第 2 節 軌條溫度を高めて挫屈を生ぜしむる實驗	4
第 3 節 加壓器によつて軸壓力を加へ挫屈を生ぜしむる實驗	6
第 4 節 軌條挫屈に關係する定數の測定	13
第 5 節 軌條挫屈實驗値の理論的考察	17
第 6 節 特別の構造或は状態の軌道に就ての實驗	28
第 2 章 普通の軌道に於ける軌條挫屈の問題	31
第 1 節 概説	31
第 2 節 軌條挫屈抵抗	32
第 3 節 軌條の伸縮と繼目遊間	37

緒 言

軌條繼目の數はなるべく少くし繼目遊間はなるべく小にするを可とす。特に長尺軌條を敷設する場合には溫度

* 鐵道局技師、東京鐵道局工務課勤務

の變化に伴ふ軌條自由伸縮の要求する量より小なる繼目遊間を附することになるから夏季酷暑の候には相當の軸壓力が軌條内に發生する。従つて斯る場合の保線作業には周到なる注意を要すべく軌條の敷設方法及び軌道構造に對しても適當なる考慮を必要とす。

この問題に關する研究を目的として大宮驛構内に試験軌道を築造し昭和 7 年 11 月 3 日より 12 月 20 日に互り軌條に軸壓力を加へて挫屈を生ぜしむる實驗を行つた。實驗に際しては軌道構造を色々に變へ種々の保線作業を施行する場合を考へこれ等が軌條挫屈抵抗に如何なる影響を及ぼすかを調査した。

この各種の實驗結果から現在我國の軌道に敷設された軌條には幾何の軸壓力を許容すべきかを判斷することを得べく、従つて長尺軌條の敷設方法も定まり高温の際の保線作業を如何にすべきかの問題も解決する。尙且枕木道床は在來の軌道にあつては列車荷重の支持を主要任務としたが長尺軌條の場合には軌條挫屈防止に對して新なる重要任務を果さなければならぬ。従つて軌道構造を如何にすれば有効に軌條挫屈の危險を遠ざけることが出来るかを考究した。

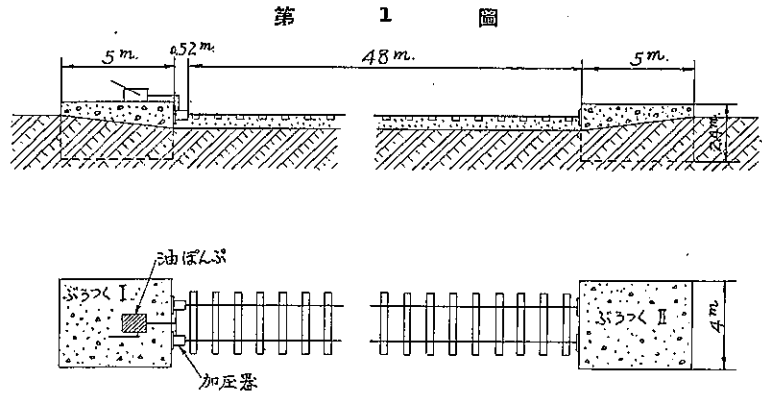
軌條挫屈の實驗的研究は既に 1928 年より 1929 年に互り Carlsruhe に於て Ammann 及 v. Grünewaldt が行つて居り今回の實驗装置はこれに負ふ所が少くなかつた。Kayser, Wöhr!, Nemecek, Wattmann, Bloch, v. Grünewaldt, Baticle, Robert Lévi, Sanden 等の論文は軌條挫屈の問題に對する好資料である。

第 1 章 軌條挫屈の實驗

第 1 節 實驗施設

試験軌道の軌條に任意の軸壓力を與へる爲第 1 圖に示す様に試験軌道の兩端に 48.52 m を隔て、2 つの軌條止コンクリート・ブロック I 及 II を築造した。ブロック I の前面には能力 80 ton の水平加壓器 2 基を取付ける。

2 基の加壓器はハイドロリック・ジャックを水平にしたもので、その中心間隔は 1.13 m で軌道に敷設した軌條の中心間隔に一致する。ブロック II と水平加壓器の間には延長 48 m の軌道を直線に或は任意半徑を有する曲線に敷設することが出来る。軌條止コンクリート・ブロックは各長さ 5 m、幅 4 m、



高さ 2.4 m でその上に古軌條を積載し結局ブロック I の重量は 175 ton、ブロック II の重量は 140 ton に達せしめた。ブロック I の上に油ポンプを据付け加壓器に油を壓入する。この壓力に應じて加壓器のラムが壓し出され軌條に軸壓力を加へる。兩側加壓器の油は同一ポンプより同一導管を経て壓入されるものであるから兩側の加壓器は同時に同一の壓力を示す。この壓力の大きさは導管の途中に取付けられた壓力計によつて讀むことが出来る。曲線軌道を敷設する場合には加壓器とブロック I の間に傾斜した鋸を挿入しピストン軸が曲線軌道中心線に接する様にした。第 2 圖にコンクリート・ブロック I を示した。

軌條軸壓力を増減すると軌道上構は匏進し上下及び左右に移動する。軌道匏進は軌道中心から 1.4m の所に基準杭を立てこれを固定点とするリバー装置により記録紙上に 2 倍に記録せしめた。

軌條の上下及び左右の移動を測定する爲軌道の兩側に軌道中心から 1.5m 以上離れて木杭を建植しこれに高さ 14cm, 幅 3cm の横板を架渡した。木杭はコンクリート基礎の上にある。同時に軌條頭には特殊の金具を取付けた。横板の上の記録紙上に横板と金具との相對移動を記入すればこれが軌條の上下及び左右の移動である。従つて隨時軌條軸壓力と軌道上構の上下又は左右移動の關係を調査することが出来る。この装置は軌道長約 5m 毎に設置した。第 3 圖はこの一般装置を示したものである。最後の軌條挫屈は水糸を張り各枕木上(間隔 70~76cm)で原位置からの軌條移動量を測定した。

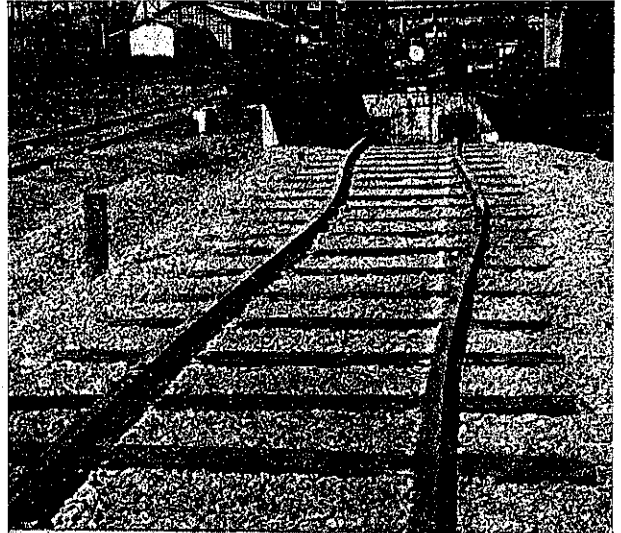
以上の装置によつて軌條挫屈の調査をなす方法に 2 種類ある。(1)は軌條をブロック II と加壓器の間に遊間を全然無くして敷設し加熱して軌條溫度を上げ軌條軸壓力を生ぜしむる方法である。(2)は單純に加壓器のみを作用せしめて軌條に軸壓力を與へる方法であつて、Ammann 及び Grünewaldt の實驗は全然これによつた。

試験軌道は 2 つの軌條止コンクリート・ブロックの間に延長約 48m に互つて敷設するのであるが、直線の外に半徑 300m 及び 500m の曲線とした。軌道の構造及び材料も種々に變更し出来る丈多くの場合に就て調査した。

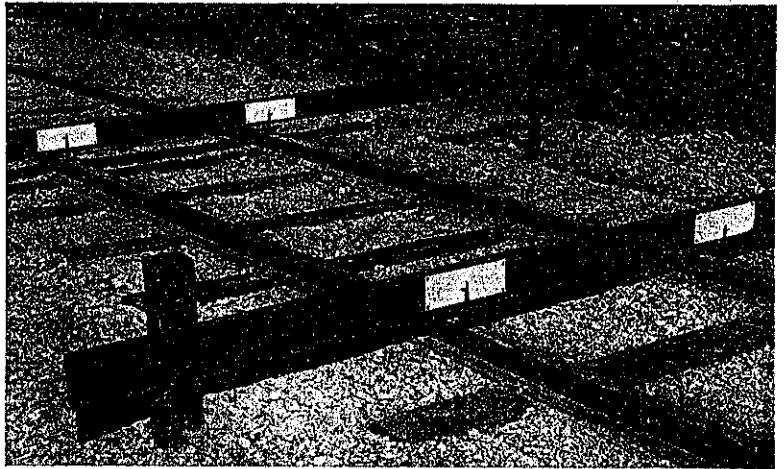
使用した軌條は種々の長さをも有する新舊の S. P. 50 kg, A. S. C. E. 37 kg 及び 30 kg 軌條である。軌條の繼目には短册形繼目鉋と共に角形繼目鉋を使用した。

枕木は幅 20cm, 厚さ 14cm, 長さ 213cm の普通品で軌條との取付けは 37 kg 及び 30 kg 軌條の場合には簡單に犬釘のみによつたが, 50 kg 軌條の場合には犬釘の外にタイプレートと螺釘をも併用した。枕木中心間隔は 50 kg 及び 37 kg 軌條に於て 70~71.1cm, 30 kg 軌條に於ては 76.2cm とした。

第 2 圖



第 3 圖



道床材料としては切込砂利,精選砂利及び碎石を用いた。道床が枕木を覆ふ程度も色々に変へた。

第 2 節 軌條温度を高めて挫屈を生ぜしむる實驗

1. 装 置

直接軌條温度を高めて條軌軸壓力を發生せしめ軌條の挫屈を實驗することの必要は論を俟たない所であるが、多くの困難があり多大の装置を要する爲、未だかつて行はれて居らなかつた。今回施工した前述の一般装置と蒸氣機關車を用ひて比較的容易にこの實驗を行ふことができた。

第 5 圖に示す様に軌條止ブロックの間に敷設した試験軌道の軌條に沿ひ 4 本の蒸氣導管を装置した。この蒸氣導管は軌條の兩側にあつて軌條腹部に接して居る。試験軌道の隣接線には C 50 形蒸氣機關車を入れそれが發生する蒸氣をこの蒸氣導管に導いた。蒸氣は供給の途中過熱装置で過熱され蒸氣導管の中央から入り兩端に向つて流れ排氣孔より排出される。蒸氣導管より軌條への熱の傳導をよくする爲に軌條と導管とを紙で包み尙周圍を薄く砂で覆ふた。蒸氣導管は外徑 44 mm, 内徑 40 mm 中心軸に對する斷面二次率は 5.8 cm^4 であるが、約 5 m 毎にこれを橢圓形につぶし縱中心軸に對する斷面二次率を約 1.8 cm^4 とした。軌條の縱中心軸に對する斷面二次率 327 cm^4 に比すれば極めて小である。軌條温度は軌條頭中央に直徑 8 mm, 深さ 35 mm の孔を穿ち水銀を満し、これに寒暖計を挿入して測定した。過熱装置の爲、蒸氣の温度は著しく高められ排氣孔に於てすら 90°C 以上にすることができた。軌條の温度も從つて高められ最高 100°C 以上に達したことがある。

軌道には長さ 12 m の 50 kg 軌條を敷設し道床には切込砂利を用ひた。枕木中心間隔は 71.1 cm である。

軌條温度を測定する孔は各軌條に 2 箇所宛合計 16 箇所に穿つた。この軌道を直線及び半径 300 m の曲線に敷設し加熱して軌條挫屈を實驗した。

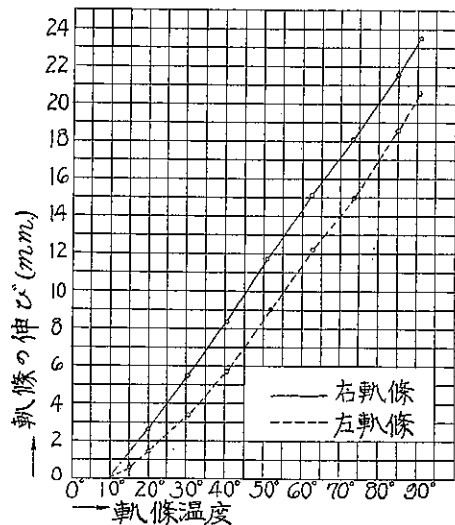
2. 直線軌道に就ての實驗

軌道を直線に遊間を全く無くして敷設した。軌條温度は約 10°C であつた。約 4 時間蒸氣を通じ加熱した結果軌條温度は所によつて多少異なるが 76°C ~ 106°C に達した。試験軌道の中央附近は最も高温度の過熱蒸氣を受ける所であるから軌條温度も最も高くそれより兩端に進むに従ひ温度は次第に低下した。

軌條止ブロックは略彈性的に軌條軸壓力を支へるのであるから軌條は温度が高まれば伸長することができる。勿論その伸長量は自由伸長の場合より遙かに小である。ブロック I 側の軌條端より 1.9 m 及びブロック II 側の軌條端より 2.6 m の所で軌條蜀進を測定し中間の延長 43.5 m の軌條の伸長量を求めた結果が第 4 圖である。軌條温度としては片側軌條上の 8 箇の寒暖計の示す値の平均をとつた。平均温度 91°C 即ち温度上昇 $91^\circ - 10^\circ = 81^\circ\text{C}$ の時の 43.5 m の軌條の伸びは平均 22 mm である。

β を鋼の線膨脹係數, l を軌條長, t を上昇温度, F を軌條斷面積, E を軌條のヤング係數, P を軌條軸壓力, λ_t を温度上昇による軌條の伸び, λ_p を軸壓力による軌條の壓縮, δ をコンクリート・ブロック間に敷設した軌條の伸びとす

第 4 圖



ると

$$\delta = \lambda_i - \lambda_p$$

従つて

$$P = (\beta t - \delta) \frac{EF}{l}$$

$$\beta = 0.0000114 \quad t = 91^\circ - 10^\circ = 81^\circ\text{C} \quad l = 43.5 \text{ m} \quad \delta = 22 \text{ mm} \quad \text{とすると}$$

$$P = 56 \text{ ton}$$

但し軌條と軌條支承體の間の抵抗力 r の影響は小であるから省略した。水平加壓器を作用せしめ軌條軸壓力の大きさを調べて見たのに略この値に近い壓力を示した。斯る軸壓力を受けて軌條が上下及び水平方向に如何なる移動をなしたかを見るに水平方向では最大 2.5 mm, 上下の方向では最大 2 mm の値を示した。勿論肉眼的には軌條には何等の變化もなく尙一層大なる軸壓力に耐える様に觀察せられた。

3. 曲線軌道に就ての實驗

軌條の遊間を全く無くして半径 300 m の曲線に敷設した。この時の軌條温度は 4.5°C であつた。その他の軌道の状態は 2. の場合と同様である。約 1 時間 40 分の加熱により軌條温度は $63^\circ \sim 85^\circ\text{C}$ となり軌條挫屈を生じた。第 6 圖がこれである。

第 5 圖

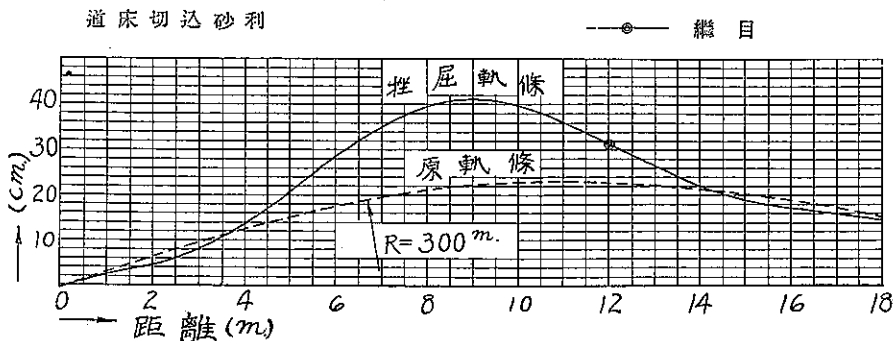


第 6 圖



軌條温度が高まるに従ひ軌條は伸長せんとするが、加壓器を作用せしめて加壓器側軌條端の位置を一定に保ち同時に發生した軌條軸壓力の大きさを測定する事ができた。この結果によると軸壓力 55.1 ton の時に軌條は挫屈した。

第 7 圖 半径 300 m の曲線軌道の軌條挫屈



挫屈軌條の長さは約 12 m で最大張り出し量は 19 cm である。軌條は挫屈を生ずる迄に最大約 3 mm 昂上し最大約 10 mm 曲線外方に向つて移動した。それより軌條の横移動は急速に進行し第 7 圖の様な挫屈になった。

第 3 節 加壓器によつて軸壓を加へ挫屈を生ぜしむる實驗

1. 軸壓を受けた軌道の状態

軌條に加熱して軸壓力を發生せしめ軌條挫屈を生ぜしむる方法は實際の軌道の條件に副ひ最も適正なる實驗であるが、これが施行には多大の装置と時間とを必要とする。多數各種の實驗をこれによつて行ふことには少からぬ困難が伴ふ。

簡単に水平加壓器を作用せしめて軌條軸壓力を加へ挫屈を生ぜしむる方法は軌條止ブロックの重量小で水平壓力によつて大なる移動をなす場合軌道が實際以上に攪亂される恐れがあるが、軌條止ブロックの重量を充分大となし前述の程度となせばこの缺點は可なり除かれ軌條に加熱する場合と餘り異らざる實驗を行ふことが出来る。以下記述する所の總ての實驗はこの方法によつたものである。

軌條は軸壓を受けると上下に昂上降下すると同時に左右に横移動する。降下の量は道床の爲甚だ僅かに止るが、浮上りの量は 20~30 mm に達することがある。軌條軸壓力の小なる時には横移動よりも浮上りの方が大なることが屢々あるが、結局の軌條挫屈は水平方向に起る。軸壓力の小なる時軌條は上下に或は左右に交互に連続して彎曲し不規則の波形を呈することが多いが、軸壓が高まるとその内の 1 部が横移動を急速に増加し軌條挫屈となる。又水平方向の挫屈は軌條に特別のクセが無い限り軌條浮上りの多い所或はその附近に生ずることが多い。

軌條挫屈は最高軸壓の手前 1~2 ton の所から急に進行するものである。最高軸壓の大なる程挫屈の範圍廣くその張出し量大きく急激に挫屈する。

未だ挫屈を受けたることなく眞直なる軌條を適當に敷設した場合には著しく大なる軸壓に耐える。軌條を繰返し挫屈すると軌條は次第に恒久彎曲を増し所謂クセを生じ軸壓力に對する抵抗を著しく減じ挫屈は常にそのクセの部分に起る。この影響は甚しく大であつてクセの部分の道床の枕木被覆量を多少變へ又は枕木配置を變更して其處に生ずる挫屈を防がんとしても挫屈は依然として其處に起る。

軌條繼目は繼目釘と軌條が密著し繼目ボルトがよく締付けられて居るならば軌條挫屈に際して他の部分と何等異なる所はない。繼目ボルトが弛み又は軌條と繼目釘の間に遊隙の多い場合には繼目で多少屈折する。特にこの屈折は軸壓力の小なる場合に目立つて現れる。繼目釘による軌條と軌條との接続が正當に行はれず繼折れのある時などは其處から軌條挫屈が誘發されることが多い。

2. 軌條挫屈の形

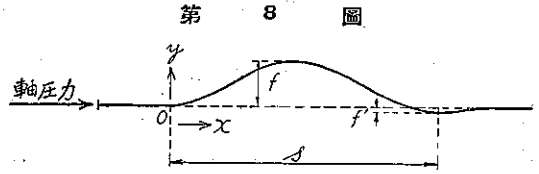
軸圧力を受けた軌條が挫屈する形には大別して次の3種類があるが、最も主要なるものは形Iであつて大多數はこれによる。これに次ぐものは形IIである。曲線軌道の挫屈は殆んど全部形Iにより直線軌道の挫屈は形I-IIIを含むが、依然Iが多くIIIが最も少数である。

