

論 說 報 告

第 22 卷 第 4 號 昭 和 11 年 4 月

軌 條 匍 進 に 就 て

會 員 工 学 士 前 橋 俊 一*

On the Creeping of Rail

By Syuniti Maebasi, E. E., Member.

要 旨

軌條に匍進の發生する理由に就ては、未だ定説と見るべきものは無い様である、特に、左右軌條が反對方向に匍進するなどに至つては、相當不可思議なる現象として、驚異の眼を以て見られて來たものであるが本稿に於ては、其の點は勿論一般の匍進現象を説明する理論に就て一つの見方を述べる。

目 次

目 次	頁
1. 緒 言	1
2. 發生狀況の概要	1
3. 従來行はれたる觀察	2
4. 考へ方	4
5. 匍進の發生	6
6. 一連りの振動系統	7
7. 匍進抵抗力	8
8. 車輪力	11
9. 匍進防止方法	15
10. 要 結	15

1. 緒 言

軌條は、多く其が敷設せられたる地盤の軟弱なる場合、軌條の縦方向に向つて移動を生じ易いものであつて、此の移動現象を匍進又は爬進(creeping, Wandern, cheminement)と謂つて居る。枕木を残して軌條だけ匍進することもあれば、枕木を伴つて全体として移動することもある。

匍進が發生すれば、軌條接目の間隔は無くなり、惹ては軌條屈撓等の原因となり、運転上危険を招く虞あるを以て、之に對して種々の防禦手段を講ずると共に、移動せるものを絶えず補正して行く必要のあるものであるが、斯る匍進の發生する理由に就ては、未だ信ずるに足る解釋が與へられて居ない様である。

以下聊か筆者の見解を述べる。

2. 發生狀況の概要

匍進發生狀況の實際に就て報告せられたる所に依れば、概して地盤の軟弱なる線路に起り、切取箇所より築堤箇所も多く、隧道内には殆ど發生しない。平坦線では列車荷重の多い方向に、勾配線ならば下り勾配の方向に多く、複線では單線より匍進が甚だしく起ると云はれて居る。曲線に於ては列車速度に對して高度の不足する場合は外

* 豊橋電氣軌道株式会社技師長、前橋工學研究所長

側軌條に多く、高度の過度なる場合は内側軌條に發生する。又多く運転速度の高い線路で起り易く、季節で云へば夏期は冬期よりも匍進が多いとされて居る。左右の軌條は同方向に匍進するのが通例であるが、場合に依つては、左右互に反對の方向に移動することすらある。

斯る現象に就て、從來如何に觀察せられ、又如何なる説明が施されて居たかを述べて置くことは、順序上必要である。即ち、以下に先づ今まで發表された代表的の數説を温ねることとする。

3. 從來行はれたる觀察

1925年 Frank Reeves 氏の發表する所 (Notes and Data on Railway Engineering, 1925) に依れば、

“複線に於ける匍進は、運輸の方向に起るのが通例であつて、時に其の例外も無いではないが、其は極めて稀であり、而も説明の出来る様な特殊な場合に限られて居る。匍進發生の最も有力なる因子は、軌道の堅固さに較べて列車荷重の大なる點にある。軌道が充分堅固であるに對して列車荷重の軽い場合は、匍進抵抗に打ち勝ち得ない故、匍進は起らないものである。列車荷重が増せば、匍進は發生するものであるが、其の發生の程度に至つては、單に列車荷重に正比例する様なものではなく、其の割合以上に甚だしいものである。昔の鐵道に於ては、左したる被害は無かつたが、近頃は甚だしくなつて來た。軌條を硬質のものに取り換へ、列車荷重を一定とすれば、匍進は減少し、又多くの場合起らなくなるものである。與つて力ある原因の一つは、停車場に近付くあたりで行はれる制動である。之は複線軌道で一般に經驗する所であつて、一線の兩側軌條には平等に匍進が起る”。

と云つて居る。

匍進の原因を制動作用に歸する考へ方は、其の後相當に有力に行はれて居たが、1932年 Baticle 氏などは (Genie Civil, Apr. 2, 1932) 制動作用に因ると云ふのは變であるとして、

“軌條と枕木との間の摩擦係数は、車輪と軌條との間の摩擦係数に比して小ではない。其上、犬釘や継手の抵抗も加はる譯であるから、制動作用位で匍進が起るものとは思へない。恐らく其の原因は軌條接目に於て車輪が其の對向端に加へる衝撃のため、水平力を生じ、軌條が車輪の重量を一杯に受ける前に、其の水平力が瞬間的に作用するのである”。

と説明して居る。

然し、軌條接目に於ける對向端の衝撃が、匍進の主原因であり得ないと云ふことに就ては、既に 1918年 F. Reeves 及び A. E. Langley 氏等も (Institute of Civil Engineers, Jan. 8, 1918) 述べて居ることであつて、Reeves 氏などは、

“若し對向端に於ける衝撃が原因であるとすれば、軌條接目の間隔の最も廣くなる寒い時期に、匍進が最も甚だしく起るべき筈であるに、凡て實際は其の反對である”。

と云ひ、又 Langley 氏は、

“軌條を仔細に檢するに、其の接目の對向端が打たれる場合は至つて少く、多くの場合は、手前側から對向端に落ちるものである”。

とて、對向端に於ける衝撃作用の効果を疑つて居る。

斯様な譯で、Baticle 氏の衝撃説に就ては、Robert Lévi 氏も (Genie Civil, Aug. 20, 1932) 反對して曰く、

“軌條は中央を不動と考へて居る様であるが、實際は不規則に動くものである。下り勾配及び停車場に於ける制動に因るものや、上り勾配及び發車點に於ける急激なる牽引などより起る所の、性質の判つた匍進は別として、多くの場合匍進は列車の進行方向に起るが、其の發生は極めて不規則であつて明確なる説明を與へることは難かしい。然し、其の原因を軌條接目に於ける衝撃にありとする説には、遂かに承服し兼ねるのであつて、其の衝撃のために生ずる水平力は、車輪の重量に比して甚だ小さく、匍進の原因としては餘りにも貧弱なものである”。

と云つて、匍進發生に就て氏の抱く温度説を主張するのであつた、曰く、

“夏汽車に乗つて居ると、軌條の膨脹より生ずる爆音を耳にすることがあるが、其は軌條の收縮する夜間よりも、膨脹する日中に多いことは、振動が此の現象を助勢するものと見える。振動のため膨脹が助勢されるのは、運動摩擦抵抗が静止摩擦抵抗より小なるためである。列車の載つた部分で振動が起り、晝間ならば其の部分で容易に膨脹が行はれることになるので、軌條は進行方向と逆に移動する傾向を生じ、夜間ならば其の部分で容易に收縮が行はれることになるので、軌條は進行方向に移動する傾向を生ずる。されば、晝夜の列車回数及び軌條に加はる応力に餘り差が無ければ、軌條の移動は互に消し合ひ、匍進は非常に僅かになるが、多くの場合、列車の進行方向に匍進が起る。匍進が起れば、或る接目は朝既に間隔を失つて居り、其の後温度が上昇すれば、著しく圧縮応力を増すものである。されば匍進を防止せんには、敷設の際少しく接目間隔を大きくして置くがよい。軌條の中央部は、温度の変化に依つて、応力の加はることが比較的少い故、其の部分に匍進止めを施すが良法である。云々”。

と主張した。

温度変化の影響に就ては、之より曩 1918 年既に F. Reeves 及び Harry Powell Miles 氏などの唱へる所であつて (Institute of Civil Engineers, Jan. 8, 1918), 其の所説を綜合すれば