(1) 挫屈形I 第8圖の様に軌條が片側にのみ張出す挫屈であつて急曲線軌道の挫屈は皆これである。直線軌道にもこの形の挫屈を多數生ずる。最大張出量を f とするとこれと反対側にも圖の様に f なる少量の張出しを生ずることが多い。挫屈による軌條彎曲の弦を s とし弦の一端を原点とし軌條原位置に沿ふて x を測りそれに直角に張出量 y を測ると大體

$$y = f \sin^2 \frac{\pi x}{s} = \frac{f}{2} \left(1 - \cos \frac{2\pi x}{s} \right)$$

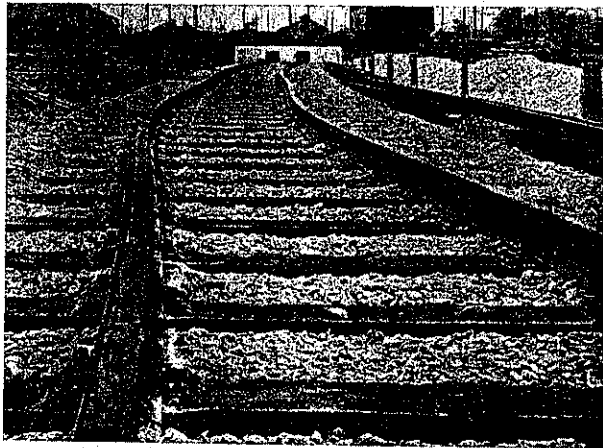
とすることが出来る。

形Iで挫屈した軌條の例を第9,10圖に示す。各の場合の軌道構造及び挫屈状態を表示すると次の様になる。



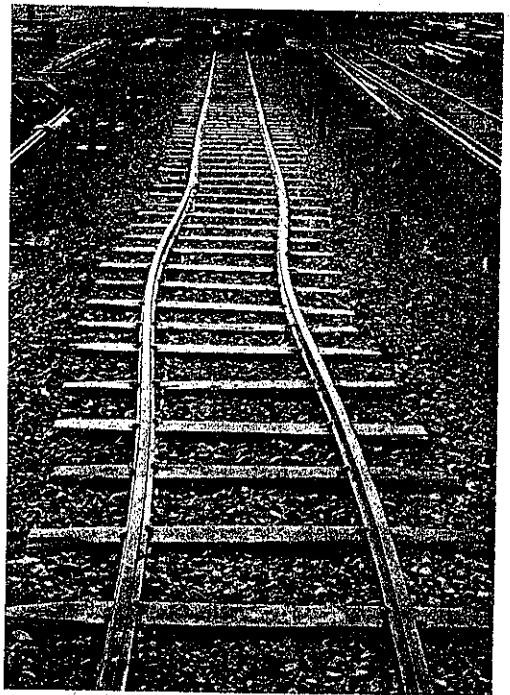
	軌條長さ重量	軌道曲線半径 R	道床砂利	軌條と枕木の締結	挫屈軸圧 P_k	挫屈軌道延長 s	最大張出量	軌條挫屈表の No.
第9圖	24m+24m 50kg	曲線 300m	精選	タイプレート 螺釘	45.6 ton	20.5 m	17 cm	50 kg No. 26
第10圖	20m+20m +8m 30kg	直線	碎石	犬釘	37.5 ton	10m	21 cm	30 kg No. 17

第 9 圖



道床砂利は何れの場合にも枕木上面迄填充された。

第 10 圖



(2) 挫屈形II 第11圖の様に軌道兩側に交互連続して張出す挫屈であつて、直線軌道の挫屈は比較的これが多い。兩側への最大張出量を f_1 及び f_2 とすると兩者略相等しき場合あり、又相當の相違を示すこともある。軌條挫屈が軌道延長 s に亘つて生ずる場合その一端に座標原点を取り張出し量を測

ると大體次の様になる。但し $f_1=f_2=f$ とした。

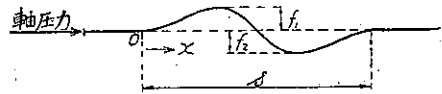
$$y = \frac{f}{1.54} \left\{ \cos \frac{3\pi x}{s} + \sin \pi \left(\frac{3}{2} + \frac{x}{s} \right) \right\}$$

この挫屈形の實例を第 12, 13 圖に示した。各の場合の軌道状態及び挫屈の状態を示すと次の様になる。

	軌條 長さ重量	軌道曲線 半徑 R	道床砂利	軌條と枕 木の締結	挫屈軸壓 P_k	挫屈軌道 延長 s	最大張出 量 f	軌條挫屈 表の No.
第 12 圖	24m+24m 37kg	直線	精選半分 掻出し	犬釘	35ton	18m	18cm	37kg No. 7
第 13 圖	10m+10m +20m+8m 30kg	直線	切込	犬釘	33.4ton	16m	14cm	30kg No. 1

(3) 挫屈形 III 第 14 圖の様に軌條張出しが交互に 3 回繰返すものである。直線軌道で軸壓の大なる時に生ずる形である。この形で挫屈した實例が第 15, 16 圖である。各の場合の軌道構造及び挫屈状態を表示すると次の様になる。

第 11 圖



第 12 圖

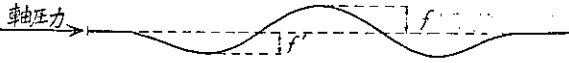


第 13 圖

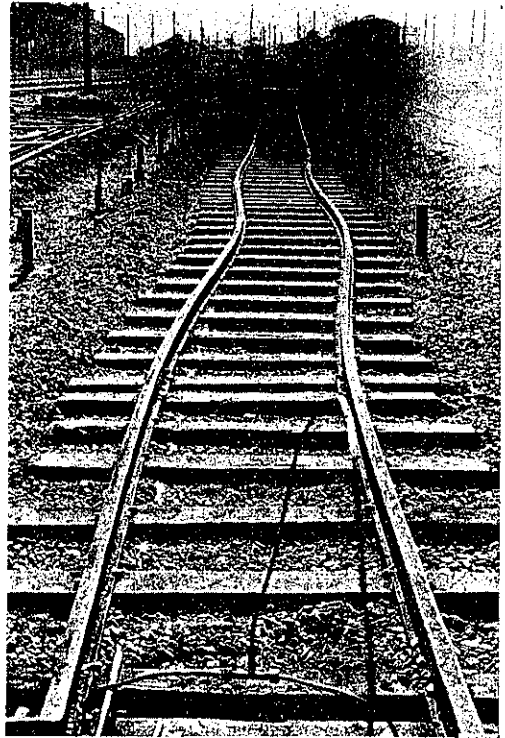


	軌條 長さ重量	軌道曲線 半徑 R	道床砂利	軌條と枕 木の締結	挫屈軸壓 P_k	挫屈軌道 延長 s	最大張出 量 f	軌條挫屈 表の No.
第 15 圖	12m+12m +24m 50kg	直線	切込	犬釘	70.7ton	30m	22cm	50kg No. 21
第 16 圖	4m+10m +10m+24m 37kg	直線	精選半分 掻出し	犬釘	36.9ton	21m	12cm	37kg No. 32

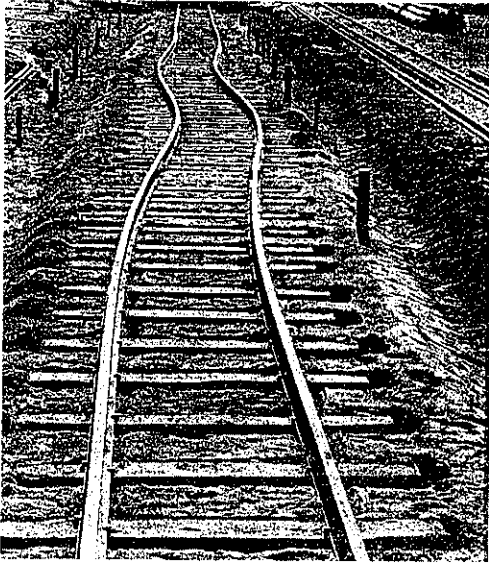
第 14 圖



第 16 圖



第 15 圖



3. 軌條挫屈の實驗の結果

軸壓力を受けた軌條の挫屈は軌道の敷設方法や軌條支承體の状態の外に軌條の性質によつて色々になる。各種構造の軌道に就て軌條挫屈を實驗したが、その内の 2, 3 の挫屈曲線を具體的に第 18 圖に示す。P_k は軌條が挫屈を生じた場合の軸壓で、f は軌條の張出量、s は挫屈軌道の延長である。又 h は挫屈を生じた場合の軌條の最大浮上り量である。軌條の長さは加壓器の側から數へて夫々の軌條長を示した。例へば 12+13+24 は加壓器から 12m 及び 24m 軌條が夫々 12m, 12m, 24m の順に配列されたことを示す。

道床砂利は枕木上面迄填充され或はこれから半分掻出され又は枕木底迄掻出した。而して

全部填充の場合	d=0
半分掻出しの場合	d=7 cm
枕木底迄掻出しの場合	d=14 cm

第 17 圖



とする。(第 17 圖参照)。

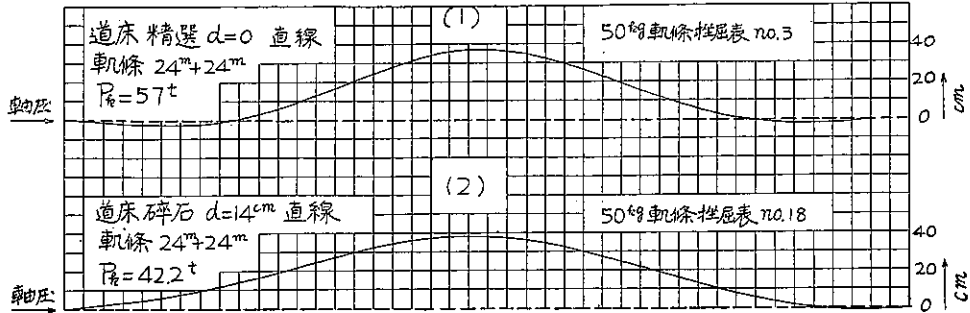
各種の試驗成績を各軌條挫屈表に示した(第 1 ~ 第 3 表)。

實驗に現れた挫屈形の多數は 2. の形 I~III に大體合致するが、それ等の中に位するものも珍しくない。實驗値の整理に際しては斯くの如き中間のものはその最も近き挫屈形の中に入れた。

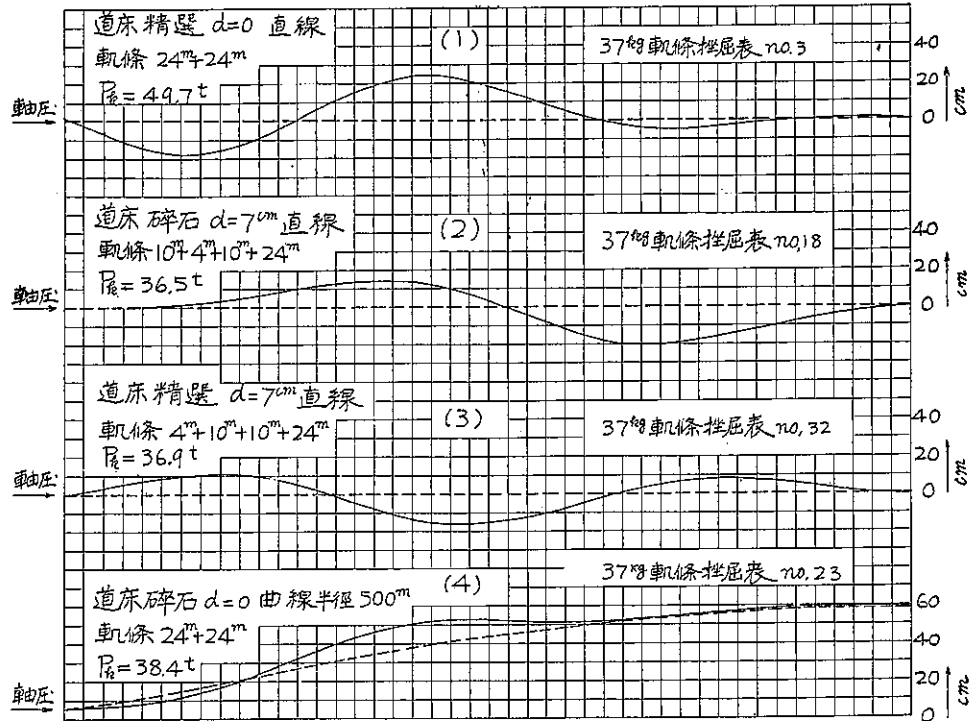
挫屈試驗の結果から見るに軌條の挫屈抵抗には著しき大小の差がある。50 kg 軌條と切込道床を用ひた直線軌道に於て d=0 の時 70.7 ton の軸壓に耐えたるものがある反面に、これと同じ状態に 50 kg 軌條を碎石道床上に用ひた直線軌道に於て軸壓 50.4 ton で挫屈したのものもある。曲線軌道或は 50 kg 軌條外の軌條を敷設した軌道に於て

第 18 圖

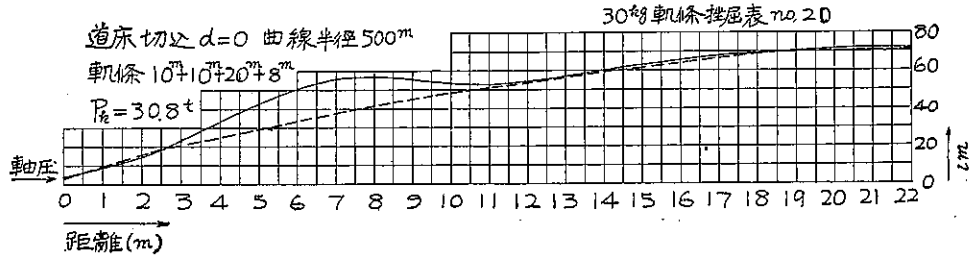
50 kg 軌條の撓曲



37 kg 軌條の撓曲



30 kg 軌條の撓曲



第 1 表 50 kg 軌條挫屈表

試験 番 号	軌 道 状 態				挫 屈 状 態				理 論 上 の 挫 屈					
	直線曲線半徑 R (m)	道床砂利 d (cm)	軌 條 長 (m)	軌條ノ技術ノ 規格	挫屈形	P_k (t)	f (cm)	s (m)	h (mm)	P_k (t)	f (cm)	s (m)	$P_k - P_0$ (t)	使用シテ P_k/f_0 曲線
1	直	切込 d=0	12+12+12+12	大釘	I	70.3	48	16	15	70.3	51	17.2	26.9	43. SK1
2	曲	切込 d=0	12+12+24	大釘	I	57.2	15.5	13	5	37.2	16	15	2.1	43. CSK1
3	直	精選 d=0	24+24	大釘	I	57.0	37	15	12	57.0	35.6	14.7	9.0	43. SR1
4	直	精選 d=0	24+24	大釘	I	56.2	34	14	6	56.2	34.8	14.6	8.2	43. SR1
5	直	精選 d=0	12+12+24	たいぶれ-と螺釘	I	53.2	24	14	10	53.2	31.4	14.2	5.2	43. SK1
6	直	精選 d=7	24+24	たいぶれ-と螺釘	II	49.4	18	26	9	49.4	26.2	27.8	14.9	44. SB2
7	直	精選 d=7	24+24	大釘	II	49.4	24	25	8	49.4	26.2	27.8	14.9	44. SB2
8	直	精選 d=7	12+12+24	たいぶれ-と螺釘	I	57.8	35	18	4	57.8	48.6	19.4	21.3	43. SR2
9	曲	精選 d=0	24+24	たいぶれ-と螺釘	I	57.0	35.6	17	13	57.0	34.6	16	14.3	43. CS R1
10	曲	精選 d=0	24+24	大釘	I	56.6	35	18	6	56.6	34.2	18.3	15.9	43. CS R1
11	曲	精選 d=0	24+24	大釘	I	50.2	26	15	5	50.2	28	15.1	7.5	43. CS R1
12	直	碎石 d=0	24+24	大釘	I	65.4	36	14.5	20	65.4	39.4	14.5	15.4	43. SB1
13	直	碎石 d=0	24+24	大釘	I	55.9	35	14	24	55.9	30	13.4	5.9	43. SB1
14	直	碎石 d=0	12+12+24	大釘	I	64.6	41	15	33	64.6	38.6	14.8	14.6	43. SB1
15	直	碎石 d=0	12+12+24	大釘	I	50.4	26	15	13	50.4	21	12.2	0.4	43. SB1
16	直	碎石 d=7	24+24	大釘	I	50.5	35	17	10	50.5	34.2	15.7	7.5	43. SB2
17	直	碎石 d=7	12+12+24	大釘	I	58.8	18	15	8	45(P _k)	20	13.5	-4.2	43. SB2
18	直	碎石 d=14	24+24	大釘	I	42.2	38	20	13	42.2	37.6	19.3	9.5	43. SB3
19	直	碎石 d=14	12+12+24	大釘	I	27.7	20	16	4	33.7(P _k)	19	15.9	-5.0	43. SB3
20	曲	碎石 d=0	24+24	大釘	I	54.3	24	14	25	54.3	29	14.5	7.8	43. CS B
21	直	切込 d=0	12+12+24	大釘	III	70.7	22	30	11					
22	直	切込 d=7	12+12+24	大釘	III	46.7	16.5	31	8					
23	曲	切込 d=7	12+12+24	大釘	I	22.0	18	14	4					
24	直	精選 d=14	24+24	たいぶれ-と螺釘	II	34.9	18	26	30					
25	曲	精選 d=7	24+24	たいぶれ-と螺釘	I	33.0	14	17	13					
26	曲	精選 d=0	24+24	たいぶれ-と螺釘	I	45.6	20.5	17	45					
27	曲	精選 d=7	24+24	たいぶれ-と螺釘	I	24.7	9.0	17	7					
28	曲	精選 d=14	24+24	たいぶれ-と螺釘	I	19.4	9.6	18	6					
29	曲	碎石 d=7	24+24	大釘	I	24.6	10.2	14	5					
30	曲	碎石 d=14	24+24	大釘	I	19.8	10	15.5	3					

P_k : 挫屈軸距 (t)
 f : 最大弧出の量 (cm)
 s : 挫屈ノ長さ (m)
 h : 軌條最大浮上ノ (mm)
 P_0 : 理論上ノ最低挫屈軸距 (t)

第 2 表 37 kg 軌條挫屈表

試験 番 号	軌 道 状 態				挫 屈 状 態				理 論 上 の 挫 屈				
	直線曲線半徑 R (m)	道床砂利 d (cm)	軌 條 長 (m)	挫 屈 形	P_k (t)	f (cm)	s (m)	h (mm)	P_k (t)	f (cm)	s (m)	$P_k - P_0$ (t)	使用シテ P_k/f_0 曲線
1	直	切込 d=0	24+24	I	48.6	38	15	10	48.6	36.2	13.7	11.4	43. SK1
2	直	切込 d=7	24+24	I	40.0	36	14	7	40.0	39	16.9	11.0	43. SK2
3	直	精選 d=0	24+24	II	49.7	21	16	15	49.7	22.5	19.7	11.9	44. SR1
4	直	精選 d=0	4+10+10+24	II	37.0	24.5	20	11	37.0	26.6	21	19.2	44. SR1
5	曲	精選 d=0	4+10+10+24	I	58.0	20	12	6	58.0	20.2	12.7	3.6	43. CS R1
6	曲	精選 d=0	4+10+10+24	I	34.1	24	12.5	10	34.1	21.8	12.9	4.7	43. CS R1
7	直	精選 d=7	24+24	II	35.0	18	18	2	35.0	19	22.2	6.0	44. SR2
8	直	精選 d=7	4+10+10+24	I	23.2	8	12.5	6	24.6 (P _k)	8.7	13.5	-1.4	43. CS R2
9	直	精選 d=14	24+24	I	16.3	15	11	1	24.3 (P _k)	15.5	14	-8.0	43. CS R3
10	直	精選 d=14	4+10+10+24	I	31.5	38	15	4	31.5	33.2	13.3	7.2	43. SR3
11	曲	精選 d=14	4+10+10+24	I	14.4	8	14	7	18.0 (P _k)	6	15.3	-3.6	43. CS R3
12	曲	精選 d=0	24+24	I	25.8	8	10	6	34.4 (P _k)	10.8	11.1	-8.6	43. CS R1
13	曲	精選 d=7	24+24	I	18.6	8	11	4	24.6 (P _k)	8.7	13.5	-6.0	43. CS R2
14	曲	精選 d=14	24+24	I	14.4	8	12	3	18.0 (P _k)	6	15.3	-3.6	43. CS R3
15	直	碎石 d=0	10+4+10+24	I	51.3	35	15	17	51.3	32.7	12.1	8.5	43. SB1
16	直	碎石 d=0	24+24	II	38.0	10	13	11	40.6 (P _k)	10.7	15.2	-2.6	44. SB1
17	直	碎石 d=7	10+4+10+24	II	58.8	19	21	13	38.8	18.2	20.	5.3	44. SB2
18	直	碎石 d=7	10+4+10+24	II	36.5	17	20	10	36.5	15.9	19.1	3.0	44. SB2
19	直	碎石 d=7	10+4+10+24	II	54.0	17	19	9	34.0	12.8	18	0.5	44. SB2
20	曲	碎石 d=0	24+24	I	50.2	11	8	14	50.2	30.8	12.7	11.4	43. CS B1
21	曲	碎石 d=0	24+24	I	44.5	14	8	10	44.5	24.4	11.9	5.7	43. CS B1
22	曲	碎石 d=0	24+24	I	36.5	13	10	8	38.8 (P _k)	14	10.6	-2.3	43. CS B1
23	曲	碎石 d=0	24+24	I	38.4	14	11	15	38.8 (P _k)	14	10.6	-0.4	43. CS B1
24	曲	碎石 d=0	10+4+10+24	I	39.9	18	12	12	39.9	19.2	11.9	2.5	43. CS B1
25	曲	碎石 d=0	24+24	I	36.9	15	11	9	37.4 (P _k)	12.4	10.8	-0.5	43. CS B1
26	曲	碎石 d=7	24+24	I	26.2	14	13	10	24.5 (P _k)	10.6	12.7	-3.5	43. CS B2
27	曲	碎石 d=7	10+4+10+24	I	25.1	11	12	7	24.5 (P _k)	10.6	12.7	-4.4	43. CS B2
28	曲	碎石 d=14	24+24	I	19.0	11	14	10	20.4 (P _k)	6	14.2	-1.4	43. CS B3
29	曲	碎石 d=14	24+24	I	15.6	11	13	8	20.4 (P _k)	6	14.2	-4.8	43. CS B3
30	曲	碎石 d=14	24+24	I	16.7	10	14	5	20.4 (P _k)	6	14.2	-3.7	43. CS B3
31	曲	碎石 d=14	10+4+10+24	I	15.2	9	15	6	20.4 (P _k)	6	14.2	-5.2	43. CS B3
32	直	精選 d=7	4+10+10+24	III	36.9	12	21	3					
33	曲	精選 d=0	10+4+10+24	I	34.2	14	10	10					
34	曲	精選 d=7	10+4+10+24	I	28.5	12	10	5					
35	曲	碎石 d=7	24+24	I	26.2	12	11	12					
36	曲	碎石 d=14	24+24	I	16.0	13	13	10					
37	直	碎石 d=14	10+4+10+24	II	24.7	11	18	8					

P_k : 挫屈軸距 (t)
 f : 最大弧出の量 (cm)
 s : 挫屈ノ長さ (m)
 h : 軌條最大浮上ノ (mm)
 P_0 : 理論上ノ最低挫屈軸距 (t)

第 3 表 30 kg 軌條挫屈表

試験 番號	軌道状態			挫屈状態				理論上ノ挫屈					
	直線曲率半径 R (m)	道床砂利 d (cm)	軌條長 (m)	挫屈形	P_k (t)	f (cm)	s (m)	h (mm)	P_k (t)	f (cm)	s (m)	$P_k - P_b$ (t)	使用シテ 曲線
1	直	切込 d=0	10+10+20+8	II	33.4	14	16	6	33.4	15.8	17.1	4.0	44. SK1
2	直	切込 d=7	10+10+20+8	II	33.4	20	20	3	33.4	22.8	23.4	11.7	44. SK2
3	直	精選 d=0	20+20+8	II	31.2	11	14	3	32.0 (P _b)	10	14.4	-0.8	44. SR1
4	直	精選 d=0	20+20+8	I	33.6	18	10	10	33.6	16.2	9.8	0	43. SR1
5	直	精選 d=0	20+20+8	I	31.2	16	9	5	33.6 (P _k)	16.2	9.8	-2.4	43. SR1
6	直	精選 d=0	20+20+8	I	35.0	18	9	5	35.0	22	10.5	1.4	43. SR1
7	直	精選 d=0	20+20+8	I	39.1	29	11	7	39.1	28.2	11.2	4.6	43. SR1
8	直	精選 d=0	20+20+8	II	31.2	10	14	3	32.0 (P _b)	9.5	14.2	-0.8	44. SR1
9	直	精選 d=7	20+20+8	I	26.5	17	11	1.5	26.5	20	12	0.8	43. SR2
10	直	精選 d=14	20+20+8	I	20.9	18	11.5	2	20.9	16	13.1	0.1	43. SR3
11	曲 R=500	精選 d=0	20+20+8	I	33.3	19	11	10	33.3	23.4	11.4	4.3	43. CSR1
12	曲 R=300	精選 d=0	20+20+8	I	22.8	11	9	6	31.0 (P _k)	13	10	-0.2	43. CSR1
13	曲 R=300	精選 d=7	20+20+8	I	26.6	20	13	4	26.6	22	13.8	4.0	43. CSR2
14	曲 R=300	碎石 d=0	20+20+8	I	35.7	20	11	18	35.7	21	11	4.0	43. CSB1
15	曲 R=300	碎石 d=7	20+20+8	I	20.9	10	11	8	25.0 (P _k)	10	10.9	-4.1	43. CSB2
16	曲 R=300	碎石 d=14	20+20+8	I	13.5	11	12	8	17.6 (P _k)	7	13	-4.1	43. CSB3
17	直	碎石 d=0	20+20+8	I	37.5	21	10	3	37.5	22	10	1.5	43. SB1
18	直	碎石 d=7	20+20+8	I	33.0	26.5	13	14	33.0	23	11.8	3.5	43. SB2
19	直	碎石 d=14	20+20+8	I	24.0	23	14.5	6	24.0	22	13.6	1.5	43. SB3
20	曲 R=500	切込 d=0	10+10+20+8	I	30.8	18	10	5					
21	曲 R=500	切込 d=7	10+10+20+8	I	23.6	17	12.5	3					
22	曲 R=300	切込 d=0	10+10+20+8	I	27.4	18	11	13					
23	曲 R=300	切込 d=7	10+10+20+8	I	15.6	13	12.5	4					
24	曲 R=500	精選 d=14	20+20+8	I	17.5	14	13	3					
25	直	碎石 d=0	20+20+8	III	46.0	15.5	23	8					
26	直	碎石 d=0	10+10+20+8	III	46.0	17.5	24	6					
27	直	碎石 d=7	10+10+20+8	III	26.6	8.6	21	5					
28	曲 R=500	碎石 d=0	10+10+20+8	I	33.4	19	10.5	7					
29	曲 R=500	碎石 d=7	10+10+20+8	I	23.4	12	10	4					

P_k : 挫屈軸壓 (t)
 f : 最大損出シ量 (cm)
 s : 挫屈ノ延長 (m)
 h : 軌條最大浮上リ (mm)
 P_b : 理論上ノ最低挫屈軸壓 (t)

も常に斯る變化は見られる。要するに斯る變化は軌條の繰返し挫屈に原因する所甚だ大で軌條が未だ挫屈されたことなく或は挫屈されても充分精密に矯正された場合には挫屈軸壓は甚だ高い。例へば 50 kg 軌條の No. 1 の 70.3 ton, No. 21 の 70.7 ton, No. 12 の 65.4 ton, No. 8 の 57.8 ton, 37 kg 軌條の No. 1 の 48.6 ton, No. 2 の 40 ton, No. 3 の 49.7 ton, No. 4 の 57 ton, No. 20 の 50.2 ton, 30 kg 軌條の No. 2 の 33.4 ton, No. 25 及び No. 26 の 46 ton の如きこれである。24 m の 50 kg 新軌條を初めて精選砂利道床の直線軌道に敷設し軸壓を加へた時は軸壓 55 ton に對しても軌條は 3~4 mm の浮上り又は左右移動を示すに過ぎなかつた。

挫屈軌條の挫屈曲率半径は甚しく小となる。この爲に挫屈後の軌條には恒久的の撓みが残る。これは挫屈軸壓の大なる場合程甚しい。挫屈形 II の場合には曲率半径の特に小なるものがある。挫屈曲率半径は挫屈曲線測定値から直接求めることができる。2, 3 の場合に就て最小曲率半径を求めて次に示す。挫屈軸壓が相當大なる場合には何れも 20 m~30 m である。又挫屈曲率半径は f 及び s の測定値を用ひ

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{1}{R}$$

から求めることができる。然して形 I であれば $x = \frac{s}{2}$, 形 II であれば $x = 0.3s$ に於て最小曲率半径が見られるからこれを R_m とすると

$$R_m = 0.05 \left(\frac{s^2}{f} \right) \quad \text{形 I の場合}$$

$$R_m = 0.017 \left(\frac{s^2}{f} \right) \quad \text{形 II の場合}$$

となる。 f, s から R_m を求めて第 4 表に示し直接の測定値と比較した。

第 4 表

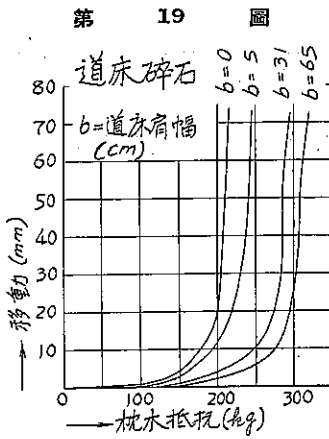
軌條挫屈表 番 號	$P_k(\text{ton})$	挫 屈 形	挫屈曲線から 求めた最小曲 率半徑 (m)	$f(\text{cm})$	$s(\text{m})$	f から求めた 最小曲率半徑 $R_m(\text{m})$
50 kg No. 3	57.0	I	29	37	15	30.8
50 kg No. 14	64.6	I	27	41	15	27.8
37 kg No. 1	48.6	I	26	38	13	22.5
37 kg No. 3	49.7	II	20	21	16	20.8
37 kg No. 4	57.0	II	23	24.5	20	27.8
37 kg No. 15	51.3	I	22	33	13	25.9
30 kg No. 1	33.4	II	24	14	16	31.1
30 kg No. 21	30.8	I	26	18	10	28.0

第 4 節 軌條挫屈に關係する定數の測定

1. 枕木がその長さの方向に移動する時の道床抵抗力

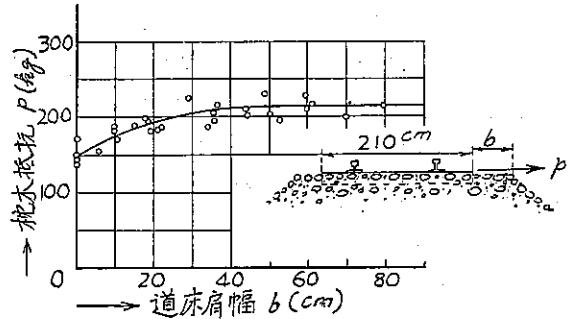
道床に敷設された枕木がその長さの方向即ち軌道中心線に直角方向に移動する時の抵抗力は枕木の形状道床の形状品質によつて種々の値を示す。

枕木の長さに沿ふて力を加へ枕木を横に引き出し枕木移動と横引力或は枕木抵抗との關係を實測した一例が第 19 圖である。

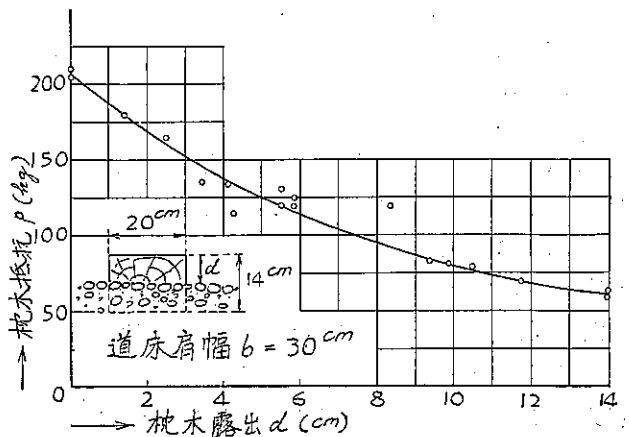


道床肩幅は 0~65 cm とした。移動 5 mm 位迄は横引力の大きさに對する移動の量は小であるが、それを越えて 5~15 mm の移動は僅かに 40~50 kg の横引力増加の爲に生ずる。それ以上の移動は極く僅少の横引力増加の爲にも著しく進行し大體 40~100mm の間に於て枕木は最大抵抗力を示す。この最大抵抗力は道床肩幅の大小によつて可なりの差を示した。又

第 20 圖 切込道床の肩幅と枕木抵抗



第 21 圖 切込道床に於ける枕木の露出程度と枕木抵抗



枕木が道床中から露出する程度によつても大いに異なる。

枕木最大抵抗力は前述した様に移動 100 mm 以下の場合に見られる。この値を p とし各種各様の道床に就てその値を求めて見た。第 20 圖は枕木を切込道床中に全部埋め道床肩幅 b を 0~80 cm に變化せしめた時の最大抵抗力 p を實測したもので、第 21 圖は切込道床の肩幅を $b=30$ cm に一定し枕木露出量 d を 0~14 cm に變へた時の p を測定した結果である。肩幅 b が 0 から増加するに従つて抵抗 p は増加するが、 p が約 40~45 cm 以上になると b の變化に關係なく p は一定の値になる。従つてこれ以上の肩幅は不必要である。 $b=0$ の場合の最大抵抗力を p_0 とし $b=41\sim 45$ cm 以上の場合の最大抵抗力を p_m とするとその大きさは約次の様になる。

	p_0 (kg)	p_m (kg)
切込道床	150	215
精選道床	175	250
碎石道床	200	300

又 $b=30$ cm とし枕木上面迄道床砂利を填充した場合 ($d=0$) 枕木厚さの半分を道床中から露出せしめた場合 ($d=7$ cm) 及び枕木全部を道床中から露出せしめた場合 ($d=14$ cm) に就て測定した最大抵抗力は次表の様であつて枕木露出量の大となるに従つて抵抗力を激減する。

枕木最大抵抗力 (kg)

	$d=0$ の時	$d=7$ cm の時	$d=14$ cm の時 (p_0)
切込道床	205	108	60
精選道床	242	126	73
碎石道床	285	182	92

枕木移動に對する抵抗は枕木底に受くる抵抗 p_b と枕木兩側面に受くる抵抗 p_s 及び枕木端に受くる抵抗 p_e からなる。各種道床に於ける p_b の値は上表に掲げた。

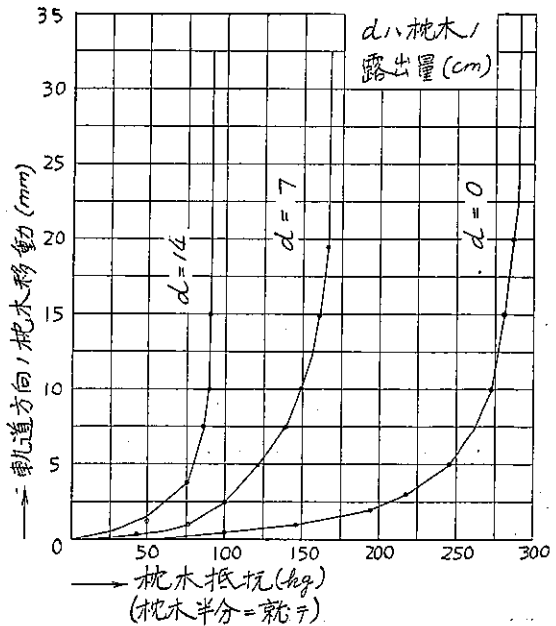
而して $p_0 = p_b + p_s$ であるから p_s は直ちに求められる。道床肩幅が充分大なる場合には枕木端による抵抗力 p_e は $p_e = p_m - p_0$ である。斯る場合の $p_b, p_s, p_e = p_m - p_0$ を表示すると次の様になる。

	枕木底の抵抗 p_b (kg)	枕木兩側面の抵抗 p_s (kg)	枕木端の抵抗 $p_e = p_m - p_0$ (kg)
切込道床	60	90	65
精選道床	73	102	75
碎石道床	92	108	100

p_b, p_s, p_e の内枕木兩側面から受ける抵抗 p_s が最大である。従つて枕木と枕木の間に挟まれる道床を強固に填充することは軌道上構横移動を防止する上にも甚だ有效である。

斯様に枕木がその長さの方向に移動する際の抵抗力 p が測定されたから軌道上構横移動に對する道床の抵抗力 g は直ちに求められる。即ち a を枕木中心間隔

第 22 圖 軌道方向に於ける枕木抵抗 (碎石道床)



とすれば各軌條に就て

$$g = \frac{p}{2a} \text{ (kg/cm)}$$

である。

2. 枕木が軌道方向に移動する時の道床抵抗力

(1) 普通枕木の抵抗力 24 m の軌條に普通枕木 36 挺を配置し一方の軌條端に軸壓力を加へ軌道方向への枕木移動と軸壓力の大きさの關係を實測した。第 22 圖は碎石道床に於ける抵抗の測定結果である。

枕木の最大抵抗力は一般に 20~25 mm 以上の移動を生じたときに見られる。測定したこの最大抵抗を(r)とする。枕木 1 挺の最大抵抗は $2(r)$ である。(r) の値は約次の様になつた。

	(r) の値 (kg)		
	$d=0$ の時	$d=7$ cm の時	$d=14$ cm の時
切込道床	215	110	—
精選道床	260	140	60
碎石道床	290	165	90

軌道方向に於ける枕木の移動が約 20 mm より小なる場合には枕木抵抗力は前述の (r) より小である。この抵抗を一般に r として r による枕木移動を δ とすると δ が約 20 mm より小なる場合には

切込道床	$\delta \propto r^4$
精選及碎石道床	$\delta \propto r^3$

と見做すことができる。

(2) 軌條と枕木との摩擦抵抗力 軌條が枕木に犬釘又は螺釘を以つてよく締めつけられて居るならば軌條軸壓力が大になり軌條が匱進せんとしても軌條と枕木の間には滑動を生ずることなく兩者は一體となり道床上を移動する。軌條が犬釘 2 本を以つて 1 枕木によく締めつけられて居る時軌條と枕木の間には滑動を生ぜしむるに要する軌條軸壓力を測定したるに 2100 kg に達した。又螺釘 2 本を以て締めつけた時兩者の間に滑動を生ぜしむるに要する軌條軸壓力を測定したるに螺釘を締めるトルクの大小によつて異なるが

トルク 20 kg m の時	2500 kg
トルク 30 kg m の時	3600 kg

となつた。

(3) 杭打の影響 枕木 2 つ切の杭を打つて軌道上構の匱進を阻止せんとする時の杭の抵抗力を測定した。連続した 10 m 軌條の各に 1~4 本或は 24 m 軌條に 5 本の割合を以つて匱進止杭打をなし軌條軸壓力に對する匱進量を測定し、これと杭打を全然行はない時の測定値との差を出し、杭 1 本の抵抗力とその移動量との關係曲線を求めた。これによると移動約 40 mm 以上に於て杭 1 本の抵抗力は 1~2 ton の間にある。移動 10 mm 附近の場合には 0.8~1 ton である。この杭の影響は杭の分布状態によつて多少異なる。一般に軌道の長さに沿ひなるべく均等に分布した場合に於てその効果稍大である。