“殊に寒より暑に変化する場合、匍進が甚だしく起る。気温の高い時又は高かつた後には促進される。熱に因る軌條の膨脹力は接目の抵抗力に打ち勝つて、匍進を起す力と共同して、匍進を起す力が單獨では匍進の起り得ない様な場所に於て、匍進を發生させるものである。此の點、軌道の構造が堅固で、冷熱の変化を受けない隧道内に於て、匍進の發生しない事實に符合する。同様に、枕木上面を砂利で覆はない近來の軌道方式では、砂利に依る匍進抵抗が低下することゝ太陽の直射に曝されることから、匍進が誘發されることになる。但し、それ等の影響が如何なる比例關係にあるものかは不明であるが”。

と云ふ。之から見れば先に述べた Lévi 氏の主張は幾分具体的になつて居る。

勾配の關係に就ては、C. P. Hogg 氏に依れば

“其の影響は極めて少い。匍進の傾向は下り勾配に多いが、上り勾配に現はれぬ譯ではない。頑固な匍進は 1/50 と云ふ勾配で、盈車で上り空車で下る場合に起つて居る記録がある”。

と云ふ。

又 F. Reeves 氏の發表する所に依れば、

“新規軌條は舊軌條より匍進の起り難いことを、線路工夫は云つて居るが、之は恐らく、新規軌條は其の面が粗いためではあるまいか”。

と、又曰く、

“一線の兩側軌條に起る匍進に甲乙のあることは、全く驚くべきことである。匍進が左右軌條に對して平等に起り、其の接目部が左右對稱の位置を変化することなければ、多くの場合は其の被害は無いものであり、或は少くとも急いで補正をする必要は無いものである。底面の平らな軌條では複線に於て常に内軌よりも外軌で多く匍進が起るものであるが、之は外軌寄りの枕木端の砂利の抵抗が弱いに依るものである。然し英國の實験に依れば、之が逆であつて、内軌に多く匍進が起つて居るが、其の理由は明瞭でない。單線軌道では最も複雑に起るものである。列車荷重が軽く、軌條及び枕木の止め方が完全であれば、匍進は起らないが、列車荷重が大であつて、殊に一方の荷重の大である場合は、普通極めて不規則な形で現はれるものである。即ち、或る場合は兩側軌條が同方向に、其も多きは匍進の大きさが左右違つて起り、或る場合は片側軌條だけに、或る場合は左右軌條で逆の方向に匍進の起ることがある。單線軌道の逆方向匍進に就ては、未だ満足な説明が與へられて居ない。その他、止り止めの楔を打ち込む場合、後方向に止らぬ様にすれば、前方向の匍進が起り、前方向に止らぬ様にすれば、後方向の匍進が起る。又、接目板に凹所を作つて、其處に犬釘を打つたもので、其の接目部の枕木を次の接目部の枕木に繋ぐ場合、對角線式に繋金物を取り付けば、匍進の方向が左右軌條で逆になることがある”。

と云ふ意味のことを云つて居る。

如何にも其の現象は変幻極まりなきものゝ様で、軌道技術家を如何に困惑せしめたかゞ窺はれる。其の發生原因に就て、比較的最近の發表であるが、Martinet 氏の如きは (Annale de Pont et Chaussée, Vol. 4, 1932),

“枕木の間で軌條が撓曲し、軌條の下部が引き延される結果起る現象である”。

と主張して居る。

要するに、軌條の匍進は何を原因として起るものであるかと云ふことが、はつきり判つて居ないらしいのである。然し上述のことから匍進の現はれる様子は之を窺ひ知ることが出来る故、後段に於て專見を述べる基礎として、其の要點を拾ひ出せば、凡そ次の通りである。即ち、匍進は：—

1. 地盤が軟弱であれば起り易い。
2. 切取箇所より盛土箇所に多い。
3. 隧道内には起り難い。
4. 夏期は冬期より起り易い。殊に寒より暑に変化する場合甚だしい。
5. 昔は起らなかつたが、最近によく起る様になつた (1925 年頃の話)。
6. 新規軌條は舊軌條より起り難い (1925 年頃の話)。
7. 軌條を硬質のものに取り換へれば、減少する。
8. 列車荷重が軽く、軌條及び枕木の止め方が完全であれば、起らない。
9. 列車荷重が大きく、殊に一方の荷重が加はれば起る。
10. 制動の加へられる所に起る。
11. 平坦線では列車荷重の方向に起る。
12. 勾配線では下り勾配の方向に起る。
13. 曲線では列車速度に對して高度不足する場合は、外側軌條に多く、高度過度なる場合は、内側軌條に多く起る。
14. 複線軌道の曲線では、内側軌條よりも外側軌條で多く起る。勿論例外もある。
15. 複線では單線より匍進が甚だしい。
16. 單線では起り方が複雑である。左右軌條で匍進の程度が相違して居ることがあり、甚だしきに至つては、反對の方向に匍進を起すことすらある。
17. 單線軌道に於て、軌條が後方向に迂らぬ様に匍進止めを施せば、前方向に匍進し、前方向に迂らぬ様にすれば後方向に匍進する。
18. 匍進の程度は列車荷重以上に甚だしく起るものである。
19. 枕木上面まで砂利で覆へば減少する。

と云つた様なものである。

斯様に匍進の現象は、一見洵に捕捉し難い様な外貌を有して居るものであつて、其の發生原因は如何にも複雑であるかに見えるが、其の考へ方に依つては、存外簡単な現象であることが判ることは、次に述べる通りである。

4. 考 へ 方

了解の容易である様に、先づ其の考へ方の要領を述べる。

第一に軌條に匍進を發生するのは、少くとも車輛を其の上に運転するに因るものであるから、車輛が軌條に及ぼす作用を考へる必要がある。其の作用は軌條面に對して、垂直方向のものと、切線方向のものとに分けて考へることが出来る。

垂直方向の作用は、云ふまでもなく軌條面に加はるる圧力作用であつて、車輪と軌條との間の圧力が増せば粘着力は増し、其の圧力が減れば粘着力も減ると云ふ關係にあるが、是は後に廻すことゝして、今はもう一つの切線方向の作用に注目し、此の切線方向に現はれる車輪力が、軌條に匍進を發生する根源と考へて行く。

(I) **車輪力**： 勿論軌條の匍進は、軌條の縦方向の移動であるから、軌條に働く車輪力も縦方向のものだけを考へる。之は下記の 2 種である。

- a) 軌條を車輛の進行方向と反對の方向に動かさんとする力、即ち、車輪に加はる積極的回転力及び其と同様の効果を現はす車輪力。
- b) 軌條を車輛の進行方向に動かさんとする力、即ち、車輪に加はる制動力及び其と同様の効果を現はす車輪力。

軌條に對して、積極的回転力若くは制動力と同様の効果を現はす車輪力なるものは、一軌上に固定せられたる左右兩輪が、異つた働作半径を以て軌條に沿ふて進行する場合、輪縁と軌條頭側面との間に起る競り、軸函案内其の他車臺機構に於ける競り等に依つて誘起されるものであつて、詳しく云へば、左右兩輪の半径が現實に異つて居る場合、曲線軌道通過の際、左右兩輪に就て回轉調和の關係が完全に行はれぬ場合、直線軌道に於て、車輛の蛇行運動に依つて左右偏倚が行はれ、左右兩輪の働作半径に相違を來す場合等に、起る車輪力がそれであつて、其の力は、多く左右何れか一方の車輪に現はれ、或は左右交互に現はれ、又或は左右に就て其の働く方向が逆になることもある。

即ち、上記 a) 及び b) に示す如き車輪力が有力に作用すれば、其の力の働く方向に、軌條は移動させられる傾向を生ずる譯である。

次に、是等の車輪力が如何に有力に働きかけるとしても、其が軌條に傳へられる力は、粘着力の値に依つて制限さるべきものであつて、粘着力が充分であれば、車輪力は有力に軌條面に働き得るけれども、若し粘着力が不充分であれば、積極的回転力に依つては、車輪に空転が起り、制動力に依つては、車輪は滑走を起し、結局車輪力の軌條側に傳へられるものは、粘着力の値が其の最高限を意味することになるので、茲に併せて、粘着力のことを考へなければならぬ。