3. 軌條止コンクリート・ブロックの移動

軌條止コンクリート・ブロック I はその全重量約 175 ton であつて II は約 140 ton である。加壓器によつて軌條軸壓力を加へると軌條止ブロックは僅かに後退する。その移動量は略軌條軸壓力に比例し軌條軸壓力を除くと略原位置に戻る。ブロック I に加はる軌條軸壓力を P_1 、それによるブロックの移動量 ϵ_1 、ブロック II に加はる

條軌壓力を P_2 、それによるブロックの移動量を ξ_2 とし軌條軌壓力 40~60 ton の場合を標準にとると相互の関係は次の様になる。

$$\begin{aligned} \text{ブロック I} \quad \xi_1 &= K_1 P_1 = 16 \times 10^{-6} P_1 & K_1 &= 16 \times 10^{-6} \\ \text{ブロック II} \quad \xi_2 &= K_2 P_2 = 22 \times 10^{-6} P_2 & K_2 &= 22 \times 10^{-6} \\ \xi_1, \xi_2 (\text{cm}) & & P_1, P_2 (\text{kg}) & \end{aligned}$$

4. 繼目ボルトの緊締程度と繼目の摩擦抵抗力 (R)

軌條と繼目鉸の間の摩擦抵抗力 (R) は兩者の接觸状態に應じ可なりの範圍に互つて變化するがボルト・ナットを緊定するトルク T の大小によつて著しくその値を異にする。

大釘を抜き上げて軌條と軌條支承體の間の摩擦抵抗力を除去し、種々の大きさのトルク T で緊締された多數の 4 本ボルトの PS 50 kg 及び A.S.C.E. 37 kg 軌條繼目を準備し、これに軌條軌壓力を加へて軌條と繼目鉸の間に滑動が生ずる時を觀測し T と (R) の關係を實驗的に求めた。 2θ をボルトネジ部分のネジヤマの頂角、 μ_0 をボルト及びナットの接觸面間の摩擦係數、 d をネジの平均直徑、 $\frac{d_n}{2}$ をボルト中心からナットとロック・ナット又は繼目鉸の接觸面の中心迄の距離とし

$$\mu_1 = \frac{\mu}{\cos \theta}, \quad \mu_2 = \mu_0 \frac{d_n}{d}, \quad \tan \lambda = \mu_1 + \mu_2$$

又 p をネジの歩み、 n を 1 つの繼目に用ふるボルトの數、 α を軌條及び繼目鉸の接觸面がボルト軸となす角、 μ を軌條と繼目鉸の接觸面の摩擦係數とすれば

$$R_0 = \frac{2 \left[1 - \frac{p}{\pi d} (\mu_1 + \mu_2) \right]}{d(\mu_1 + \mu_2) + \frac{p}{\pi}} \quad (R) = \frac{n \mu R_0 T}{\sin \alpha}$$

である*。

實驗値も明に (R) が T に正比例することを示した。實驗に供した諸材料の寸法を取入れ $\mu = 0.3$ として計算するに殆んど總ての測定値は

$$\mu_0 = 0.2 \sim 0.3$$

の間にある。

ボルト張力 P は $P = R_0 T$ であるがこれ等に關する實驗も既に施行され發表された*。

5. 軌條と枕木を締結する影響

軌條と枕木を強固に締結すれば軌道上構は横推力に對しラーメンとしての強度を附加さるべきである。10 m の 37 kg 軌條に枕木 15 挺を配した軌道上構を組立て、この兩端を 2 つの支臺に架け渡し中央に横推力を加へ撓みを測定した。枕木は全部新品でこれに新しい大釘を打込んだ。大釘を使用した締結としては恐らく最も強固なるものである。測定結果を見るに横推力を加へこれを除去した後も締結部の摩擦力のために恒久撓みを生じたが横推力 500 kg で約 3.4 cm の撓みを生じた。即ち軌條 1 本に就て云ふと 250 kg で 3.4 cm の撓みを生じたことになる。

次に軌道上構を解き軌條 1 本を單獨に兩支臺に架け渡しその徑間中央に横推力を加へ撓みを測定した。100 kg の横推力で約 4.4 cm の撓みを生じた。

軌條長を l 、横推力を Q 、彎曲剛率を EJ とし、單獨軌條の撓みを Δ とすると

* 鐵道省業務研究資料第 19 卷第 21 號 (昭和 6 年 5 月 25 日)。

$$d = \frac{Ql^3}{48 EJ}$$

實驗の結果によると $\frac{Q}{d} = 22.7 \text{ kg/cm}$ であるから $l = 10 \text{ m}$ とすると

$$EJ = 4.73 \times 10^8 \text{ kg/cm}^2$$

軌條と枕木を締結する時軌條が彎曲せんとすると枕木と軌條との交りが直角でなくなるから第 23 圖に示す様に締結部に M なる抵抗力率が作用する。 Q による徑間中央の軌條彎曲率を M_0 とする。又抵抗力率 M による徑間中央の彎曲率を M_1 とすると

$$M_0 = \frac{Ql}{4}, \quad M_1 = 7M$$

であつて

$$d = \frac{l^2}{12 EJ} M_0$$

組立てた軌道上構の撓みを δ とすると

$$\delta = \frac{l^2}{12 EJ} (M_0 - M_1) = \frac{l^2}{12 EJ} \left(\frac{Ql}{4} - 7M \right)$$

即ち
$$M = \frac{1}{7} \left(\frac{Ql}{4} - \delta \frac{12 EJ}{l^2} \right)$$

である。實驗の結果として

$$EJ = 4.73 \times 10^8$$

$$Q = 250 \text{ kg} \text{ に対し } \delta = 3.4 \text{ cm}$$

を入れると
$$M = 6170 \text{ kg cm}$$

である。

この程度の抵抗力率は恐らく犬釘使用の場合の最大値であらう。犬釘が強固に締められてない時には δ はこれより遙かに大で M は著しく小となる。實際の軌道によく見られる様に弛緩して居る時には M は零とする方が事實に近い。

第 5 節 軌條挫屈實驗値の理論的考察

1. 軌條挫屈の理論

(1) 軌條軸壓と移動 軌條止ブロックは彈性支體と考へることが出来、一般に P なる軌條軸壓力の爲に生ずる水平移動を生ずるものとすれば

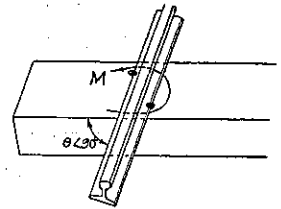
$$\xi_1 = K_1 P_1 \text{ (ブロック I に就て)}$$

$$\xi_2 = K_2 P_2 \text{ (ブロック II に就て)}$$

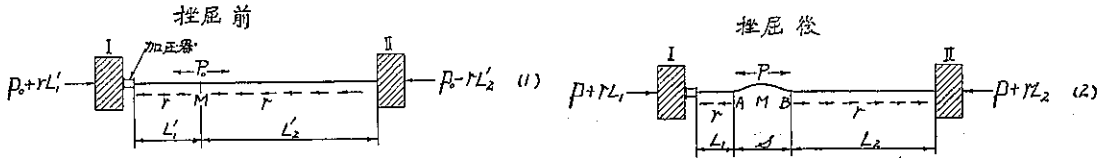
の関係があることは既に第 4 節 3. で述べた。

加壓器によつて軌條に軸壓力を加へ、加壓器前面及びブロック II の前面から夫々 L_1' 及び L_2' の距離にある断面 M の軸壓力が P_0 になつたとする。然る時は軌條と軌條支承體の間の抵抗力 r の爲にブロック I の受ける壓力は $P_0 + rL_1'$ 、ブロック II の受ける壓力は $P_0 - rL_2'$ となる(第 24 圖(1) 参照)。断面 M を中心としてその前後 $\overline{AB} = s$ に互つて挫屈を生じ其の軸壓力が P になつたとすれば、第 24 圖(2) に示す様にブロック I の受ける壓力は $P + rL_1$ 、ブロック II の受ける壓力は $P + rL_2$ となる。 P_0 又は P に比して r の影響は甚だ小で且

第 23 圖



第 24 圖



又 $L_1 + L_2$ に比して s は小であるから簡單の爲に $L_1' = L_1, L_2' = L_2$ として取扱ふことにする。M に於る軸壓力 P_0 が軌條挫屈の結果 P になつたとすれば軌條は伸びブロック I 及び II は移動する。ブロック I 及び II の移動を夫々 d_1 及び d_2 とし、長さ L_1 及び L_2 なる軌條の伸びを夫々 e_1 及び e_2 とすれば軌條挫屈部分の兩端 A 及び B の移動した距離 z_1 及び z_2 は次の様になる。

$$\begin{aligned}
 & \text{I-A 間} & \text{II-B 間} \\
 & d_1 = K_1(P_0 - P) & d_2 = K_2(P_0 - P - 2rL_2) \\
 & e_1 = \frac{P_0 - P}{EF} L_1 & e_2 = \frac{P_0 - P - rL_2}{EF} L_2 \\
 & z_1 = d_1 + e_1 = \delta(EFK_1 + L_1) & z_2 = d_2 + e_2 = \delta(EFK_2 + L_2) - r \left(2K_2 + \frac{L_2}{EF} \right) L_2 \dots (1)
 \end{aligned}$$

但し E : 軌條鋼のヤング係數
 F : 軌條斷面積
 $\delta = \frac{P_0 - P}{EF}$

平衡軸壓 P と z_1 又は z_2 の關係は (1) 式から

$$\left. \begin{aligned}
 P(z_1) &= P_0 - \frac{z_1}{K_1 + \frac{L_1}{EF}} \\
 P(z_2) &= P_0 - \frac{z_2 + r \left(2K_2 + \frac{L_2}{EF} \right) L_2}{K_2 + \frac{L_2}{EF}}
 \end{aligned} \right\} \dots (2)$$

軌條が挫屈する時、軸壓は P_0 から P になり A 及び B は z_1 及び z_2 の移動を爲し且道床抵抗力又は軌道上構の自重に反して軌條は彎曲し張り出す。従つて挫屈軌條 A-B の平衡を假想仕事の原理から求める爲に次の 5 つの仕事量を考へる。

- 軌條伸びの仕事量 A_e
- AB の移動の仕事量 A_d
- 軌條彎曲の仕事量 A_b
- 軌條横移動又は浮上りの仕事量 A_g
- 軌條枕木締結部に於る抵抗の仕事量 A_f

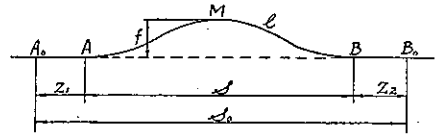
この外 A-B 部分の軌條伸びに相當する軌條匱進の仕事量もあるが、これは A_g に伴ふものでその影響も甚だ小であるから考慮しない。

(2) 挫屈形 I の場合

A_c の値

第 25 圖(A)に示す様に軸圧力が P_0 であつた時の A_0 及び B_0 が挫屈して軸圧力が P になつた時 A 及び B に移動したとする。

第 25 圖 (A)



即ち

$$\overline{A_0A} = z_1, \quad \overline{B_0B} = z_2$$

である。

$$\overline{A_0B_0} = s_0, \quad \overline{AB} = s$$

とし AB 間の挫屈軌條の長さを l とする。軌條が曲線である時には z_1, z_2, s_0, s 等は皆曲線に沿ふて測る。然る時は

$$A_c = P_0 s \vartheta - \frac{EF}{2} s \vartheta^2 \dots \dots \dots (3)$$

A_a の値は

$$A_a = -\frac{EF}{2} \{ EF(K_1 + K_2) + L_1 + L_2 \} \vartheta^2 + P_0 \{ EF(K_1 + K_2) + L_1 + L_2 \} \vartheta - rL_2 \left(2K_2 + \frac{L_2}{EF} \right) \left\{ P_0 + \frac{rL_2 \left(2K_2 + \frac{L_2}{EF} \right)}{2 \left(K_2 + \frac{L_2}{EF} \right)} \right\} \dots \dots \dots (4)$$

A_b の値は坐標点を A に取り挫屈前の軌條中心線に沿ふて x を測り、軌條の最大張出し量を f とすれば軌條が曲線形に矯正されて敷設された場合には挫屈の爲に新に爲されたる彎曲の仕事量であつて

$$A_b = \pi^4 EJ \frac{f^2}{s^3} \dots \dots \dots (5)$$

但し J は軌條断面二次率

A_g の値は軌道上構の横移動に對する軌條單位長當りの抵抗力又は軌道上構の軌條單位長當り重量を g とすれば

$$A_g = \frac{1}{2} g s f \dots \dots \dots (6)$$

A_f の値は軌條が彎曲し張出す時軌條と枕木の締結による抵抗力率を M とし、 p を枕木の中心間隔とすると

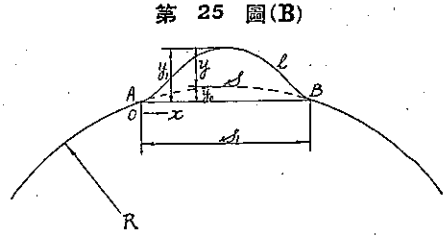
$$A_f = \frac{2Mf}{p} \dots \dots \dots (7)$$

以上の仕事量の内 A_a は軌條挫屈を生ぜしむる爲に外から加へられるもので、 $A_b + A_g + A_f - A_c = A_p$ はその結果軌條内に蓄へられたエネルギーであると考えることが出来る。兩者の差を A とすると

$$A = A_a - A_p = A_c + A_a - A_b - A_g - A_f = -\frac{EF}{2} \{ s + EF(K_1 + K_2) + L_1 + L_2 \} \vartheta^2 + P_0 \{ s + EF(K_1 + K_2) + L_1 + L_2 \} \vartheta - \left(\pi^4 EJ \frac{f^2}{s^3} + \frac{1}{2} g s f + \frac{2Mf}{p} \right) - rL_2 \left(2K_2 + \frac{L_2}{EF} \right) \left\{ P_0 + \frac{rL_2 \left(2K_2 + \frac{L_2}{EF} \right)}{2 \left(K_2 + \frac{L_2}{EF} \right)} \right\} \dots \dots \dots (8)$$

軌道の曲線半径を R , s に対する弦 AB の長さを s_1 とする。第 25 圖(B) の様に A を座標原点とし直線 AB を x 軸に取ると圓曲線軌條は

$$y_0 = \frac{(s_1 - x)x}{2R}$$



第 25 圖(B)

又撓屈軌條はこの x 軸に對して

$$y_1 = y + y_0 = \frac{f}{2} \left(1 - \cos \frac{2\pi x}{s_1} \right) + \frac{(s_1 - x)x}{2R} \dots\dots\dots (9)$$

とおくことが出来る。従つて

$$\vartheta = \frac{\frac{\pi^2 f^2}{4s} + \frac{fs}{2R} + r \left(2K_2 + \frac{L_2}{EF} \right) L_2}{s + EF(K_1 + K_2) + L_1 + L_2} \dots\dots\dots (10)$$

即ち ϑ は s 及び f の函数である。

従つて (8) 式の仕事量 A も s 及び f の函数であることが明かである。而して長さ s , 最大張出し量 f なる撓屈軌條が平衡を保つのは

$$\frac{\partial A_d}{\partial f} = \frac{\partial A_p}{\partial f} \quad \text{即ち} \quad \frac{\partial A}{\partial f} = 0$$

$$\frac{\partial A_d}{\partial s} = \frac{\partial A_p}{\partial s} \quad \text{即ち} \quad \frac{\partial A}{\partial s} = 0$$

なる時であつてこれを計算すると

$$P_0 = EF \frac{\frac{\pi^2 f^2}{4s} + \frac{fs}{2R} + r \left(2K_2 + \frac{L_2}{EF} \right) L_2}{s + EF(K_1 + K_2) + L_1 + L_2} + \frac{2\pi^4 EJ \frac{f}{s^3} + \frac{1}{2} gs + \frac{2M}{p}}{\frac{\pi^2 f}{2s} + \frac{s}{2R}}$$

$$P_0 = EF \frac{\left\{ \frac{\pi^2 f^2}{4s} + \frac{fs}{2R} + r \left(2K_2 + \frac{L_2}{EF} \right) L_2 \right\} \left[s + EF(K_1 + K_2) + L_1 + L_2 + \frac{\frac{\pi^2 f^2}{4s} + \frac{fs}{2R} + r \left(2K_2 + \frac{L_2}{EF} \right) L_2}{2 \left(\frac{\pi^2 f^2}{4s^2} - \frac{f}{2R} \right)} \right]}{\{s + EF(K_1 + K_2) + L_1 + L_2\}^2}$$

$$+ \frac{3\pi^4 EJ \frac{f^2}{s^4} - \frac{1}{2} gf}{\frac{\pi^2 f^2}{4s^2} - \frac{f}{2R}} \dots\dots\dots (11)$$

直線の場合 $R = \infty$ とすると

$$(P_0) = EF \frac{\frac{\pi^2 f^2}{4s} + r \left(2K_2 + \frac{L_2}{EF} \right) L_2}{s + EF(K_1 + K_2) + L_1 + L_2} + \frac{4\pi^4 EJ}{s^2} + \frac{gs}{\pi^2 f} + \frac{4Ms}{\pi^2 f}$$

$$(P_0) = EF \frac{\left\{ \frac{\pi^2 f^2}{4s} + r \left(2K_2 + \frac{L_2}{EF} \right) L_2 \right\} \left[s + EF(K_1 + K_2) + L_1 + L_2 + \frac{2s^2}{\pi^2 f^2} \left\{ \frac{\pi^2 f^2}{4s} + r \left(2K_2 + \frac{L_2}{EF} \right) L_2 \right\} \right]}{\{s + EF(K_1 + K_2) + L_1 + L_2\}^2}$$

$$+ \frac{12\pi^4 EJ}{s^2} - \frac{27s^2}{\pi^2 f} \dots\dots\dots (12)$$

直線軌條が弾性限度内に於て半徑 R なる曲線軌道に敷設せられた場合には撓屈軌條の彎曲仕事量は (9) 式から $s=s_1$ と置き

$$A_1 = EJ \left(\frac{\pi^2 f^2}{s^3} + \frac{s}{2R^2} \right) - EJ \frac{s}{2R^2} = \pi^2 EJ \frac{f^2}{s^3}$$

即ち (6) 式と異なる所はない。従つて P_0, s, f を求むる式も (8) 式と等しくなる。撓屈軌條の形を $y = \frac{f}{2} \left(1 - \cos \frac{2\pi x}{s} \right)$ とすれば撓屈による軌條彎曲率は A-B なる範圍に於て正負反覆することになる。これ上式が (5) 式と結果に於て等しくなる所以である。撓屈による正負彎曲率の大きさが等しくなければ上式と (5) 式とは等しくなくなり、従つて (8) 式と異なる P_0, s, f の關係式を得べく、直線軌條を矯正して曲線軌道に用ふる場合と然らざる場合とで撓屈抵抗に些少の差を來す。然し軌道に實際用ふる様な大なる曲線半徑の場合には殆んどこの差は現れない。

撓屈軌條の平衡軸壓 P は

$$P = P_0 - EF \frac{\frac{\pi^2 f^2}{4s} + \frac{fs}{2R} + r \left(2K_2 + \frac{L_2}{EF} \right) L_2}{s + EF(K_1 + K_2) + L_1 + L_2} \dots \dots \dots (13)$$

軸壓が P_0 である時如何なる s 及び f によつて軌條撓屈が生ずるかは (11) 或は (12) 式の聯立した 2 式から求められる。

一例として 50 kg 軌條を敷設した半徑 500 m の曲線軌道を考へる。道床には碎石を充分填充せるものとし

$$\begin{aligned} g &= 2.04 \text{ kg/cm} & r &= 3 \text{ kg/cm} \\ K_1 &= 16 \times 10^{-6} & K_2 &= 22 \times 10^{-6} \\ L_1 &= 4 \text{ m} & L_2 &= 30 \text{ m} \end{aligned}$$

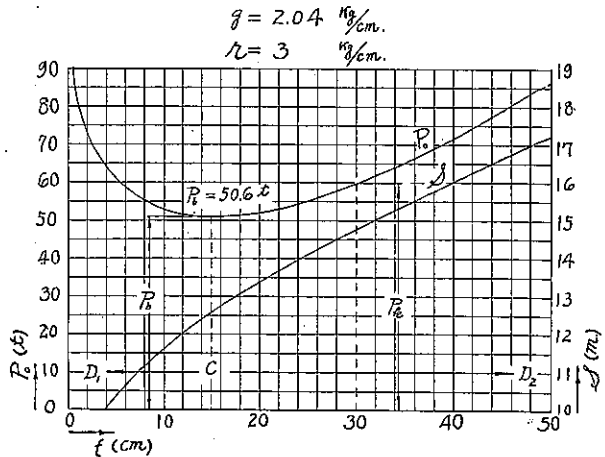
とする。

(11) 式から P_0, s, f の關係を求め Sanden の用ひた方法⁽¹⁾でこれを示せば第 26 圖のようになる。圖は横軸に f 、縦軸に P_0 及び s を取り、 f に對して P_0 曲線及び s 曲線を記入し P_0, s, f の關係を示したものである。

P_0 の最小値即ち P_0 は 50.6 ton でこの軸壓による撓屈は約 $f=15$ cm, $s=12.55$ m となる。これによつてこの軌道の撓屈は $P_0=50.6$ ton 以下の軸壓では決して起らないことが明かとなる。撓屈軸壓 P_k が $P_k > P_0$ の場合には 2 通りの撓屈が起り得る。例へば $P_k=60$ ton の時には $f=30$ cm, $s=14.75$ m となつて撓屈軌條は平衡するが同時に $f=5.3$ cm, $s=10.4$ m であつてもよい。然し前者が安定の平衡であるに反し後者は不安定の平衡である。従つて普通の軌道にあつては前者の形を取つて撓屈する。

一般に P_0 に相當する點を O とすると第 26 圖の CD_1 の範圍の撓屈は不安定で CD_2 の範圍

第 26 圖 50 kg 軌條を敷設した半徑 500 m の曲線軌道



(1) Organ f. d. F. d. E. 1932 Heft 19.