(II) **粘着力**： 云ふまでもなく、粘着力の値は車輪と軌條との間の圧力に正比例し、且つ粘着係數に關係するものであり、又此の粘着係數は軌條面の乾濕汚濁の狀況に依つて、甚だ高下のあるものである。

次に上記の粘着力の値を最高限として軌條面に働く車輪力に對抗して、軌條の匍進を阻止せんとするものは、軌道側の抵抗であるから、茲に匍進抵抗力に就て考へる必要がある。

(III) **匍進抵抗力**： 此の抵抗力は、軌條が枕木と離れて單獨に動く場合は、軌條と枕木との間の摩擦抵抗力を意味し、軌條が枕木を伴つて移る場合は、枕木の前後水平移動に對する道床の抵抗力を指すことになる。軌條だけが匍進するか、枕木を伴つて匍進するかは、要するに夫々の抵抗の大小に依つて定まる問題である。

從來、“軌條と枕木との間の摩擦係數は、車輪と軌條との間の摩擦係數に比して小ではない。其の上、犬釘や継手の抵抗も加はる譯である”と云つた風の觀念に支配されて、車輛の重量まで加はつて居る姿の軌條下の摩擦抵抗力は、必ずや車輪の粘着力より大なるものであり、従つて車輪力に依つては、軌條の匍進が起るよりも先に、車輪の空転若くは滑走（以下此の兩者を總稱して滑動と呼ぶ）を生ずべきである、と云ふ様な考が行はれて居たが、實は後に述べるが如く、其の抵抗力なるものは運轉狀態に於ては却つて車輪の粘着力の値以下に低下する瞬間があり、従つて其の際、相當有力なる車輪力が働いて居るならば、當然車輪は軌條面で滑動することなく、軌條側を伴つて諸共に道床上を移動するであらうことは、想像に難くない。

即ち、車輪力 (I) が粘着力 (II) の範圍内に於て、能く匍進抵抗力 (III) に打ち勝てば、其處には必ず匍進が起ると考へて然るべきであるから、上記の 3 要素に注意すれば、匍進が如何なる場合に、如何なる形で發生するかと云ふことが、理論上推知される譯である。

5. 匍 進 の 發 生

上述のことを基礎として、匍進の發生を考へるならば、凡そ次の様なことが判る。

先づ (I) の車輪力に就て云へば

1. 列車荷重が大きく、従つて車輪力が強ければ、車輪力の働く方向に匍進が起る。即ち
2. 積極的回転力、若くは其と同様の車輪力の働く場所では、車輛の進行方向とは逆の方向に匍進が起る。又
3. 制動力、若くは其と同様の車輪力の働く場所では、車輛の進行方向に匍進が起る。
4. 直線軌道に於ける車輛の蛇行運動等に依る車輪の左右偏倚に基いて、車輪の働作半径に大小を生じたる場合、或は曲線軌道に於て、内外車輪の回転調和の關係不完全なる狀況にて運転する場合は、積極的回転力、若くは制動力の作用は、左右車輪に就て多く甲乙の出来るものであるが、斯る場合は左右軌條は自から不平等に匍進する。尙、
5. 其等の場合、一方の車輪に積極的回転力と同様なる、軌條を後方に推す車輪力が現はれ、他方の車輪に制動力と同様なる、軌條を前方に推す車輪力が現はれれば、左右軌條は自から反對方向にも匍進することになる。
6. 斯くの如く、軌條は車輛転走の條件に依つて、或る時は前方に、或る時は後方に匍進する傾向を持つものであるから、單に一方向に對してのみ匍進止めを施すも、其と反對方向の匍進の現はれ得べきは云ふまでもない。

されば Reeves 氏の所謂“昔は起らなかつた”と云ふは、昔は列車荷重が少くて、比較的車輪力が弱かつたためであるとも解せられる。

次に (II) の粘着力の點から見れば、

7. 粘着力の値が低ければ、車輪力は其の低い粘着力の値を最高限として、軌條面に働くのであるから、自然匍進を起す傾向は弱くなるものである。即ち
8. 冬期は軌條面に霜、雪等の附着することに困つて、粘着力が低下するに反し、夏期は左様のことはない故、匍進は冬期に少く、夏期に多いと考へてよい。
9. 隧道内の軌條面は、濕氣或は漏水のために、其の粘着力が低下して居る故、自然匍進を起す程有力には、車輪力が軌條に働き得ない場合が多い。
10. 硬質軌條は軟質軌條に較べて、運転中容易に粘着力を減少する傾向のあることは、拙著“波狀磨耗を通じて軌條磨耗を見る”第4章（以下單に拙著第何章と云ふ風に云ふ）に於て、述べた通りであつて、従つて硬質軌條を用ふれば、軟質軌條の場合より、匍進の傾向が少いことが云へる。

されば先に述べた Reeves 氏の“新規軌條には匍進が起らなかつた”と云ふ新規軌條なるものは、恐らく舊軌條に較べて硬質のものであつたのであらう。

次に (III) の軌道側の匍進抵抗力の方面から見れば、無論、

11. 一般に匍進抵抗力が大であれば、匍進は起り難く、匍進抵抗力が小であれば、匍進が起り易い譯であつて、
12. 埋立、築堤、濕地等の地盤の軟弱なる箇所には、運転中に起る軌條の上下振動の振幅は當然大であり、従つて軌條下の圧力を減少する程度は甚だしく、其に応じて匍進抵抗力も減少する故、斯くして匍進抵抗力の低下した瞬時、車輪力が打ち勝てば匍進が起る。
13. 夏期は氣温の高いため濕潤で、比較的降雨量の多いに對し、冬期は氣候寒冷のため乾燥し、又大地が凍結する等のことから、一般に夏期は冬期よりも、地盤が軟かくなつて居り、従つて前掲の理由に依つて匍進が起り易い。殊に寒より暑に移る季節は、一般に雨量の多いものであるから、其の頃匍進の多く起り易いことは、想像に難くない。
14. 枕木上面に及ぶ程、砂利を撒布すれば、少くとも枕木の移動に對する抵抗は増大して、匍進の發生を抑止する方の出来るものである。

上述の事は、凡そ匍進發生の實際を示して居るものであるが、多くは其の理由が平易であつて、蛇足的解説を

加へる必要を認めないが、唯“何故軌道の匍進抵抗力が存外弱いものであるか”と云ふことゝ、“匍進を起すべき車輪力が、實際それ程複雑に働くものであるか”と云ふ問題は、説明を要する大切な点であると思ふから、以下項を逐ふて説述する。

即ち、先づ、車輛が軌道上を運転する時の振動に依つて、車輪と軌條との間の粘着力、及び軌條側の匍進抵抗力が、如何に変化するものであるかを説明し、次に、軌條側の匍進抵抗力なるものが、從來考へられて居た様に左程有力なものではないと云ふ點に就て述べ、最後に、車輛転走の際現はれる車輪力が、軌條を或は前方に、或は後方に押し遣る種々相に就て記すことにする。

6. 一連りの振動系統

軌道と車輛との組合せを力学的に考察すれば、先づ最下部よりして、路盤は一種の弾性体と見ることが出来るものであつて、其の上に道床砂利が撒布され、枕木が横へられてあり、其の上に發條の如き性質を有する軌條が敷設されてあるものであるから、軌條には本然的に上下振動を發生する（拙著第 8 章第 3 節参照）。其の上に車輪を載せれば、軌條側は多少たりとも歪を生ずるものであるから、車輪も亦本然的に上下振動を行はなければならぬ（拙著第 6 章第 1 節参照）。其の又上には、擔彈機を通じて車体が載つて居るのであるから、此の車体も亦當然上下振動をなすものである（拙著第 8 章第 1 節参照）。

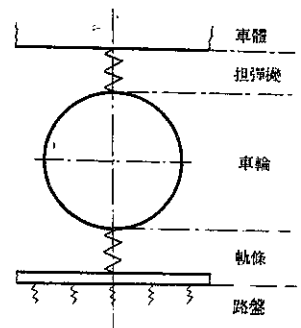
謂はゞ路盤と云ふ護護体の如きものゝ上に軌條と云ふ發條が横へられ、其の上に車体を發條で支へた車輪が載つて居る、と云ふ姿のものであつて、上下振動する物体が下から云つて、路盤、軌條、車輪、車体と 4 段に重つて居り、運転中振動のエネルギーが供給される限り、其の各部は、嚴密に云へば勿論聯成状態ではあるが、兎に角絶えず上下振動を行つて居るのである。斯る振動に依つて相近寄つた接觸部に於ては圧力が増加し、相遠ざかつた接觸部に於ては圧力が減少するものである。

例へば、車輪と軌條とが相近寄る如き振動の位相に於ては、其の接觸部の圧力を増加し、従つて其の粘着力を増大し、次の瞬時、相遠ざかる如き振動の位相に於ては、其接觸部の圧力を減少し、従つて其の粘着力を低下するものである。

又例へば、軌條と枕木若くは道床との間に就て云へば、軌條が下方に寄る如き振動の位相に於ては、其の下方の圧力を増加し、従つて摩擦抵抗力、即ち匍進抵抗力を増大し、次の瞬時、軌條が上方に離れる如き振動の位相に於ては、其の下方の圧力を減少し、従つて摩擦抵抗力、即ち匍進抵抗力を低下するものである。

振動の位相に依つて勿論一概には云ひ得ないけれども、凡そ軌條の振動を中心として考へるならば、其の振動が相對的に上向きになることは、粘着力を増加し、匍進抵抗力を減少することになり、其の振動が相對的に下向きになることは粘着力を減少し、匍進抵抗力を増加することになる。されば、振動の振幅が相當に大であれば、振動が上向きになつた瞬時、低下の位相にある匍進抵抗力が、其の時増加の位相にある粘着力を通じて、軌條面に働く有力な車輪力に負ければ、茲に匍進が發生する譯である。而して、其の振幅は地盤の軟弱なる場合、軌條の可撓度の大きな場合、列車荷重の大きな場合、列車速度のhigh 場合等には、當然大であり、従つて斯る場合匍進が起り易いことになる。

斯くて、1 回の車輪の通過に依つて起る匍進の實相は、振動に依つて匍進抵抗力の低下した瞬時に發生する間



歇的のものであつて、其の 1 回の匍進量こそは微小であるとしても、其は無数の列車の通過に依つて積算され、總ては有力なる匍進と果成するものである。

軌條に生ずる摩擦磨耗に就ては、既に拙著“波状磨耗を通じて軌條磨耗を見る”に於て論述せし通り、粘着力が減少して車輪に滑動の起る場合を主として注目すべきであるが、匍進現象に就ては、上とは凡そ反對の位相である所の、粘着力の増加と匍進抵抗力の低下する場合に就て、考へて行けばよい譯である。

7. 匍 進 抵 抗 力

匍進抵抗力は先にも述べた通り、(1) 軌條と枕木との間の摩擦抵抗力と、(2) 枕木の移動に對する道床の抵抗力と、此の二つが直列に働いて、車輪力に頡頏して居るのであつて、其の直列になつた何れかの抵抗力が、車輪力に負けることになれば、其の負けた部分を界として、上方が匍進を起すことになる。

(1) 軌條と枕木との間の摩擦抵抗力： 軌條を枕木に固定する犬釘は、假令充分注意して之を堅く打ち込むも、車輪の通過に従つて、間もなく抜き緩められて來るものである。此の場合、犬釘に働く力は相當強力なるものであつて、若し其が螺旋式スパイクであれば、枕木の木質を強引に破壊してまで、其を抜き緩めて來る程である。車輪が犬釘を抜き緩める作用に就ては、凡そ次の 3 通りを考へることが出来る。

其の 1 は、道床地盤が相當軟弱なる場合に起ることであるが、軌條上を車輪が通過する時、其の荷重に依つて軌條は撓み、枕木を下方に押し下げ、荷重が去れば、軌條は直ちに無負荷原位に反撥復歸せんとして、犬釘を通じて枕木を急激に上方に引き揚げる作用をなし、此の場合、枕木は其の慣性のため置き去りにされる傾向が出來、茲に犬釘は抜き緩められて來る。此の作用は、地盤の軟弱なる程、又運転速度の高い程、激しいものである。

其の 2 は、道床地盤が相當堅固なる場合に起ることであるが、枕木の中間に車輪が來れば、軌條は隣接の兩枕木を支點として彎曲するものであつて、其のため其より先の方の枕木部分では、軌條は耳上りになつて、犬釘を通じて枕木を釣り上げる作用を現はして來るものである。それも、靜止状態に於て負荷せられたものとして、軌條の彎曲程度を計算すれば判ることであるが、其の耳上りの量は極めて僅少であつて、其が直ちに枕木を釣り上げ様とは考へ得られない故、低速度の場合は別に大したことはないと思へるが、相當高速の場合、相次で來る車輪に依る反撥負荷のため、彎曲の振幅が増大されれば、自然犬釘を抜き緩める作用が現はれて來るものと考へてよい。

其の 3 は、車輪々線の側圧に依つて軌條が外方に拗られて、内側に打たれた犬釘が抜ける傾向のあることである。内側の犬釘が緩めば、自から外側の犬釘も緩んで來るものである。其に前述の作用が加はれば、益々犬釘は抜け出す譯である。

次に之は犬釘が抜け出すことではないが、恰も其と同様の結果を呈するもので、それは車輪荷重のため枕木材質が押し潰され、軌條が枕木面に減込みて、犬釘の頭の下が隙くことがある。殊に腐朽した枕木を長く用ふる場合に甚だしいものがある。

何れにしても、軌條は一般に敷設後遅かれ早かれ犬釘に緩みを生じ、其の儘では枕木の上に只置かれた様な姿になり勝ちのものであつて、此の場合、犬釘は多く軌條の左右移動に對する抵抗を呈するのみで、匍進止めの施されて居ない軌條は、僅かに枕木との間の摩擦抵抗力で支へられて居るだけであると考へて差支へない。

斯る軌條上に機關車若くは電車が乗れば、それ等の重量のためにも一見相當な摩擦抵抗力が、軌條と枕木との間に現存する様に思へるが、其は靜止状態に於ける考へ方であつて、實際は振動に依つて軌條下の圧力が減少す