の挫屈は安定の挫屈である。

試みに平衡軸壓を (13) 式から求むるに

$$f=30 \text{ cm}, s=14.75 \text{ cm} \text{ の時は } P=60-34.3=25.7 \text{ ton}$$

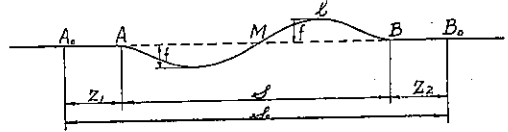
$$f=5.3 \text{ cm}, s=10.4 \text{ cm} \text{ の時は } P=60-10.1=49.9 \text{ ton}$$

であつて不安定平衡の場合の軌條軸壓は尙甚しく高い。

(3) 挫屈形 II の場合

第 27 圖 (A) の様に挫屈軌條が形 II を取る場合、形 I の場合と同様に挫屈前の軸壓を一般に P_0 、挫屈せんとする部分の両端を A_0, B_0 とし、挫屈により P_0 は P に低下し A_0 は A に、 B_0 は B に移動して平衡したとする。

第 27 圖 (A)



$$\overline{A_0A} = z_1 \quad \overline{B_0B} = z_2$$

$$\overline{A_0B_0} = s_0 \quad \overline{AB} = s$$

とし AB 間の挫屈軌條長を l とする。軌道が曲線である

場合には z_1, z_2, s_0, s 等は皆曲線に沿ふて測る。仕事量 A_e, A_d は (2) の場合と同様であつて

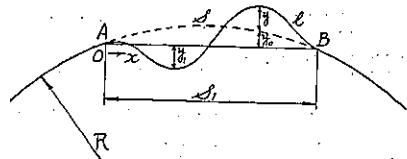
$$A_e = P_0 s \vartheta - \frac{EF}{2} s \vartheta^2$$

$$A_d = -\frac{EF}{2} \{EF(K_1+K_2)+L_1+L_2\} \vartheta^2 + P_0 \{EF(K_1+K_2)+L_1+L_2\} \vartheta$$

$$-rL_2 \left(2K_2 + \frac{I_2}{EF} \right) \left\{ P_0 + \frac{rL_2 \left(2K_2 + \frac{I_2}{EF} \right)}{2 \left(K_2 + \frac{L_2}{EF} \right)} \right\}$$

第 27 圖 (B) の様に軌道の曲線半径を R とし挫屈の始點 A に直角坐標の原點を定め \overline{AB} の方向に x 軸を取り $\overline{AB} = s_1$ とすおは

第 27 圖 (B)



$$A_b = 8.65\pi^4 EJ \frac{f^2}{s^3}$$

又
$$A_g = \frac{1.73}{\pi} gsf$$

A_f は考へない。従つて

$$A = A_e + A_d - A_b - A_g$$

$$= -\frac{EF}{2} \{s + EF(K_1+K_2)+L_1+L_2\} \vartheta^2 + D_0 \{s + EF(K_1+K_2)+L_1+L_2\} \vartheta$$

$$-8.65\pi^4 EJ \frac{f^2}{s^3} - \frac{1.73 gsf}{\pi} - rL_2 \left(2K_2 + \frac{I_2}{EF} \right) \left\{ D_0 + \frac{rL_2 \left(2K_2 + \frac{I_2}{EF} \right)}{2 \left(K_2 + \frac{L_2}{EF} \right)} \right\} \dots \dots \dots (14)$$

$$\vartheta = \frac{1.054 \frac{\pi^2 f^2}{s} + r \left(2K_2 + \frac{I_2}{EF} \right) L_2}{s + EF(K_1+K_2)+L_1+L_2}$$

挫屈軌條が平衡を保つ爲には

$$\frac{\partial A}{\partial f} = 0 \quad \frac{\partial A}{\partial s} = 0$$

$$P_0 = EF \frac{1.054 \frac{\pi^2 f^2}{s} + r \left(2K_2 + \frac{L_2}{EF} \right) L_2}{s + EF(K_1 + K_2) + L_1 + L_2} + 8.2 EJ \frac{\pi^2}{s^2} + 0.82 \frac{gs^2}{\pi^2 f}$$

$$P_0 = EF \frac{\left\{ 1.054 \frac{\pi^2 f^2}{s} + r \left(2K_2 + \frac{L_2}{EF} \right) L_2 \right\} \left[s + EF(K_1 + K_2) + L_1 + L_2 + \frac{s^2}{2.11 \pi^2 f^2} \left\{ 1.054 \frac{\pi^2 f^2}{s} \left(2K_2 + \frac{L_2}{EF} \right) L_2 \right\} \right]}{\left[s + EF(K_1 + K_2) + L_1 + L_2 \right]^2} + 24.64 EJ \pi^2 \frac{1}{s^2} - 1.64 \frac{gs^2}{\pi^2 f} \dots (15)$$

軌條が豫め曲線半径に一致する様に矯正されて敷設された場合も同様である。

2. 實驗値の理論的考察

(1) 試験軌道に於ける軌條挫屈の理論的計算値 試験軌道では軌條の重量、長さ、道床砂利の種類、厚さ、曲線半径の大きさを色々に變更した。道床砂利の種類及厚さを色々にした場合の道床抵抗 g は第4節 1. の測定結果から知ることが出来る。枕木中心間隔を 70 cm とする時には g の値は次の様になる。

道 床 砂 利	g (kg/cm)		
	砂利を全部填充した場合 $d=0$	砂利を半分掻出した場合 $d=7$ cm	砂利を全部掻出した場合 $d=14$ cm
切 込	1.46	0.73	0.43
精 選	1.73	0.90	0.52
碎 石	2.04	1.28	0.65

この値は 50 kg 及び 37 kg 軌條を敷設した場合に相當するもので 30 kg 軌條を敷設した場合はこの約 70/76 = 0.92 倍になる。

軌條の匏進抵抗 r は第 4 節 2. から知ることが出来るが簡單の爲に

$$r = 1.3 \text{ kg/cm}$$

とする。 M による A_f を A_b 或は A_g に比べると軌條と枕木が強固に締結され M の最も大なる場合に於ては相當の量に達する。試験軌道で新枕木を強固に取附けた當座はこれに近い状態にあつたが、その後の殆んど全部は締結や弛み $A_f = 0$ とするのが適當である。従つて此處では挫屈部分の軌條匏進抵抗仕事量と同様に M の仕事量を省略することにする。

g 及び r にこの様な値を用ひ且第 4 節 3. から

$$\begin{aligned} K_1 &= 16 \times 10^{-6} & K_2 &= 22 \times 10^{-6} \\ \text{又} \quad L_1 &= 4 \text{ m} & L_2 &= 30 \text{ m} \\ E &= 2100000 \text{ kg/cm}^2 \\ F &= 64.35 \text{ cm}^2 & J &= 377 \text{ cm}^4 \quad (50 \text{ kg 軌條}) \\ F &= 47.30 \text{ cm}^2 & J &= 237 \text{ cm}^4 \quad (37 \text{ kg 軌條}) \\ F &= 38.28 \text{ cm}^2 & J &= 152 \text{ cm}^4 \quad (30 \text{ kg 軌條}) \end{aligned}$$

として各種の場合の P_0, f, s の關係を求めたのが第 28 圖及び第 29 圖である。挫屈形は I 及び II を取つた。何れも實驗した結果の様に軌條が水平方向に挫屈する場合である。圖中軌道状態を簡單に表す爲に次の様な記號を用ひ各曲線に附記した。

- S: 直線
- C3: 半径 300 m の曲線
- C5: 半径 500 m の曲線
- 1: 道床砂利を充分填充した場合即ち $d=0$
- 2: 道床砂利を半分掻出した場合即ち $d=7$ cm
- 3: 道床砂利を全部掻出した場合即ち $d=14$ cm
- K: 切込道床
- R: 精選道床
- B: 碎石道床

例へば C3 R2 は半径 300 m の曲線で精選砂利を用ひそれを掻出し $d=7$ cm とした軌道である。

第 28 圖から最低挫屈軸壓 P_b を 1, 2 の場合に就て出すと次の様になる。

50 kg 軌條を敷設した直線軌道の P_b (ton)

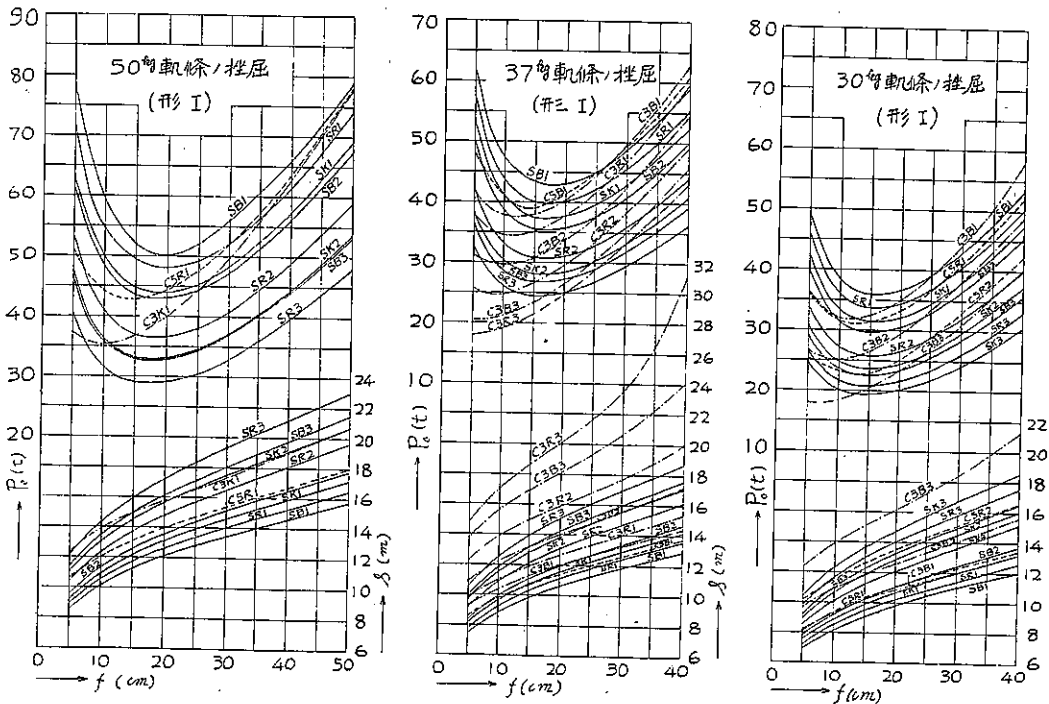
道床砂利	$d=0$	$d=7$ cm	$d=14$ cm
切込	43.8	32.8	—
精選	48	36.5	28.7
碎石	50	43	32.7

精選道床上の 37 kg 軌條の P_b (ton)

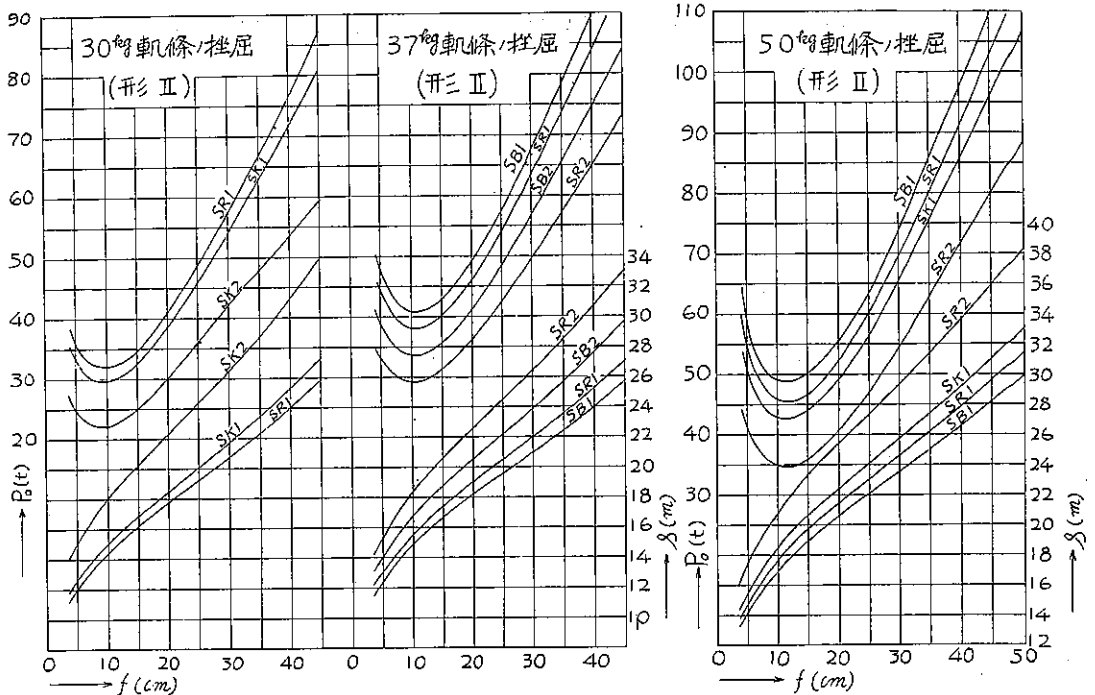
軌道	$d=0$	$d=7$ cm	$d=14$ cm
直線	39.7	30.5	24.3
半径 300m の曲線	34.4	24.6	17.6

これによつて道床砂利の種類により、曲線半径の大小により、或は道床砂利掻出し量の多少により最低挫屈軸壓 P_b が如何程の影響を受けるかを察知することが出来る。

第 28 圖



第 29 圖



挫屈形が I であつても II であつても最低挫屈軸壓 P_0 は殆んど變らない。唯形 II の方が形 I より 2 ton 内外小である。 P_0 に相當する張出し量 f は形 II に於ける方が小である。形 II の挫屈延長 s は形 I の挫屈延長の普通 1.5~1.6 倍になる。

(2) 實驗値と計算値の比較 第 3 節 3. の軌條挫屈實驗表には挫屈の状態として挫屈形, 挫屈軸壓 P_k , 挫屈延長 s , 最大張出し量 f 及び軌道の最大浮上り量 h を掲げた。夫々の試驗軌道に相當する條件を具備する P_0, f, s 曲線から實驗した挫屈軸壓 P_k に相當する f 及び s を求め第 4 節 3. の軌條挫屈表に理論上の挫屈として添加した。

直線軌道では理論上は $f=0$ に於て軌條は著しく大なる軸壓 P_0 に耐へ、曲線軌道に於ても $f=0$ 及びその附近では普通 $\frac{dA_n}{df} > \frac{dA_u}{df}$ であるから充分の軸壓に耐ふべきである。然るに軌條挫屈の生ずるのは軌道に於ける種々の不整に原因するのであつて、 P_0 以上の如何なる程度迄の軸壓に耐ふるかは軌條を始め一般軌道状態によつて異なるものである。

挫屈軸壓 P_k が最低挫屈軸壓 P_0 より何程大なる値を示すかは實驗上甚だ興味あることである。軌條が新しく未だ挫屈を受けたことの無いもの、或は充分人念に矯正されたるものは挫屈抵抗 P_k が甚だ大で、 $P_k - P_0$ は例へば 50 kg 軌條で 26.5 ton に達するものがある。これと反對に P_k の値が P_0 より小なる場合がある。軌條が繰返し挫屈を受けた後に行はれる實驗に見られる。特に軌條重量小で枕木を包む道床の少き場合に比較的多く實驗された。 P_k が P_0 より小なる主原因は挫屈を繰返して軌條に甚しき恒久的の攪みが生ずることにある。斯る軌條では充分なる軌條整正が不可能となり且軸壓を加へられた軌條が溜進中に道床が弱められ軌條の不整が益々大となる爲である。軌條挫屈表中の $P_k - P_0$ の負となれるものは何れも挫屈を繰返した後の挫屈であつて、然らざるも

のは新しき軌條又は軌條の恒久撓みを充分矯直して使用したものである。

條軌は恒久彎曲を矯正せずして多きは 10 回以上挫屈せしめた。斯る軌條に就ての實驗範圍内に於ける $P_k - P_b$ の最大及び最小値を取ると次の様になる。

軌 條	$P_k - P_b$ (ton)	
	最 大	最 小
50 kg	26.5	-5
37 kg	19.2	-8.6
30 kg	11.7	-8.2

3. 軌條壓縮の計算

水平加壓器の壓力を P 、軌條支承體の匱進抵抗を r 、ブロック II に加はる水平壓力を P_c とする。ブロック II の移動を ξ とすると

$$\xi = K_2 P_c$$

ブロック II から x なる距離にある N の移動を d_n とし N に於ける r を r_n とする。

一般に第 4 節 2. に示した様に $r \propto \delta^n$ であるから近似的に $d \propto X$ とすると $r \propto X^n$ である。

然る時は

$$d_n = \frac{1}{EF} \left\{ (e+x)P - \frac{r_1(e+L)(e+x) - r_n(e+x)^2}{n+1} - \frac{r_n(e+x)^2 - r_2e^2}{n+2} \right\}$$