る瞬時があるもので、其の瞬時、軌條下の摩擦抵抗力は存外小さなものとなつて、其が車輪力に抗することが出来ずして、匍進を發生すると云ふ順序になるのである。此のことは拙著第 11 章に於ても述べて置いた通り、機關車なり電車なりの粘着力が、其の車輪に加へられる積極的回転力若くは制動力に比して、設計上一見相當有力である様に見えても、其の實、振動に依つて其の粘着力は絶えず変動して居るものであるから、振動のため車輪下の圧力が減少する瞬時、粘着力が不足して容易に車輪の瞬時的滑動が起つて、軌條面に所謂微かなる波狀磨耗を生ずると云ふ事からでも、容易に匍進の現象は類推されることであつて、車輪の滑動の場合は、車輪から上方に屬するものが軌條面の摩擦抵抗力(粘着力)に打ち勝つて、軌條面を沁ることであり、軌條の匍進の場合は、軌條から上方に屬するものが軌條下の摩擦抵抗力(匍進抵抗力)に打ち勝つて、枕木面を沁ることであるから、其の發生の理論は兩者に於て別段変りはない。唯重量の點から云つて、匍進の場合は滑動の場合より軌條の重量だけ多目に過ぎないのであつて 假りに 50 kg 10 m 軌條としても左右 2 本で約 1 t であるから、其に載る車輛の働輪上の重量數十噸に比して僅かに數十分の一が加はるだけである。又軌條と枕木との間の摩擦係数は、車輪と軌條との間の摩擦係數に較べて或は幾分多いであらうとも、その事よりも圧力その者の減少の方が著しく行はれることであるから、摩擦係數の僅かな高下などは、最早問題ではないことになる。即ち、振動に依る軌條の相對的位置に依つて、軌條下の摩擦抵抗力が容易に粘着力以下に低下し得べきことは想像に難からず、従つて車輪が軌條面を滑動するが如く、軌條が枕木面を沁ることは常にあり得べきことである。

振動に依つて摩擦抵抗力を減ずる理論に就ては、拙著“彈性変位と固體摩擦⁽¹⁾”に於ても簡単に述べて置いたが、元來 2 物体間の沁りなる現象は、振動に依つて接觸圧を減少せる瞬時、即ち摩擦抵抗力の低下せる瞬時、沁らせんとする外力に負けて、間歇的に起るものであつて、假令其の沁らせんとする外力なるものが甚だ有力であつて、殆ど連続的に沁るかに見える様な場合でも、尙接觸圧の高くなつた瞬時には多く沁らず、其とは反對の位相である所の接觸圧の低くなつた瞬時多く沁ると云ふのが、その真相である。又、沁らせんとする外力が僅かに摩擦抵抗力に打ち勝つ位に加はつて起る所の沁りは、云ふまでもなく一般に停止と運動の交番に依つて行はれるものであつて、この事は車輪が軌條上を転走する場合で云へば、停止は車輪の粘着回転を意味し、運動は車輪の滑動を指すことになり、斯くて粘着回転と滑動とが交番に行はれて、所謂波狀磨耗を軌條面に印して行くことからも容易に了解されることであるが、要するに物体の沁り移動は振動に依つて変動せる摩擦抵抗力の最小値以上の外力が加へられれば行はれるものであるから、例へば相當重量ある機械でも、之を運転せしめて何等かの振動を發生せしめれば、割合軽き力を以てしても床上を移動せしめ得ることは、機械製作工場等に於て吾人の常に經驗する所であるが、軌條と枕木との間の摩擦抵抗力も運転中振動に依つて変動して、其の最小値は存外低いものとなる故、其の低下した瞬時に軌條が枕木上を沁つて匍進が起る。其の低下の程度は云ふまでもなく振動の振幅に依つて一定ではないが、彼の重い車輛を負ふた車輪でも、其が軌條に對する圧力は、理論上零に甚だ近付くことのあるべきを見れば、軌條と枕木との間の匍進抵抗力の低下する程度は、蓋し思ひ半ばに過ぐるものがあらう。

(2) 枕木と砂利との間の匍進抵抗力：次に、軌條が枕木に固く取付けられてある場合はどうかと云へば、車輪力は軌條と枕木との間の沁りを起す代りに、枕木と砂利との間の沁りを起す様に転嫁されて来る。

枕木の全部に對して、犬釘が完全に軌條を締め付けて居れば、軌條の移動に伴つて其の軌條に附屬する全部の枕木が砂利を推すことになるので、其處には相當大なる抵抗力が現はれるものである。先づ單なる枕木の重量だけを計算して見ると、其の寸法を $150 \times 200 \times 2135 \text{ mm}^3$ として、1 本の重量は約 48 kg、10 m 軌條に對して枕木

(1) 土木學會誌 第 21 卷 第 7 號

15 挺と考へれば、其の總重量は約 720 kg であるが、これだけでは車輛重量に較べて誠に軽量なものである。次に、軌道方向に於ける枕木の移動に對する砂利の抵抗であるが、其に就ては全く異つた 2 通りの考へ方を試みる。其の 1 は、枕木間の砂利が一塊となつてズルズルと推し遣られるものと考へるのである。實際はそれ程激しい匱進が短時間に現はれるものではなく、之は謂はゞ最大限の匱進抵抗力と考へてよい（無論特別な匱進止めを施していない場合の話である）。其の 2 は、枕木に加はる車輪力が枕木が積まれた砂利から受ける側圧に少しでも打ち勝てば、匱進が起ると云ふ考へ方であつて、實際の匱進は目に見えぬ程小刻みに行はれるものであるから、初めの考へ方よりも此の方が恐らく實際に近いであらうと思ふ。

第 1 の砂利が一塊となつて推される場合から云へば、砂利の盛り加減に就ては、國有鉄道の軌道整備心得第 85 條に“道床は枕木の厚さ 1/3 以上を露出せしめざる様、常に之を補充すべし”とあるが、今之を普通の標準と考へて枕木の厚さ 2/3 が砂利に埋つて居るものとすれば、軌條長さ 10 m に對する枕木間の砂利の量は、 $(10000 - 200 \times 15) \times 150 \times 2/3 \times 2 \times 135 \text{ mm}^3 \approx 1.5 \text{ m}^3$ であるから、砂利の單位容積の重量を 2.5 t とすれば、總重量は約 3.75 t、之に軌條重量 1 t と枕木重量 0.72 t を加算すれば、其の總計は約 5.47 t と云ふ見當になる。斯様なものが一塊として其の下に敷かれてある砂利面に沿ふて、車輪力に依つて水平に推される譯であつて、例へば、軸重 15 t の 4 軸の機關車が、1 組の 50 kg 軌條上に懸つて居るものとすれば、上述せる軌條側の重量は、其の上にある機關車の重量に對して、約 10% 程に當ることになるが、運転中に起る振動の振幅次第にて、砂利面に於ける抵抗力は、軌條上に發揮される車輪力に劣る瞬間もあり得ると考へられる。是は定盤の上に 1 枚の鉄板を載せ、其の上で物体、例へば鉄球を水平に曳く場合、極めて靜かに之を曳けば、鉄板と定盤との間の摩擦力は、鉄球と鉄板との間の摩擦力より、鉄板の重量に依つただけ大であるから、鉄板は定盤上に走り動を起すことはないが、振動を與へながら鉄球を曳けば、其に伴つて鉄板も亦定盤上で程度の差こそあれ矢張り曳かれて行くことが觀察される。此の現象は、鉄球の重量が鉄板の重量に較べて大なるに従つて著しいものであるが、軌條の場合も全く之と同様に考へることが出来る。

以上は先にも述べて置いた通り、匱進止めの施されて居ない軌道に就て、考へられる最大の匱進抵抗力であるが、次には其より幾分實際に近いであらうと信ぜられる所の、枕木正面に於ける砂利の呈する圧力に就て述べる。