N が A に一致する時には $d_n = d_1$ 、 $x = L$ 、 $r_n = r_1$ であるから

$$d_1 = \frac{1}{EF} \left\{ (e+L)P - \frac{r_1(e+L)^2 - r_2e^2}{n+2} \right\}$$

となる。 AN 間の軌條壓縮は $d_1 - d_n$ であるから

$$d_1 - d_n = \frac{1}{EF} \left\{ (L-x)P + \frac{r_1(e+L)(e+x) - r_n(e+x)^2}{n+1} - \frac{r_1(e+L)^2 - r_n(e+x)^2}{n+2} \right\}$$

r_1, r_2, r_n は夫々

$$\delta_1 = \left(K_2 + \frac{L}{EF} \right) P,$$

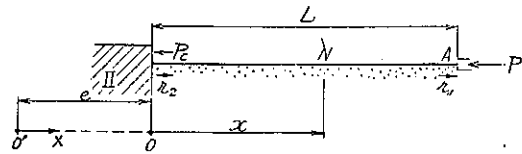
$$\delta_2 = K_2 P,$$

$$\delta_n = \left(K_2 + \frac{x}{EF} \right) P$$

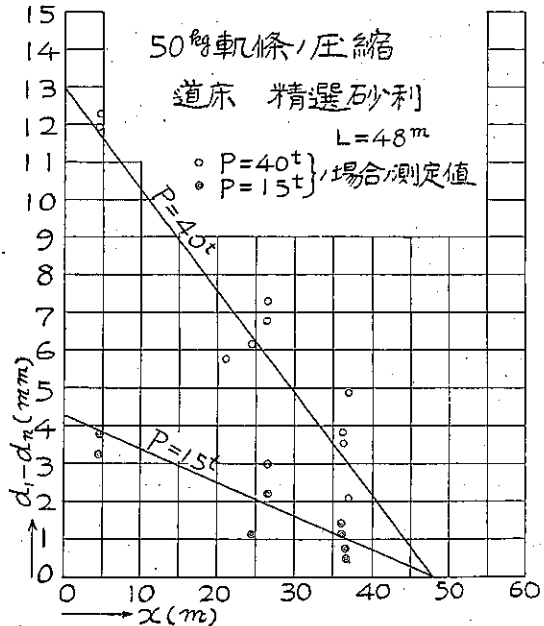
に對する値を用ふることが出来る。 $\overline{AN} = L - x$ を軌條長に等しく取れば $d_1 - d_n$ は軌條の壓縮量を與へる。

50 kg 軌條を敷設した軌道を考へる。道床が精選砂利からなるとすれば第 4 節 2. の結果から

第 30 圖



第 31 圖



$$r \propto \delta^{\frac{1}{6}} \quad n = \frac{1}{6}$$

$\delta = 20 \text{ mm}$ の時 $r = 370 \text{ kg/m}$

である。 $K_2 = 22 \times 10^{-6}$, $L = 48 \text{ m}$ とし

$P = 40$ 及び 15 ton

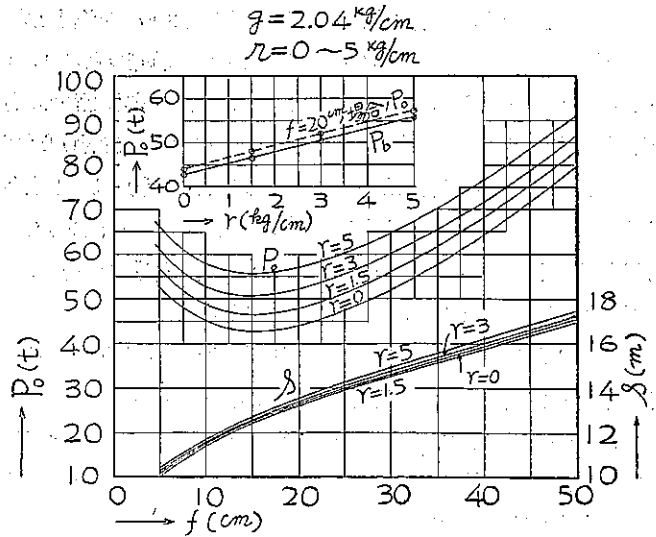
の場合に就て $d_1 - d_n$ を求めると第 31 圖の様になる。同圖に軌條壓縮測定結果も併せ示した。

4. 軌條匍進抵抗が挫屈軸壓に及ぼす影響

道床抵抗 g が軌條挫屈軸壓に及ぼす影響は可なり大きい。軌條匍進抵抗も亦軌條挫屈抵抗に相當の影響を及ぼすが、その量は g の影響に比すれば甚だ小さい。

第 26 圖に示した様に碎石道床上に 50kg 軌條を敷設した半徑 500 m の曲線軌道を考へる。 $g = 2.04 \text{ kg/cm}$ とし $r = 0 \sim 5 \text{ kg/cm}$ として P_0, s, f の關係曲線を求めると第 32 圖の様になる。同圖に r の變化に對する挫屈軸壓の變化をも示した。これによると r が 0 より 5 kg/cm に變るに従つて挫屈軸壓は約 13ton の増加を示す。従つて $r = 1 \text{ kg/cm}$ の増加に對する挫屈軸壓の増加は約 2.6 ton に過ぎない。然し枕木周圍の道床を強固にすることは獨り g を増大せしむるのみでなく r を大きくするのであるから、挫屈軸壓増加の對策としては益々有效である。

第 32 圖 50kg 軌條の挫屈

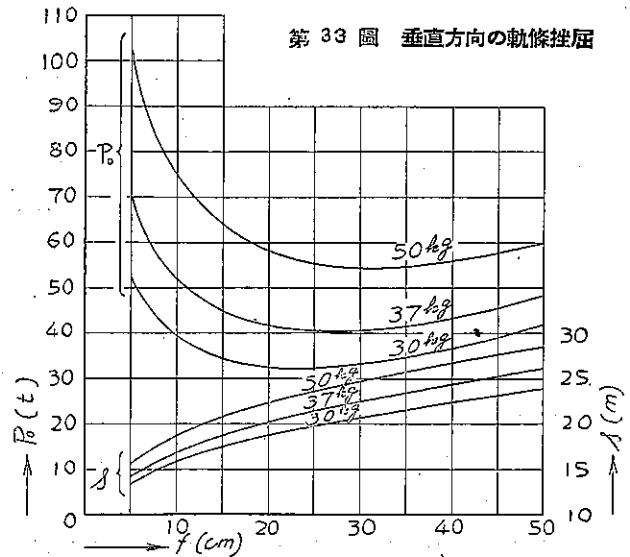


5. 垂直方向の軌條挫屈

軸壓力を受けた軌條は 30 mm 近くの浮上りを示すこともあつたが、最後の挫屈は常に水平方向に起り、垂直方向に挫屈した例はない。垂直方向の軌條挫屈に就て挫屈軸壓 P_0 、浮上り量 f 及び挫屈延長 s を出したものが第 33 圖である。但し g の値としては軌條及び枕木の重量を考へ $r = 1.3 \text{ kg/cm}$ とした。計算に用いた g 及び J の値を次表に示す。

この結果を見るに垂直方向の軌條挫屈抵抗は軌條横移動に對する道床抵抗が 2 kg/cm である場合の水平方向の軌條挫屈抵抗

第 33 圖 垂直方向の軌條挫屈



と略同程度である。然しこの挫屈抵抗は道床搔出し及びこれに類することによつて小となることは無い。抵抗 g は常に一定である。然るに軌條の横移動に對する道床抵抗 g は軌條浮上りの甚しい場合減少すべきものであるから、總ての挫屈が水平方向に生じたのは恐らくこれが爲であると考へられる。軌道の兩側に杭打して水平方向の軌條挫屈を防止した時の軌條挫屈の過程を観察するとこの間の關係がよく分る。

軌條	g (kg/cm)	J (cm ⁴)
50 kg	0.80	1744
37 kg	0.63	952
30 kg	0.57	607

一般に垂直方向の挫屈延長 s は甚しく長く、浮上り量 f も著しく大となるべきである。

第 6 節 特別の構造或は状態の軌道に就ての實驗

1. 軌條継目の影響

(1) 普通の継目 軌條の挫屈に對して継目が如何なる影響を及ぼすかを調査する爲、長短各種の軌條を混合敷設し継目の位置を種々に變へた。継目鉋は 50 kg 軌條の長さ 12 m のものには角形、長さ 24 m のものには短冊形、37 kg 及び 30 kg 軌條には角形を用いた。継目枕木間隔は現行定規に示す様に 38 cm とし、継目は一般によく整備され、ボルトは概ね 15~30 kg-m のトルクで締付けられた。

斯る継目を有する軌條を挫屈せしむるも継目の影響としては何等見るべきものがない。軌條挫屈表の試驗結果から明かである様に軌條の長短或はその混合状態如何に關せず常に同じ様な挫屈を生じ継目附近に於て挫屈を生ずる機會が特に多い様な傾向は殆んどない。各軌條継目に於て軌條断面縱中心軸の周りの継目鉋及び軌條の断面二次率を取ると前者は後者の約 2~4 倍である。

継目鉋と軌條の間にはボルトを充分締付けても遊隙のある場合が少くない。斯る場合の軌條挫屈線を見るに普通軌條の挫屈線より継目箇所より曲り方が稍々著しい。

(2) ボルトを緩め或は屈折ある継目 ボルトが充分に締付けられよく整正されて再れば軌條継目そのものが特に軌條挫屈抵抗を弱める原因となることはない。ボルトが弛み又は繼折れがある場合には挫屈に對する抵抗は小となる。

ボルトが弛んだ継目を有する軌條に軸壓力を加へると軸壓力の小なる時継目附近の繼折れが著しく目立つ。挫屈曲線の曲り方も継目の前後で稍々著しくなる。第 34 圖は 37 kg の 4 m 軌條の前後の継目ボルトを緩めた際の挫屈状態であつて継目屈折が明瞭に見られる。

第 34 圖



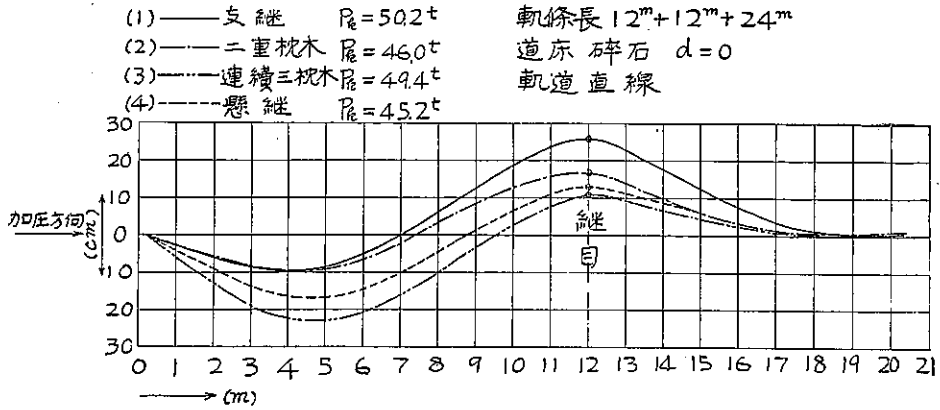
(3) 特別の枕木配置を有する継目 軌條継目を支へる枕木配置を種々に變更して挫屈に對する抵抗を測定した。軌道は 12 m 50 kg 軌條を敷設した直線で継目鉋は角形である。道床には碎石を用いた。第 35 圖がこれに關する結果である。

(a) 普通枕木を以て支繼としたもので枕木間隔は全部 71 cm である。挫屈形 I に近き形を以て挫屈しその軸壓は 50.2 ton である。継目部分の張り出しが最も多い。

(b) 継目下に普通枕木 2 挺を相接して敷設しその他の枕木間隔は 71 cm とした。挫屈形 II で挫屈し軌條軸壓は 46 ton に達した。

(c) 支繼の様に継目直下に普通枕木 1 挺を入れその兩側に接近して 2 挺の枕木を入れたもの即ち連續 3 枕木

第 35 圖 特殊繼目の 50 kg 軌條の挫屈



に乗る継目である。継目枕木の間隔は 42 cm, その他は 71 cm である。挫屈形は形 I に近く継目部の張出しは甚だ少く大部分は他の部分で張り出して居る。挫屈軸壓は 49.4ton である。

(d) 普通に用ふる懸繼で継目枕木間隔は 38 cm, その他の枕木間隔は 71 cm である。挫屈形は II で軌條軸壓は 45.2ton に達した。継目部分の張出しは軌條普通部分の張出しより僅かばかり小である。

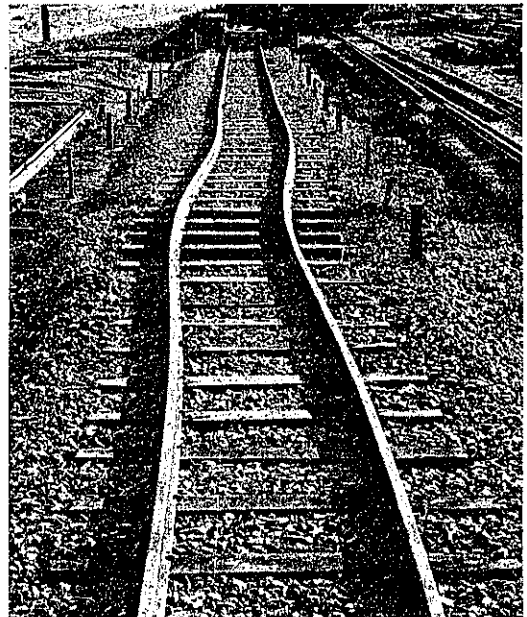
以上 (a)~(d) を比較して見るに軌條の敷設法通り、整正法、或は繰返し挫屈数等の関係によつて明確に結論することは出来ないが、支繼の様にすれば他の構造のものに比し継目部分に缺點が起り易く、連続 3 枕木の様な継目構造にすれば継目部分の軌條挫屈抵抗が著しく大となることは明かである。現今普通に用ひられる懸繼も相當継目部分を強くする。

2. 道床砂利掻出しその他の影響

道床砂利を掻出すと道床の抵抗力 g が小になるから挫屈に對する軌條の抵抗は著しく減少する。全般的に軌道の砂利を少くする場合の影響は第 4 節 1. 及び第 5 節 2. に述べた所により明かである。保線作業施行中屢行はれる様に局部的に道床を掻出す場合も同様である。従つて真直の軌條を敷設し枕木數挺に互つて道床砂利を掻出し軌條軸壓を加へれば挫屈は普通砂利掻出部分を中心として生ずる。第 36 圖は 50 kg 軌條を敷設した軌道の砂利を一部掻出し軸壓を加へたるにその所を中心として軌條挫屈が生じた例である。然し道床砂利が掻出されてもその部分の軌條に恒久撓みなく他の充分砂利を填充されたる部分に甚しい恒久彎曲があれば軌條の挫屈は前者よりも後者に生ずることが多い。

一般に枕木數挺に互つて道床砂利を掻出す時挫屈に對する軌條の抵抗を普通の軌道状態の場合に比し 10ton 以上減ずることは少くない。軌道を局部的に數 cm 昂上した場合

第 36 圖

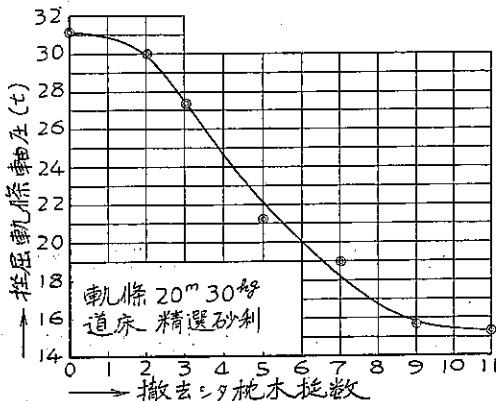


或は軌條繼目を充分緩めた場合も略同様である。

3. 両側に於て軌條と枕木の締結を解いた場合の挫屈

任意挺数の枕木の両側の軌條締結を解いて軌條軸壓を加へ軌條に挫屈を生ぜしめた。斯る軌道の状態は枕木更換に際して任意の枕木を軌道から撤去した場合に相當する。實驗の計果を第 37 圖に一括して示した。

第 37 圖 枕木撤去挺數(犬釘抜挺數)と挫屈軸壓



第 37 圖は兩側犬釘を抜去つた枕木挺數と挫屈軌條軸壓の關係を示したものである。7~11 挺以上の枕木の兩側犬釘を抜去つた場合に挫屈軸壓は甚だ小となり軌條枕木を全部締結した場合に比し半減し約 15 ton の減少となる。挫屈軌條の延長 s は多く 8~10m の間にあつた。

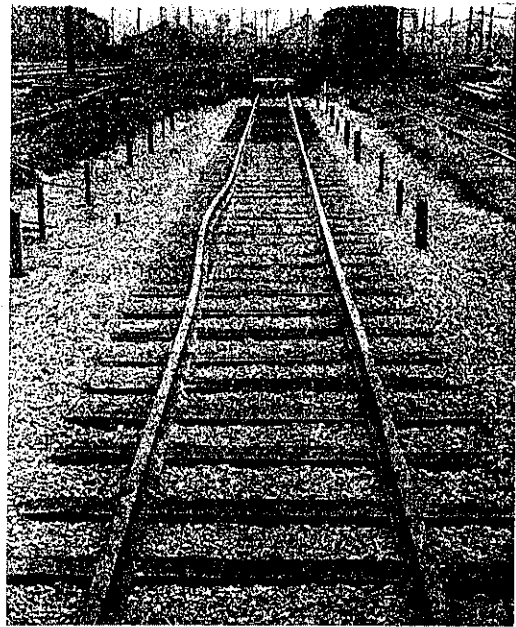
4. 片側に於て軌條と枕木の締結を解いた場合の挫屈

片側軌條に於てのみ枕木と軌條の締結を解き軌條に軸壓力を加へて挫屈を生ぜしめた。締結を解いた枕木數が約 10 挺以上の場合には締結を解かれた軌條のみが單獨に挫屈し他側軌條には殆んど影響を及ぼさないが、締結を解かれた枕木數が約 10 挺より少き場合には兩側軌條共に挫屈する。特に 4~5 挺以下の場合には兩側軌條は殆んど同様の挫屈をなす。第 38 圖は 50 kg 軌條を敷設した軌道で枕木 10 挺の片側犬釘を抜いた場合の片側軌條の挫屈である。

5. 軌條の挫屈と直角水平力

軌條軸壓力が大になると軌條は遂に挫屈するに至るが、軸壓と同時に軌道に直角方向に水平力が作用すると軌條は更に容易に挫屈する。軌條に軸壓を加へつゝ直角水平力を作用せしめ軌條に挫屈が生じた時の軸壓と直角水平力を測定し兩者の關係を求めた結果が第 39 圖である。軌道は直線で道床には精選砂利を用ひた。軌條は 20m の 30 kg で直角水平力は軌條長の中央に加へた。軌條軸壓は 15.2, 19, 26.6, 32.4, 31, 30.4, 22.8 (ton) の順序に加へた。計算上直角水平力のない場合の最低挫屈軸壓は第 28 圖 SRI により 33.7 ton、即ち第 39 圖の A である。軌條は繰返し挫屈を受けると次第に挫屈抵抗を減ずるからこの影響を可及的に除く爲に上述の様に軸壓は小から大に次で大から小にこれを繰返した。軸壓 31 ton の時直角水平力は殆んど零であるのに挫屈を生じた。即ち $\bar{A}B = 2.7$ ton が恒久彎曲の影響であると考へられる。この試驗結果によつて挫屈を生ぜしむる軌條軸壓と直角水平力の關係の大勢を察知する事が出来る。軌條軸壓が大になると挫屈を生ぜしむるに要する直角水平力は急に減少する。

第 38 圖



6. 軌條挫屈止杭打の影響

枕木端に杭打すれば或程度迄軌條の挫屈抵抗を増加することができる。然し一般に杭打によつて挫屈を防止しても杭打せざる場合の挫屈軸壓を超過すると軌道の浮上りが甚しく大となり間もなく水平方向に挫屈する。一般に 30 kg 軌條の様に断面大ならざる軌條にあつては挫屈防止の杭は可及的密に分布せしめ 5~6 m に 1 本位の割合にすることが必要であつて、50 kg 軌條の様に断面大なる軌條の場合には杭相互の間隔をこれより大にしても杭打の効果を保つことができる。杭の抵抗力を加算することによつて道床抵抗 g は夫相當に増加するから軌條の挫屈抵抗の増加も推定することができる。然し垂直方向の挫屈抵抗に限度があるから杭打の効果もこれによつて限定されるわけである。

7. 軌條匍進止装置の効果

軌條にアンチクリーパーを取付けて軌條匍進を防止せんとする時、軌條と枕木との間の滑りを止めるアンチクリーパーの力は道床上を枕木が匍進する時の抵抗力 μ より大であるから、軌道上構の匍進を有効に防止せんとすればアンチクリーパーを取付けた枕木の前には匍進防止杭を建植しなければならない。試験に用ひたアンチクリーパーは戸畑型と住友型である。アンチクリーパーを取付けた枕木の前には常に枕木 2 つ切りの杭を打つた。先づ 24 m の 37 kg 軌條からなる長さ 24 m の軌道を單獨に敷設しこれにアンチクリーパーを集中して取付け又は全長に互て等距離に分布し軌條の一端から加壓器で軸壓を加へ軌條の匍進浮上り及び左右移動の状態を測定した。