軌道方向に於ける枕木の移動に對する砂利の抵抗は、砂利に接觸せる枕木の側面の高さを h 、枕木長さを l 、砂利の單位容積の重量を w とすれば、略 $1/2 h^2 lw$ 以て表はし得ることが、靜止状態に於ける實驗結果から云へる。先の場合と同様に、枕木の厚さ 150 mm の 2/3 が砂利に埋つて居るものとすれば、枕木 1 挺に對する砂利の抵抗は約 26.5 kg、即ち 15 挺に對する總抵抗は約 400 kg となる。之は云ふ迄もなく靜止状態に於けるものであるが、運転に依つて振動が與へられれば、抵抗は上の値から多少変動するであらうが、匱進に對する實際砂利の抵抗力は此の程度と考へてよい。此の外に、軌條と枕木との重量の和である約 1720 kg と云ふものに依る摩擦抵抗力が働いて居る譯である。前の 400 kg と云ふ砂利の水平方向の抵抗力は、一般の摩擦抵抗力の場合の様に、之を垂直方向に働く所謂重量に引き直して考へることは難しい故、後の軌條と枕木との重量の和 1720 kg との間に如何なる關係の割合があるかは、摩擦係数の如何と振動狀況に依つて一概には云ひ得ないが、等價垂直重量として其の最大値を推すれば、凡そ 3 t 程になるものと思つてよい。斯うした見方から行けば、軌條側の重量は、其の上にある機關車の重量 60 t に對しては、正に 5% 程にきり當らぬことになつて、運転中に起る振動の振幅次第にて、軌條下の水平方向の抵抗力は、軌條上に發揮される車輪力に劣る瞬間が出來て來ると考へて差支ないのである。

即ち、前の考へ方にせよ、後の考へ方にせよ、重量の點から云へば軌道側の迂りに與る部分と云ふものは、車輛側に較べて存外輕少なものであることが云へる。而して、各部分の接觸部位に圧力の變動さへなければ、無論一番圧力の少い又摩擦係數の低い軌條面で車輪の迂りが起るに定つて居るが、實際には先にも述べた通り、運転に基く振動のために常に各接觸部位の圧力は上下に變動して居るものであるから、圧力の低下した瞬時、既に摩擦係數の多少などは問題でなくなり、何れの接觸部位にせよ低い圧力に下り、少しでも抵抗力の不足した所が出来れば、其の瞬時其の部位で車輪力に負けることに依つて迂りが起ることになるのであつて、其が車輪と軌條との間で起れば、吾人は之を車輪の滑動と呼び、軌條下で起れば、之を軌條の匍進と名付けるに過ぎない。車輪の滑動は軌條面の磨耗を招來し、軌條の匍進は軌條の移動となつて吾人の注意を惹くまでであつて、其の發生の真相を凝視すれば、正に同態のものである。

されば幾分でも軌條下の抵抗力が、常に車輪と軌條との間の摩擦抵抗力より勝れて居る様な状況にあるならば、迂りは必ず車輪と軌條との間で起つて、決して軌條下で起ることはない。云ひ換へれば、斯様な状況では匍進は起り得ないものであつて、例へば、隧道内に於ては濕氣或は漏水のため、軌條面の摩擦係數は甚だ低下して居るので車輪の滑動は起り易く、軌條の匍進は起り難いと云ふことになる。因みに、隧道内に起る車輪の滑動が如何なる程度に甚だしいものであるかと云ふ點に就ては、拙著第 II 章第 3 節を参照せられたし。

又匍進防止に就て、Reeves 氏の云ふ如く、砂利を枕木上面まで深く撒布した様な場合で云へば、假りに枕木上 50 mm 程も砂利で覆ふものとして、第 1 の軌條、枕木及び枕木間の砂利が一塊となつて迂りに對する抵抗を現はすものとすれば、軌條重量が 1.0 t、枕木重量が 0.72 t、砂利の重量が 8.28 t で其の總和は約 10 t と云ふことになる。又第 2 の枕木に對する砂利の側圧と云ふ考へ方で行けば、靜止狀態の勘定で此の側圧が約 1.6 t、其の他に軌條と枕木、及び枕木上の砂利の總重量が約 2.52 t 是だけのものが働いて居る譯である。之で見ると、砂利を枕木上面まで盛らない場合に較べて、軌條側は約 2 倍の抵抗を呈することになるので、或は此のために、僅かにも車輪と軌條との間の摩擦抵抗力以上の抵抗力を保持し得るならば、匍進は發生しなくなるものである。

其に反して、振動に依つて軌條下の抵抗力の甚だしく變動する様な場合には、其が低下して車輪力に負けた瞬時には、當然匍進が起り得ることになるのであつて、例へば地盤の軟弱な場合とか、運転速度の高い場合には、自然振動の振幅も増大されて軌條下の圧力變動は甚だしくなり、従つて匍進を發生し易くなるものである。

8. 車 輪 力

軌條の匍進は車輪力の働く方向に起る。是が原則である。即ち、匍進は車輪力の作用せぬ場合とか、車輪力の働きと逆の方向などに起るべき性質のものではない（溫度の激変で高温の時軌條の接目が無くなる程押し遣られ、低温になつて勾配などの關係から原位に復歸し得ないと云ふ様な、又鉄橋などで桁受ローラーの位置などに依つて、車輛負荷に依る軌條の彎曲移動が前後對稱に行はれ難いと云ふ様な、特殊な場合を論じて居るのではないことは云ふまでもない）。又匍進は匍進抵抗力が車輪力に負けた場合に發生するものであるから、勿論車輪力の増加に比例して起るものではないことも明かである。以下聊か如何なる形の車輪力が働くものであるかを述べる。

車輪に積極的回転力が加はれば、軌條は後方向に推され、制動力が働けば軌條は前方向に推され、其の推される方向に匍進が起ることは、既に述べた通りである。唯積極的回転力の場合には、其が強過ぎれば車輪に空転が起つて前進不能に陥る故、一般に餘り強く加へることは控へられるが、制動の場合には其が強過ぎても前進不能に陥るなどの制限はないので、勢ひ過度になり勝ちである。普通の場合でも加速は減速の半分位になつて居る。され

ば積極的回転力より制動力の方が、一般に軌道に作用する力は甚だ強力であると考へてよいので、軌條の磨耗が制動の行はれる部分に多く起る様に、匍進も亦何れかと云へば制動の行はれる部分に多く現はれることは自然である。殊に制動の際に發生する激震は、軌條下の抵抗力を減殺するに與つて大なる力あることも、併せて注意されなければならない。

實際運転の場合は、上述の車輪力は左右兩輪に就て一般に相等しくなく、狀況に依つては、其の働く方向が相對して現はれて來ることもあるから、従つて匍進も其の現はれ方が單純でなく、種々相を示すことになるのであつて、下には特に其等に就て説明が進められる。

(1) 左右兩輪の直径の相違：説明の簡單のため、先づ車輪の輪鉄踏面が円錐形をなすものとする。1軸上に固定された左右兩輪の直径が異つて居る場合、直線軌道上に於ては、大輪側が進み過ぎ小輪側が其に追隨し得ないため、車軸は小輪を中心として進行方向に振り廻はされる如くなるべきであるが、實際の車輛に於ては、他にも別の車輪車軸が存在して居て軸函案内に於ける競り、車臺機構の競り等に依つて、車輪車軸は單軸運転の如く勝手に動き得ない許りでなく、輪縁の存在するため、其が軌條頭内側面と競り合つて、強制的に軌條方向に眞直に進行することを餘儀なくせしめられるものであるから、車軸の振れの發生しない限り、或は車輪に空転か若くは滑走が、或は軌道に後方向匍進か若くは前方向匍進が起らなければならない。今車軸に振れの發生せぬものと假定し(事實多少の振れが起るとしても、無制限には起る譯はないので、結局振れが起らぬものと假定しても、此の場合同じではあるが)、軌條下の抵抗力が車輪の粘着力以下に低下して居る時を考へれば(以下別段に断り書をせずとも、此の條件を以て論じて行く。軌條下の抵抗力が車輪の粘着力以上である場合は、云ふ迄もなく、軌條側に匍進を起すことはなく、車輪に滑動を生ずる場合であるからである)、一般に大輪側の軌條に後方向匍進が起るか、小輪側の軌條に前方向匍進が起るか、若くは其の兩者が同時に起るかすることに依つてのみ、車輪は軌條に沿ふて進行し得るものである。

而して、此の場合、車輪に積極的回転力が働いて居れば、進む大輪側の軌條に後方向匍進が起り、制動力が加へられて居れば、遅れる小輪側の軌條に前方向匍進が起つて、車軸の位置を或る程度補正し乍ら進行するものである。

(2) 曲線：1軸上に固定せられた兩車輪は、曲線軌道を通過するに方つて摩擦抵抗を減少する目的を以て、其の輪鉄踏面に若干の勾配を附して円錐形となし、曲線通過の際に起る遠心力作用に依つて、車輪を外方に移動せしめ、内側軌條に於ては小半径部分に於て、外側軌條に於ては大半径部分に於て回転せしめ、なるべく車輪位置を軌道中心線に對して直角に保つことの容易である様、作られてあるものであるが、實際は輪鉄踏面の勾配が輪縁まで制限されて居ること、殊に輪縁喉部に或る半径が與へられて居ることに依つて、曲線通過の場合、一般に車輪が外側軌條に寄り切つて、輪縁喉部に於て回転するため、上述の回転調和の關係は完全には行はれ得ないのが通例である。回転調和の關係が完全に行はれないとすれば、自然一方の車輪は進み過ぎ、他方の車輪は遅れることになつて、進み過ぎる車輪側の軌條には後方向匍進を起す如き車輪力が働き、遅れる車輪側の軌條には前方向匍進を起す如き車輪力が働くものである。此の場合車輪に積極的回転力が働いて居れば、進む車輪側の軌條に後方向匍進が起り易く、制動力が加はつて居れば、遅れる車輪側の軌條に前方向匍進が起る傾向が出来るのである。

即ち、左右兩輪の直径が相違して居なくとも、曲線軌道に於ては其と同様なる理由に依つて、軌條に匍進を招來するものであつて、此の場合は、先に述べた場合に於て“大輪側”と云つた言葉を“大直径に働作する車輪側”と直し、“小輪側”と云つたのを“小直径に働作する車輪側”と改めさへすれば、先の場合に説明したこと

が其の儘適用出来るのである。即ち、曲線軌道に於て内側軌條は車輪を恰も大直径に働かせ、外側軌條は車輪を恰も小直径に働かせる関係があるからである。

半径 R なる曲線軌道を、内側軌條上の直径 D_1 、外側軌條上の直径 D_2 なる車輪が運転する場合、兩車輪が軌條に接觸する點の間隔を G とすれば、

$$\frac{D_1}{D_2} \approx \frac{R - \frac{G}{2}}{R + \frac{G}{2}}$$

の如何に依つて、或は直径 D_1 の方の車輪が大直径に働き、或は小直径に働くものであつて、此の不等式の兩邊が相等しい場合、左右兩輪の直径が相違して居ても、結果としては所謂同直径に働かせるものである。

此の D_1 、 D_2 の値が如何なる程度のものであり、従つて如何なる半径の曲線に於て、何れの側に如何なる方向の匍進を發生すべきものであるかに就て、以下に説述する。

先づ車輛が曲線を通過する場合、其の遠心力作用に依つて運転上の危険を生ぜぬ様、一般に外側軌條には適當の高度が附せらるべきであつて、總重量 W なる車輛が半径 R なる曲線を速度 V で運転する時、車輛に働く重力 W と遠心力 WF^2/gR との合成力の方向が軌道の中心線上に来る様、軌條には其に應ずる高度を附與することが、理論上要求されて居るけれども實際の場合、運転速度に對して高度に過不足のあるのが通例であつて、例へば、國有鐵道に於ては、曲線上で車輛が停止し、又は極めて低速度で進行する場合を考慮して、高度の最高限度を定めて居るから理論上其れ以上の高度を要する線路では、當然高度に不足を來すことになるのである。又転轍器に附帶する曲線には高度の附せられることはなく、且つ一般に車輛の通過に際しては、軌條は左右幾分共不同の沈下を生ずるもの故、斯様の場合には結局遠心力作用に依つて、車輪は護輪軌條があれば其れ一杯に、護輪軌條が無ければ輪縁一杯に、外側軌條に向つて寄り切るものと考へられるから、外側車輪と外側軌條との接觸は、輪鉄踏面の円錐部で行はれると云ふよりは、寧ろ輪縁喉部と軌條頭内側角の曲面に於て行はれ勝ちのものであると見て差支ないことは、實際の曲線軌條に於ける磨耗のし方からでも判ることである。

次に曲線を通過する車輪の側圧ほどの程度のものであるかと云ふに、之は曲線半径、運転速度、車輛の種類等に依つて差異のあるものであるが、例へば實例に就て見るに、S. Timoshenko 及び B. F. Langer 兩氏が米國 Great Northern 鐵道 Cascade 線の 2.2% 勾配線の直線部及び 2.5° 並に 10° 曲線部分に於て、175 t 1-D-1 型及び 260 t 1-C+C-1 型電氣機關車、176 t 2-8-2 型、217 t 2-10-2 型及び 180 t 2-6-0+0-8-0 型蒸汽機關車の 5 種に就て、運転中の車輪圧を實測した結果に依れば、速度 18.5~46 km 毎時に於ける車輪側圧は、靜止時の輪重に對して、45~71% あつたと報告されて居る。又 G. L. Fowler 氏の實驗に依るに、87 t 2-8-0 型蒸汽機關車の側圧は、平均して靜止時の輪重の 64% と云ふのも其の一例である。是等の値は單に遠心力の関係だけで見れば可なり大き過ぎる様に思へるけれども、實際は車体の垂直軸に就ての同転慣性の影響、並に車輪が曲線に横はる場合、車軸の中心線が軌條と直角にならぬため、輪縁と軌條との間に競り合が起つて、旁々斯様に側圧が増大されるものと考へられる。而して、上述の側圧の値が靜止時の輪重の 45~71% に及ぶと云ふ機關車は、何れも先導輪で曲線に對する衝撃を緩和する様になつて居る種類のものであつて、普通の電車の如く先導輪の無いものでは、恐らく其の側圧は靜止時の輪重の 100% 近くにも及ぶことのあることは推測に難くない。

輪重は理論上垂直圧の平均値に相當するものであるから、車輪と軌條との接觸に就て考へるには輪重を考へればよい。今輪重を N とし、側圧を L とすれば、車輪と軌條との接觸は水平に對して $\varphi = \tan^{-1}(L/N)$ の傾斜を

なす面で行はれることになるから、假りに上述の如く、側圧が輪重の 71% と云ふ場合は、 $\varphi=35^\circ$ であつて、接觸部の形が解れば、車輪の働作直径は計算で出て来るのである。

そこで輪鉄の円錐形踏面より輪縁に移る喉部の形であるが、之は工作上或る曲面が與へられて居るものであつて、其の曲面の半径は新規の場合、國有鉄道の例で云へば 14 mm 電氣協會の標準で云へば 11.5 mm であるが、磨滅した車輪では 10 mm 位のものもある。其に對して、軌條頭部の頂面から側面に移る角の曲面部分の半径は、軌條製造所の型に依つても、軌條重量に依つても相違はあるが、凡そ 25 kg 以上の軌條で云へば、新規の場合大略 6~10 mm であつて、其が磨滅すれば自然輪縁喉部の半径に接近して来ることは云ふまでもない。即ち、外側軌條に於ては、車輪と軌條は斯うした部分で接觸する。