試験の結果を総合するに結局軌條匍進止としてのアンチクリーパー取付或は杭打は成るべく軌條全長に互り均等に分散した方が軌道の匍進浮上り又は左右移動少く且大なる軌條軸壓力に耐ゆることが明かになつた。

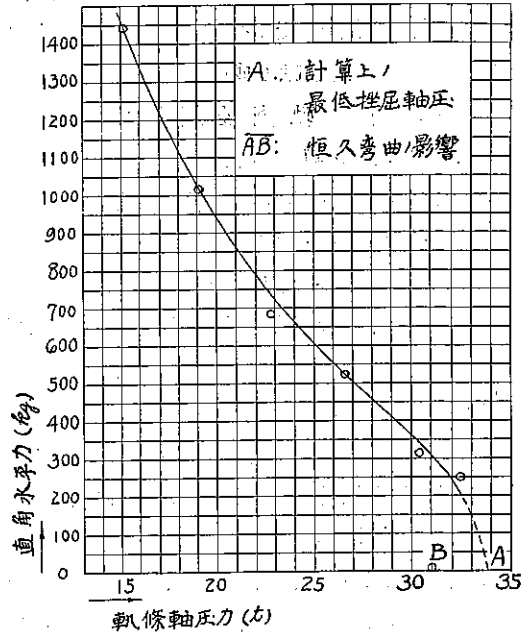
アンチクリーパーと軌條底との繫結状態を見るに、24 m 軌條に 5 個或は 10 m 軌條 2 本に 8 個の割合を以つて取付ける時、軌條壓力が約 15~20 ton 以上になると 20~30% のアンチクリーパーと軌條底との間に多少の滑りを生ずる様になる。杭の支持力は 1~2 ton であるからアンチクリーパーと軌條底との間に作用する力もこの程度である。上述のアンチクリーパーの滑りはこの程度の力によつて生じたものである。

第 2 章 普通の軌道に於ける軌條挫屈の問題

第 1 節 概 説

普通の軌道に敷設された軌條は軌條温度上昇の際に軸壓力を受ける。軌條の温度は日光直射の下にあつては気温より遙かに高くなる。長尺軌條の場合には軌條に自由伸縮を許す程の大なる繼目遊間を附することができないから、軌條支承體の匍進抵抗及び軌條と繼目釘の間の摩擦抵抗力に起因する軸壓の外に軌條兩端の接觸による軸壓を受けることになる。普通軌道に於て軸壓を受けた軌條の挫屈抵抗もその性質は第 1 章の試験軌道に於ける軌條挫屈抵抗と異なる所はない。従つて軌道に種々の構造を與へ或は種々の作業を施した場合に挫屈抵抗が受ける影響

第 39 圖 軌條の挫屈と直角水平力



も前章の結果を引用することができる。唯普通軌道に於る道床は試験軌道に於る道床より一般に固締して居るから道床抵抗力 g 及び r が大きい。新線敷設後の抵抗力が試験軌道の道床抵抗力に稍近い。軌條も亦試験に使用した様な繰返し挫屈を受けるものなく軌條尙進も試験軌道に於る如く急激に大なるものはない。これ等の點に關し普通軌道は試験軌道より成可り安全である。

第 2 節 軌條挫屈抵抗

1. 形 I 及び II の挫屈

(1) 軌條の軸壓と移動 軌條繼目遊間が效力を失つて後の軌條温度上昇を t とするとそれにより温度應力が現れ軌條軸壓力 P_0 を生じ

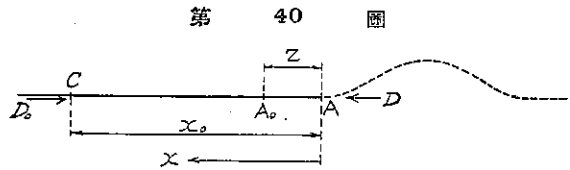
$$P_0 = E\beta t F$$

但し β は軌條鋼の線膨脹係數, F は軌條斷面積

となる。

この軸壓力 P_0 の爲に軌條の一局部に挫屈を生じその所の軸壓が P に低下したとする。軌條挫屈の一端を A とし挫屈前に A は第 40 圖に示す様に A_0 にあつたとする。即ち挫屈の爲の移動は $\overline{A_0A} = Z$ である。

$P_0 - P$ なる軸壓力の低減は $\overline{AC} = x_0$ の間に於ける軌條と軌條支承體の間の抵抗力 r と平衡するものとする。従つて C に於る軌條軸壓力は P_0 であつて終始



變ることがない。A に座標原點 O をとり C に向ひ軌條に沿ふて x を測り $A-C$ の向に於る軸壓力を $P(x)$ とすれば

$$P(x) = P + rx$$

$$x_0 = \frac{P_0 - P}{r} \dots \dots \dots (16)$$

又

$$Z = \frac{(P_0 - P)^2}{2EFr}$$

$$2EFrZ = (P_0 - P)^2 \dots \dots \dots (17)$$

これが普通軌道の場合の移動 Z と軸壓 P の關係である。

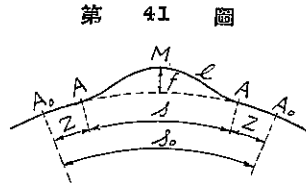
(2) 挫屈軌條が形 I をとる場合 軌條挫屈の仕事量は第 1 章第 5 節の場合と同様であつて(第 41 圖参照)

$$\delta = \frac{P_0 - P}{EF}$$

とすれば

$$A_c = P_0 s \delta - \frac{EF}{2} s \delta^2, \quad A_d = P_0 \frac{EF}{r} \delta^2 - \frac{2(EF)^2}{3r} \delta^3$$

$$A_b = \pi^2 EJ \frac{f^2}{s^3}, \quad A_g = \frac{1}{2} g s f, \quad A_f = \frac{2Mf}{p}$$



従つて

$$A = A_c + A_d - A_b - A_g - A_f$$

$$= -\frac{2(EF)^2}{3r} \delta^2 + \left(\frac{EF}{r} P_0 - \frac{EF}{2} s \right) \delta^2 + P_0 s \delta - \pi^2 EJ \frac{f^2}{s^3} - \frac{1}{2} g s f - \frac{2Mf}{p}$$

挫屈軌條が平衡を保つ時の關係式は曲線半徑を R とすると

$$\left. \begin{aligned}
 P_0 &= EF\vartheta + \frac{2\pi^4 EJ \frac{f}{s^3} + \frac{1}{2}gs + \frac{2M}{p}}{\frac{\pi^2 f}{2s} + \frac{s}{2R}} \\
 P_0 &= EF\vartheta + \frac{\frac{EF}{2}\vartheta^2 + 3\pi^4 EJ \frac{f^2}{s^4} - \frac{1}{2}gf}{\frac{\pi^2 f^2}{4s^2} - \frac{f}{2R}}
 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (18)$$

但し $\vartheta = \sqrt{\left(\frac{rs}{2EF}\right)^2 + \frac{r}{EF}\left(\frac{\pi^2 f^2}{4s} + \frac{fs}{2R}\right) - \frac{rs}{2EF}} \dots\dots\dots (19)$

又 f, s と P の関係を見るに

$$P = P_0 - EF \left(\sqrt{\left(\frac{rs}{2EF}\right)^2 + \frac{r}{EF}\left(\frac{\pi^2 f^2}{4s} + \frac{fs}{2R}\right) - \frac{rs}{2EF}} \right) \dots\dots\dots (20)$$

P_0 で挫屈した軌條は軸壓 P , 張出し f , 挫屈延長 s の状態で平衡する。

(3) 挫屈軌條が形 II をとる場合 軌條挫屈の仕事量は

$$A_e = P_0 s \vartheta - \frac{EF^2}{2} s \vartheta^2$$

$$A_u = P_0 \frac{EF}{r} \vartheta^2 - \frac{2}{3} \frac{(EF)^2}{r} \vartheta^3$$

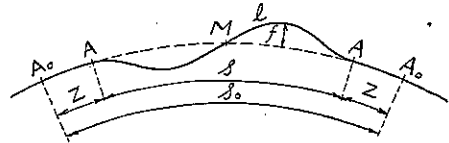
$$A_b = 8.65\pi^4 EJ \frac{f^2}{s^3}$$

$$A_g = \frac{1.73}{\pi} gsf$$

$$A = A_e + A_u - A_b - A_g$$

$$= -\frac{2}{3} \frac{(EF)^2}{r} \vartheta^3 + \left(\frac{EF}{r} P_0 - \frac{EF}{2} s \right) \vartheta^2 + P_0 s \vartheta - 8.65\pi^4 EJ \frac{f^2}{s^3} - \frac{1.73}{\pi} gsf$$

第 42 圖



挫屈軌條が平衡を保つ時の関係は曲線半徑を R とすると

$$\left. \begin{aligned}
 P_0 &= EF\vartheta + \frac{82\pi^2 EJ}{s^2} + 0.82 \frac{gs^2}{\pi^2 f} \\
 P_0 &= EF\vartheta + \frac{EFs^2}{2.11\pi^2 f^2} \vartheta^2 + \frac{24.64\pi^2 EJ}{s^2} - \frac{1.64gs^2}{\pi^2 f}
 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (21)$$

$$\vartheta = \sqrt{\left(\frac{rs}{2EF}\right)^2 + \frac{1.054\pi^2 r f^2}{EFs} - \frac{rs}{2EF}} \dots\dots\dots (22)$$

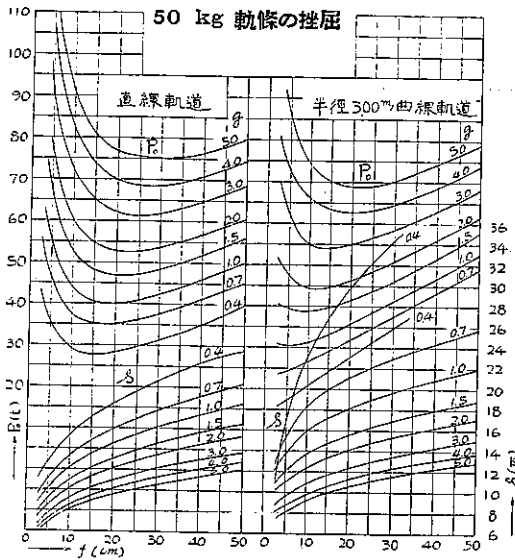
となる。この式から fs と P の関係を見ることもできる。

2. 挫屈抵抗の値

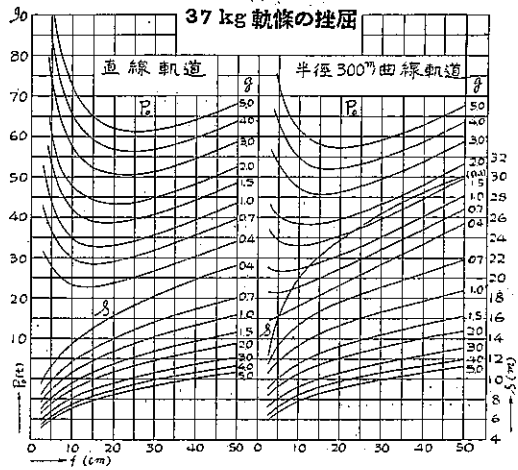
普通の軌道の道床抵抗力は軌道の状態によつて色々である。現在の軌道を略全部包含し得る値として水平挫屈に對して $g=0.4\sim 5.0\text{kg/cm}$, $r=3\text{kg/cm}$ となし P_0, f, s の関係を求めると第 43 圖の様になる。但し軌條は 50 kg, 37 kg 及び 30 kg とし軌道は直線及び半徑 300 m の曲線とした。皆挫屈形 I の場合である。

この結果によると曲線軌道の挫屈抵抗は直線軌道の挫屈抵抗より數廻少い。 g が小なる場合程この差は大きくなる。尙又曲線軌道の挫屈は直線軌道に比べ張出し量 f 小に挫屈延長 s が大になる。最低挫屈軸壓 P_0 に對する f を見るに $g=1.5\text{kg/cm}$ の時半徑 300 m の曲線では $f=10\text{cm}$ 内外で挫屈するが $g=5\text{kg/cm}$ の時直線では

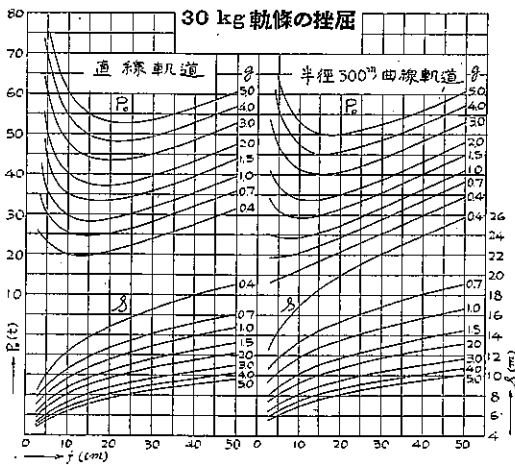
第 43 圖 (A)



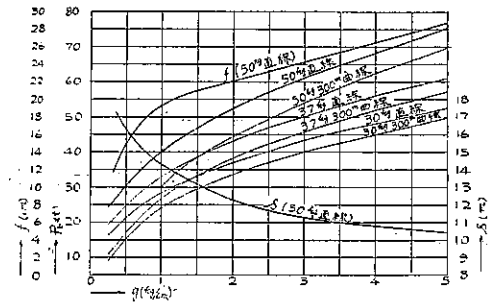
第 43 圖 (B)



第 43 圖 (C)



第 44 圖



$f=25\text{ cm}\sim 30\text{ cm}$ 内外で挫屈する。 g に関して P_0

が如何に變化するかを第 43 圖から求めて第 44 圖に示した。 g が變化するに伴つて P_0 の値が變化すると共に P_0 に相當する f 及び s も變化する。 g が増すに従つて f は大になり s は小となる。即ち挫屈軌條は g が増加する程急激なる挫屈をなす。

挫屈軌條の状態を知る爲に 50 kg 軌條を敷設した直線軌道を考へこれに形 I の挫屈が生じたとする。挫屈軌條の平衡軸壓 P は (20) 式から $R=\infty$ とし

$$P = P_0 - EF \left(\sqrt{\left(\frac{rs}{2EF} \right)^2 + \frac{\pi^2 r f^2}{4EFs}} - \frac{rs}{2EF} \right)$$

挫屈の爲に伸長する軌條の長さ x_0 は (16) 式から

$$x_0 = \frac{P_0 - P}{r}$$

挫屈軌條の両端の移動量 Z は (17) 式から

$$Z = \frac{(P_0 - P)^2}{2EFr}$$

これ等の式を用ひ挫屈軸壓を $R_k = P_0$ にとり $g = 1 \sim 5$ kg/cm, $r = 3$ kg/cm の場合の P, α, Z を求めると次の様になる。

g (kg/cm)	挫屈軸壓 $P_k = P_0(t)$	f (cm)	s (m)	平衡軸壓 $P(t)$	α_0 (m)	Z (mm)
1	40.0	19.2	14.3	25.9	67	2.4
1.5	46.7	21.0	13.2	30.3	55	3.3
2	52.5	22.0	12.3	34.4	60	4.0
3	61.1	24.2	11.3	40.0	70	5.5
4	68.2	26.5	10.8	44.3	80	7.1
5	75.2	28.1	10.4	49.2	87	8.4

α_0 の値によつて軌條挫屈の影響の及ぶ範囲は甚だ大であることを知る。

3. 曲線軌道に於ける挫屈抵抗と道床砂利掻出しの影響

(1) 曲線軌道に於ける挫屈抵抗 曲線半径が小になると軌條の挫屈抵抗は次第に小となる。

今 $g = 1.5$ kg/cm, $r = 3$ kg/cm の軌道をと直線から曲線半径 100m 迄考へる。 $f = 5, 10, 20, 30$ cm の場合の挫屈軸壓 P_0 及び最低挫屈軸壓 P_b を求めて第 45 圖に示した。

一例として 30 kg 軌條を敷設した軌道を見るに $R = 100$ m ~ 200 m 附近では $f = 5$ cm の附近で最低挫屈軸壓を示す。又 $R = 200$ m ~ 700 m 附近では $f = 10$ cm 近くで直線附近では $f = 25$ cm 近くで挫屈軸壓は最小値を示す。

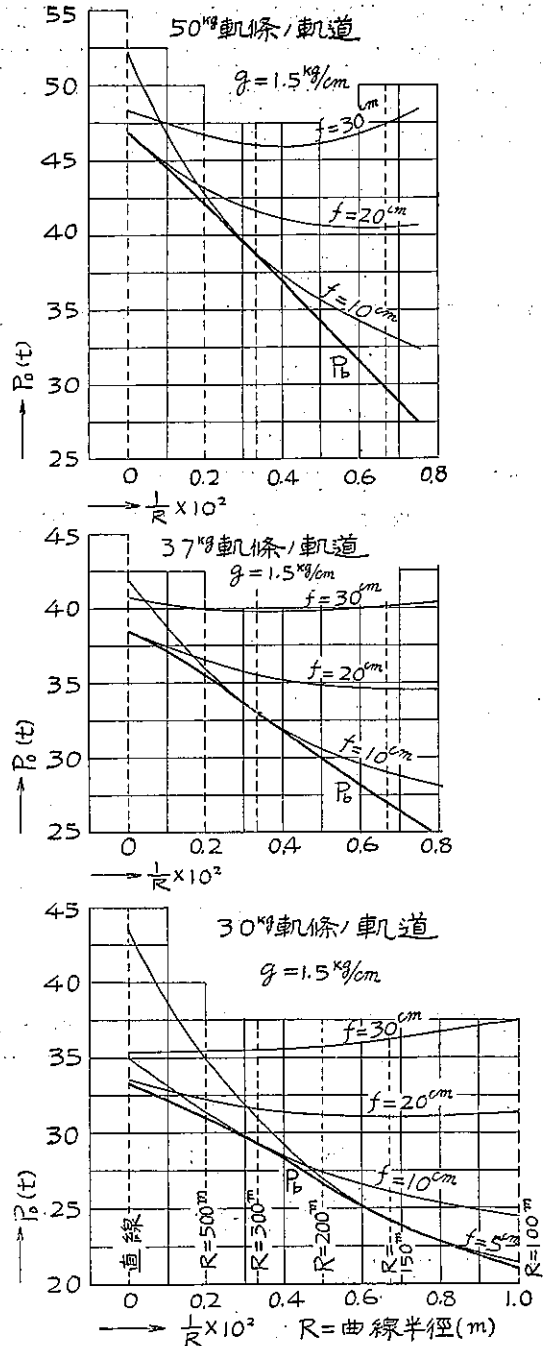
直線軌道と半径 150m の曲線軌道との最低挫屈軸壓 P_0 を比較するにその差は

- 50 kg 軌條の場合には 17.3 ton
- 37 kg 軌條の場合には 11.5 ton
- 30 kg 軌條の場合には 9.0 ton

となる。軌條重量の大なる程曲線半径が小となる爲に挫屈軸壓を減少する量が多い。

(2) 道床掻出しの影響 第 1 章第 4 節 1. に述べた様に道床砂利掻出しによつて道床抵抗は減じてく

第 45 圖



る。例へば新しい精選道床を考へると枕木露出量 d によつて道床抵抗 g は次の様になる。

d (cm)	0	4	7	10	14
g (kg/cm)	1.73	1.13	0.90	0.69	0.52

但し枕木中心間隔を 71 cm とした。これによつて道床掻出し量 d と挫屈軸壓の關係を直ちに知ることが出来る。例へばこの g に對して 50 kg, 37 kg, 及び 30 kg 軌條を直線軌道に敷設した時の P_0 を出すと第 46 圖の様になる。これが全般的に道床砂利を掻出した場合の挫屈軸壓に對する影響である。

次に局部的に道床砂利を掻出した場合の影響を近似的に求めて見る。

$g=g_0$ の時軌條横移動の仕事量 A_0 は

$$A_0 = \frac{1}{2} g_0 f s$$

$$\frac{\partial A_0}{\partial f} = \frac{1}{2} g_0 s = G_0$$

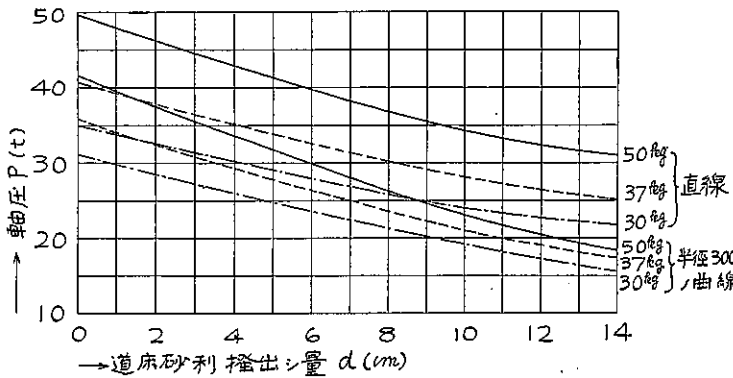
でこれに對する軌條の挫屈抵抗を P_0 とする。道床を全般的に掻出して $g=g_1$ としたとすれば

$$A_1 = \frac{1}{2} g_1 f s,$$

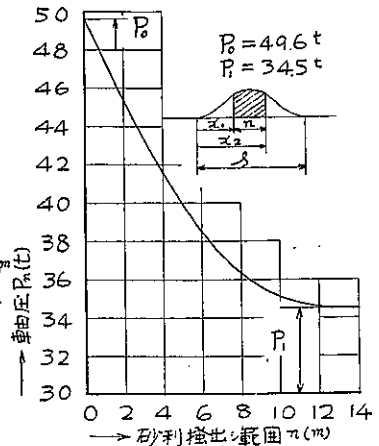
$$\frac{\partial A_1}{\partial f} = \frac{1}{2} g_1 s = G_1$$

でこれに對する軌條の挫屈抵抗を P_1 とする。

第 46 圖 道床掻出し量と最低挫屈軸壓



第 47 圖



次に道床抵抗が g_0 であつた軌道の道床を $x=x_1 \sim x_2$ に至つて掻出しこの部分の道床抵抗を g_1 とし軌條挫屈がその部分を中心として生じたとする。 $g=g_0$ の時に比べ軌條移動の仕事量は減少する。この減額を A_0' とし $x_2 - x_1 = n$ とすれば

$$A_0' = \frac{(g_0 - g_1) f}{2} \left\{ n + \frac{s}{\pi} \sin \frac{\pi}{s} (s - n) \right\}$$

$$\frac{\partial A_0'}{\partial f} = \frac{(g_0 - g_1)}{2} \left\{ n + \frac{s}{\pi} \sin \frac{\pi}{s} (s - n) \right\} = G_n$$

この場合の挫屈軸壓を P_n とすると

$$P_n = P_0 - \frac{P_0 - P_1}{G_0 - G_1} G_n$$

$$P_n = P_0 - \frac{P_0 - P_1}{s} \left\{ n + \frac{s}{\pi} \sin \frac{\pi}{s} (s - n) \right\}$$

但し s は g の變化に応じて變化すべきものであるが茲では g が g_0 から g_1 に變つても變らないとした。

例へば精選道床を新しく填充した場合 ($d=0$) $g=1.73 \text{ kg/cm}$ でこれを 10cm 挿出した場合 ($d=10 \text{ cm}$) $g=0.69 \text{ kg/cm}$ である。この道床上に 50 kg 軌條を直線に敷設したとすると最低挫屈軸壓 P_0 及びその挫屈延長 s は次の様になる。

$$g=1.73 \text{ kg/cm の時は } P_0=49.6 \text{ ton, } s=12.7 \text{ m}$$

$$g=0.69 \text{ kg/cm の時は } P_0=34.5 \text{ ton, } s=15.3 \text{ m}$$

従つて (34) 式に於て

$$P_0=49.6 \text{ ton, } P_1=34.5 \text{ ton, } s=14 \text{ m}$$

として挿出し範圍 n によつて變化する最低挫屈軸壓 P_n を求めると第 47 圖の様になる。

第 3 節 軌條の伸縮と繼目遊間

1. 軌條伸縮

第 48 圖に於て M を軌條の長さの中心、 J を繼目とする。 Δt なる溫度の變化を受けた時 MO なる部分は軌條支承體と繼目に於ける抵抗の爲に原狀を維持し、 $OJ=x_0$ なる部分のみが伸縮するとすれば MO 區間の軸壓力 P は

$$P = EF\beta\Delta t = (R) + \int_0^{x_0} r dx$$

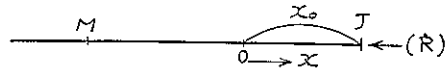
但し F は 軌條斷面積

β は 軌條鋼の線膨脹係數

(R) は 軌條と繼目鋼の間の摩擦抵抗

r は 軌條と軌條支承體の間の匍進抵抗

第 48 圖



従つてこの時軌條端 J の伸縮移動 δ は

$$\delta = \beta x_0 \Delta t - \frac{(R)x_0}{EF} - \frac{1}{EF} \int_0^{x_0} r x dx$$

r の影響は $\Delta t, (R)$ 又は軸壓 P の影響に比して小であるから概略 $\delta \propto x_0$ 一般に $\delta \propto x$ 、然るに第 4 節 2. の結果の様にならぬから $r \propto \delta^n$ であるから $r \propto x^n$ とすることが出来る。従つて

$$\delta = \beta x_0 \Delta t - \frac{x_0}{EF} \left\{ (R) + \frac{r x_0}{n+2} \right\} \dots \dots \dots (23)$$

となる。 r には δ に應じて適當なる値を入れる。簡便なる方法は r の影響は Δt 及び (R) に比して小であるから $r=0$ なる場合の伸縮 δ_1 を

$$\delta_1 = \beta x_0 \Delta t - \frac{(R)x_0}{EF}$$

から求め次にこの δ_1 に相當する r の値を求めその r による伸縮 δ_2 を

$$\delta_2 = - \frac{r x_0^2}{EF(n+2)}$$

から求むれば

$$\delta = \delta_1 + \delta_2$$

と置くことが出来る。

上記の様に $r \propto x^n$ とすると

$$P = EF\beta \Delta t = (R) + \frac{rx_0}{n+1} \dots\dots\dots(24)$$

従つて

$$x_0 = \frac{EF\beta \Delta t - (R)}{\frac{r}{n+1}}$$

今軌條の長さを L とすると x_0 の最小値は 0, 最大値は $L/2$ である。 $x_0 = 0$ なる時の温度の變化を Δt_1 , $x_0 = \frac{L}{2}$ なる時の温度の變化を Δt_2 とすると (24) 式から

$$\Delta t_1 = \frac{(R)}{EF\beta}, \quad \Delta t_2 = \frac{(R) + \frac{r}{n+1} \frac{L}{2}}{EF\beta}$$

温度の變化 Δt が $\Delta t_1 \leq \Delta t \leq \Delta t_2$ の時に於てのみ上述の (23) (24) 式は適用される。

$\Delta t < \Delta t_1$ の時には常に軌條全長に亙つて

$$P = EF\beta \Delta t$$

$\Delta t > \Delta t_2$ の時には軌條中央の壓力 P は常に

$$P = (R) + \frac{r}{n+1} \frac{L}{2} \dots\dots\dots(25)$$

で軌條の伸縮 δ は

$$\delta = \beta \Delta t \frac{L}{2} - \frac{L}{2EF\beta} \left\{ (R) + \frac{r}{n+2} \frac{L}{2} \right\} \dots\dots\dots(26)$$

となる。

2. 繼目遊間

軌道に敷設した長尺軌條は温度の上昇により伸長して間もなく遊間を零とし尙大なる温度の上昇があれば軌條端接觸壓力により大なる軌條軸壓力を受ける。普通の状態に於ては軌條軸壓力は勿論軌條長の中央で最大であつてその許容最大値は軌道負擔力を考慮し軌條挫屈を生ぜざる範圍内に於て定むべきである。

軌條に起り得る最高温度を T_m , 軌條の敷設温度を T_s , 軌條の許容最大軸壓力を P_m とする。軸壓 P_m に相當する温度の變化を Δt_p とすれば

$$\Delta t_p = \frac{P_m}{EF\beta}$$

従つて $T_s = T_m - \Delta t_p$ なる時には遊間を零として軌條を敷設すべきである。敷設温度がこれより些小にても小となれば必要な遊間は r が大なる時には急に相當の量に達する。 $(T_m - \Delta t_p)$ より低温度に於て敷設された軌條の温度が高まり遊間を盲目とし尙 Δt_0 なる温度の變化を受けて最大軸壓が P_m になつたとする。然る時は (R) 及び r による軸壓は (25) 式で與へられるから

$$\Delta t_0 = \frac{P - \left\{ (R) + \frac{r}{n+1} \frac{L}{2} \right\}}{EF\beta} \dots\dots\dots(27)$$

又

$$\Delta t_p - \Delta t_0 = \frac{(R) + \frac{r}{n+1} \frac{L}{2}}{EF\beta} = \Delta t$$

でなければならない(第 49 圖参照), T_s で敷設した軌條温度が $(T_m - \Delta t_0)$ になる時に軌條遊間が零となる様にするれば, 軌條温度が T_m に達した時丁度軌條軸壓は P_m となる。而して

$$(T_m - \Delta t_0) - T_s = \Delta t$$

としこれを (26) 式に適用して δ を求めればこれが軌條温度が $(T_m - \Delta t_0)$ に達する時の軌條伸長量である。繼目遊間 ϵ は $\epsilon = 2\delta$ であるべきであるから

$$\epsilon = \beta L (T_m - \Delta t_0 - T_s) - \frac{L}{EF} \left\{ (R) + \frac{r}{n+2} \frac{L}{2} \right\} \dots \dots \dots (28)$$

これに (27) 式を代入すると

$$\epsilon = \beta L (T_m - T_s) - \frac{L}{EF} \left\{ P_m - \frac{r}{(n+1)(n+2)} \frac{L}{2} \right\} \dots \dots \dots (29)$$

この式の計算に於ても (23) 式の計算と同様に $r=0$ とした時の ϵ_1 を求め $\delta = \frac{\epsilon_1}{2}$ に相當する r の値を定め, この r に対する ϵ_2 を $\epsilon_2 = \frac{rL^2}{2EF(n+1)(n+2)}$ から求め $\epsilon = \epsilon_1 + \epsilon_2$ として所要の繼目遊間を計算することが出来る。温度が T_s である時 ϵ なる遊間を與へて敷設した軌條温度が T となつた時の最大軌條軸壓力 P_0 を見るに $T < (T_m - \Delta t_0)$ の時には (25) 式と同様に

$$P_0 = (R) + \frac{r}{n+1} \frac{L}{2}$$

であるが, $T > (T_m - \Delta t_0)$ の時には (29) 式から

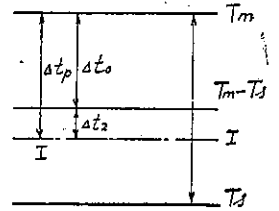
$$P_0 = \left\{ \beta L (T - T_s) - \epsilon \right\} \frac{EF}{L} + \frac{r}{(n+1)(n+2)} \frac{L}{2} \dots \dots \dots (30)$$

となる。 T_s より温度下降する時には勿論 (25) 式で與へられる。 $(T_m - \Delta t_0)$ より低温度に於る繼目遊間の變化は T を基準として Δt を測り (26) 式を用ひて計算することが出来る。即ち Δt なる温度變化により繼目遊間は $\epsilon \pm 2\delta$ となる。

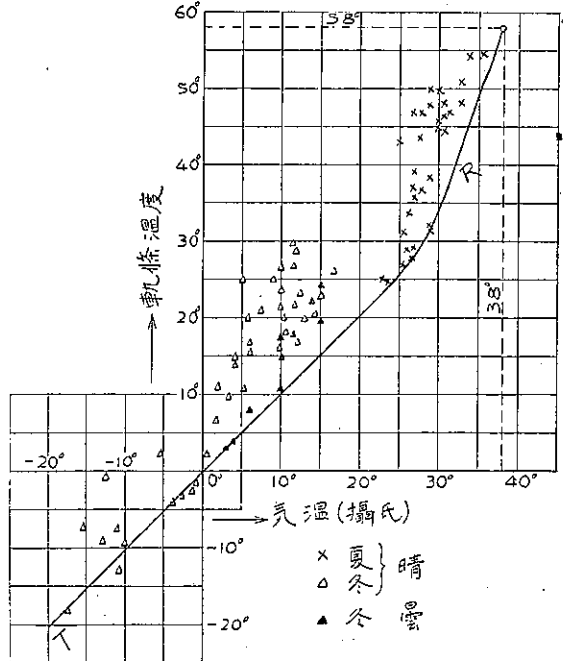
3. 軌條の温度

気温と軌條温度との關係は晴曇, 乾濕, 時刻, 季節等によつて色々變る。一般に軌條温度は気温より高い場合が多く特に太陽の副射熱を直接受ける場合に軌條温度は著しく高くなる。日本各地に於て気温と軌條温度との關係を測定した結果を一括して第 50 圖に示した。零度以上の温度は多くは午前 7 時より午後 6 時の間で測定されたものである。気温 10°C 前後の時軌條温度は 10°C から約 30°C 近くになる。これは冬期の温度であつて軌條温度が 10°C より著しく高くなるのは晴天に際し副射熱を多く受ける爲である。夏期に於ける気温 $30^\circ\text{C} \sim 38^\circ\text{C}$ に對し軌條温度は最高 58°C になる。これが軌條の受ける最高温度である。冬期寒冷の地では気温及軌條温度は -20°C 近

第 49 圖



第 50 圖



く迄測定された。多年に亘り酷寒地の各所で温度測定をなした報告にはこれより尙低き温度がある。斯様に気温に對する軌條温度は種々である。軌條敷設或は繼目遊間整正に當つては気温を測定しこれに對する軌條温度を推定して遊間を決定するのが普通である。従つて繼目遊間も気温に對して與へなければならない。気温を測定してそれに相當する軌條温度をを推定するに際してはその軌條温度に對する遊間を與へられた軌道が常に安全である様にせねばならない。例へば気温 10°C に對する軌條温度には 30°C もあるが、この 30°C を常に標準にとりこれに對する遊間を與へて軌條を敷設すれば高温の際軌條は過大の軸壓力を受ける危険がある。この場合は軌條の最低温度 10°C を取つてこれに相當する遊間を與へて軌條を敷設すれば軌道は常に安全である。即ち特定の気温に對する最低軌條温度を示す圖の TR 線を取つて常に標準とすればよい。TR 線の気温約 25°C 以下では軌條温度は気温と等しい。これ以上の温度に對しては軌條温度は気温より高くなりその差は最大約 20°C である。

4. 長尺軌條の繼目遊間

現今我國で採用されて居る長尺軌條の繼目遊間に就て考へて見る。気温の最高を 38°C これに對する軌條温度の最高を $T_m=58^\circ\text{C}$ とする。軌條の長さ斷面積及び許容軸壓 P_m を次の様にとる。

軌條	軌條長 $L(\text{m})$	斷面積 $F(\text{cm}^2)$	許容軸壓 $P_m(\text{ton})$	P_m に對應する應力 (kg/cm^2)
50 kg	25	64.35	35	544
37 kg	25	47.30	27	570
30 kg	20	38.28	22	575

上掲の許容軸壓 P_m は $g=1.5 \text{ kg}/\text{cm}$ の道床を考へる時

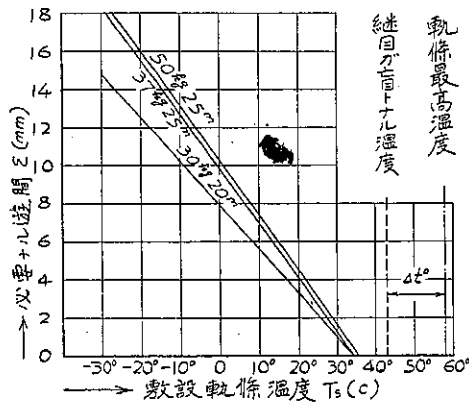
- 50 kg 軌條では 半徑 200 m の曲線
- 37 kg 軌條では 半徑 155 m の曲線
- 30 kg 軌條では 半徑 110 m の曲線

の最低挫屈軸壓 P_b に相當する値である。

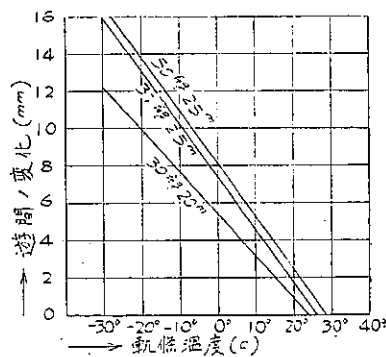
$$\beta = 0.0000114, \quad E = 2100000 \text{ kg}/\text{cm}^2$$

とし軌條と繼目鉸の間の摩擦抵抗力 (R) は列車運轉を考慮し (R)=10ton とする。

第 51 圖



第 52 圖

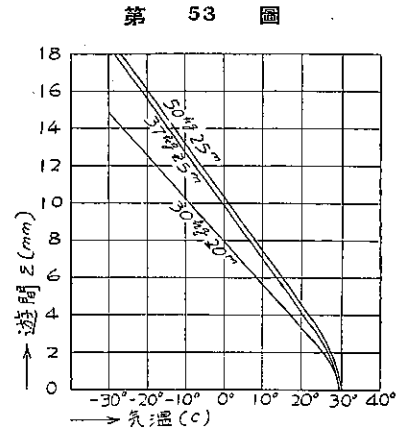


又枕木の匏進 $\delta=10\text{mm}$ に對する抵抗を $r=2.1 \text{ kg}/\text{cm}$ とし一般に δ と r の關係を

$$r \propto \delta^{\frac{1}{2}}, \quad n = \frac{1}{4}$$

とする。敷設當時の軌條温度 T_1 を基準として所要の継目遊間 ϵ を (29) 式から出すと第 51 圖のようになる。即ち軌條温度 35°C に於ては継目を盲として敷設すべきである。これによると普通内地の軌條最低温度 -5°C に於ても 25 m 軌條の継目遊間には 12 mm 以下、20 m 軌條の継目遊間には 9 mm を與へればよい。

第 52 圖は軌條温度 30°C の時継目を盲として敷設した軌條の温度が下降するに従つて如何なる遊間が現れるかを (26) 式から計算したものである。これによつて軌條温度を基準として軌條敷設をなせば長尺軌條の場合であつても継目遊間は充分小さく保つことができることが判る。然るに軌條温度と気温との間には第 50 圖の様な關係があつて気温を基準として軌條敷設をなす際には兩者の關係は TR 線の様にとらなければならない。従つて気温を基準とした場合の継目遊間は第 51 圖の横軸の軌條温度を TR 線によつて気温に換算し第 53 圖の様になる。



斯くの如き遊間表によつて軌條敷設をなせば軌條挫屈に對しては絶對安全であるが、直接軌條温度を測つて軌條敷設をなす場合より餘分の遊間を與へることが多い。例へば気温 30° の時 50 kg 25 m 軌條を敷設し遊間を零にしたとする。この時の最低軌條温度は第 50 圖に示す様に最低 35°C であるが實際は 50°C の場合もある。たまたま敷設軌條の温度がこの 50°C であつて敷設後温度が下降して -5°C になつたとする。 35°C の軌條が -5°C になつた時の遊間の變化は第 52 圖から 9.5 mm であるが、この場合 $50^\circ - 35^\circ = 15^\circ\text{C}$ に對する軌條收縮 4.3 mm が過分の遊間として現れ結局遊間は

$$9.5 + 4.3 = 13.8 \text{ mm}$$

となる。

上述の如き継目遊間を與へた軌道で種々の保線作業を行ふ場合一時的に軌道強度を減ずる。従つて時に保線作業を制限する必要が起る。然して如何なる気温の下に於て如何なる制限を受くるかは上述した所から容易に知ることができらう。