今輪縁喉部の半径を 11 mm として計算すれば、外側軌條に對して $\varphi=35^\circ$ の傾斜面で接觸する時の車輪の働作直径の増加は、喉部に於て約 4 mm、之に踏面の勾配に依る直径の変化を加算すればよい。即ち、踏面の勾配を 1/20、輪縁と軌條との水平間隙を各側 6 mm 宛とすれば、車輪が中正位置より 6 mm だけ一方へ偏倚すれば、踏面勾配に依つては左右車輪に對して ± 0.6 mm の増減がある。今車輪の直径を 790 mm とすれば、内側車輪の直径 D_1 は $790-0.6=789.4$ mm で、外側車輪の直径 D_2 は $790+0.6+4=794.6$ mm である。尙車輪が軌條に接觸する點の間隔 G を軌間に一致するものとして 1067 mm とすれば、先に掲げた式によつて、斯る車輪の直径に對して回轉調和の關係が満足に行はるべき限界の曲線半径 R が得られる。即ち、162 m と云ふ數が出て来る。依つて此の場合、半径 162 m 以上の曲線に於ては、外側車輪が大直径に働作し、其以下の曲線に於ては、内側車輪が大直径に働作することを示すものであつて、其に對して積極的回轉力が働いて居れば、大直径に働作する車輪側の軌條に後方向匍進が多く起り、制動力が働いて居れば、小直径に働作する車輪側の軌條に前方向匍進を多く生ずるものである。而して、此の限界半径なるものは曲線半径並に運轉速度に對する高度の過不足、或は車輛の性質等に基く側圧狀況、車輪の直径、軌間等に依つて、著しい相違のあることは、よく念頭に置く必要がある。

上述せる限界半径なるものを基準として、起り易い匍進を表示すれば、下記の通りになる。

車 輪 力	曲 線	
	限界半径以下の曲線に於て	限界半径以上の曲線に於て
積極的回轉力の働ける場合	内側軌條に後方向匍進が起り易い	外側軌條に後方向匍進が起り易い
制動力の加はれる場合	外側軌條に前方向匍進が起り易い	内側軌條に前方向匍進が起り易い

軌條下の抵抗力が充分であつて、軌條に匍進の起らない場合は、車輪力は車輪の粘着力に向つて働きかけて来るので、其の結果は車輪の滑動となり、軌條面には磨耗を生ずるに至るものであり、其の磨耗の波長が短かければ、所謂波状磨耗となつて、吾人の前に車輪力の働いて居る狀況を如實に展示して来るものであるから、波状磨耗の曲線に現はれる狀況からでも、上記の如き匍進が軌條下の抵抗力の劣勢な條件の下に、發生すべきであることが容易に了解される。

(3) 車輛の蛇行運動：車輪踏面の形が円錐形を爲して居るため、1 軸上に固定せられた兩輪は、直線軌道を走行する場合、必然的に蛇行運動を行ふものであつて、其が 2 軸の單車に組成されてあつても、亦ボギー車に組成されてあつても、或は又其の車輛が列車に編成されて居ても變りはない。

單軸車輪の自由走行の場合は、其れ自身に於ては、何等の車輪力をも發生することはないが、並行して其の位置を固定せられた 2 軸以上の組合せに於ては、1 軸の方向轉換は直ちに他軸に其の影響を及ぼし、相互に其の運動を牽制することになるから、單軸車輪の如く自由には蛇行運動は行はれない。列車に編成されて聯結機を通じ

て各個の自由運動が制限されても同様であつて、斯る場合必ず各軸の自由蛇行運動を阻止する如き車輪力の現はれるものである。(拙著“鉄道車輛に於ける蛇行運動力の理論”参照*) 而して、其の車輪力の軌道方向の分力は、車輪に加はる積極的回転力若くは制動力と、或は相加はり或は互に消し合つて、軌條に複雑なる匍進を發生させる原因となるものである。殊に蛇行運動の左右偏倚に基く車輪の働作直径の変化は、先に“左右兩輪の直径の相違”の項で述べた通り、或は左軌條を匍進せしめ、或は右軌條を匍進せしめ、合成車輪力の働く方向に従つて、或は前方向に、或は後方向に匍進を生ぜしむることは、容易く了解されることである。

而して、拙著に於ても述べてある通り、蛇行運動の位相は多く軌道の左右高低曲線の出口等の軌道状況に依つて決定されるものであるため、軌道に沿ふて車輛は常に偏倚状態を一定する傾向のあることは、波状磨耗の發生状況に依つても明かであり、従つて同一軌條部分に於て同一性質の車輪力が反覆作用することも推するに難からず、斯くて假令 1 回の匍進量は測定し得ざる程微量であつても、通過する無数の車輛に依つて、寔ては著しい匍進となつて現はれるであらうことは云ふまでもない。

要するに、匍進を生ぜしむべき主なる車輪力は、積極的回転力と制動力とであるが、其等が作用する方向は夫々常に定まつて居り、又左右兩軌條に對して略平等に働くものであるが、上述せる三つの場合、即ち、左右兩輪の直径の相違、曲線通過、或は蛇行運動を原因として發生する車輪力は、其等が作用する方向と大きさは、時と場合に依つて必ずしも一定ではなく、又左右兩軌條に對して一般に不平等であつて、それ等に先の積極的回転力なり、制動力なりが重疊して、或は相加はり、或は互に消し合つて作用する時、其處に現はる匍進は相當複雑なものと考へて差支へなく、従つて一方向の匍進を阻止する如き手段を取る時、豫期せぬ反方向の匍進が現はれて、人を驚かすこともあるが、其の理由は上述の通り決して不可思議なものではない。

9. 匍進防止方法

畢竟するに、軌條の匍進は車輛の發揮する車輪力が、軌條の匍進抵抗力に打ち勝つて起るものであるから、實際問題として車輪力を無くすることの出来ない以上、其の防止方法としては匍進抵抗力を増加するより外はない。即ち、それには凡そ従來行はれて居る様な施設でよい。上述の所から如何なる場合に匍進が起り易いものであるか推知されるが、特に車輪力の強力なるべき部分並に軌道の軟弱なる部分に於て、其の防止施設が必要である。然し軌條面の粘着係数の比較的少い部分では、時に其の必要を認めないこともある。

10. 要 結

(1) 下部より云ひて、路盤、砂利及び枕木、軌條、車輪、車体の一連りの系統は、運転中振動のエネルギーを供給されて常に或る上下振動を行つて居るが、各部の振動周期並に位相は必ずしも一致して居るものではないので、各部間の圧力は相當亂脈に変動して居るものと考えてよい。斯くて、路盤と枕木(正確に云へば路盤上の砂利と枕木)或は枕木と軌條との間の圧力が減少して、即ち所謂匍進抵抗力が減少して、軌條と車輪との間の粘着力より低くなつた瞬時に、車輪力が作用して匍進抵抗力に打ち勝てば、其處に匍進が發生する。

(2) 匍進抵抗力は軌道が軟弱であるとか、運転速度が高いとかの理由に依つて、振動の振幅の大なる場合に低下し易く、砂利の量の少い場合に貧弱であり、殊に軌條がよく枕木に固定されて居なければ、一層さうである。

(3) 車輪力の主なるものは、積極的回転力と制動力とであるが、左右兩輪に直径の相違があるとか、曲線を通過する場合とか、或は蛇行運動を行ふ場合などには、競り合のため車輪力を發生するものであつて、是等が重疊し

* 電氣學會雜誌第 55 卷第 6 册第 563 號 p. 548.

て、或は相加はり、或は相消し合つて作用するものであるから、因つて現はれる匍進は相當複雑な形となり、或は右軌條に、或は左軌條に、或は兩軌條に、或は前方向に、或は後方向にと、一見端倪すべからざるものある如きも、結局は車輪力の結果に過ぎない。

(4) 匍進防止方法としては、従來行はれた様にして匍進止めを設けて、匍進抵抗力を軌道に與へるより外はない。

(5) 本文の理論に依つて、如何なる場合に如何なる方向の匍進が起り易いかが判る筈であるが、特に車輪力の強力に働く部分、軌道の軟弱なる部分に、匍進防止設備が入用である。