

地震による新幹線脱線後の編成挙動の模型実験

○[機]鈴木 史比古 [機]佐々木 浩一 (東日本旅客鉄道)

Experiments on Derailment Behaviour of a High Speed Train

○Fumihiko Suzuki, Koichi Sasaki (East Japan Railway)

Using a 1/87 scaled model, some experiments for showing the derailment behavior was carried out in order to explain the phenomenon that Joetsu Shinkansen Toki 325 as a trainset came to a stop without knife-edge buckling in spite of the derailment under the condition of Niigata pref. Chuetsu Earthquake. The derailment behaviors have different causes depending on the position where the resistance force of derailment is loaded. When the resistance force as a brake force is loaded on the rear vehicle, which resistance force is greater than those on other vehicles, the trainset can stop without buckling while the vehicles except the rear one are pulled backward. In another experiment, it is shown that the front wheelset derailment of the front vehicle has the most serious influence on derailment of other wheelsets.

キーワード: 安全性, 車両ダイナミクス

Key Words: safety, vehicle dynamics

1. 序論

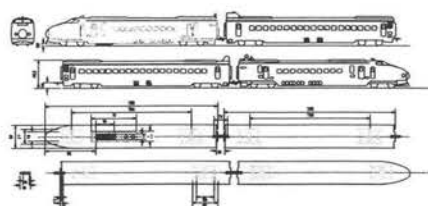
最高速度 300km/h の高速鉄道が、欧州諸国や日本に留まらず、韓国、台湾、中国など世界各地で営業を開始し、今後もさらに路線拡大していくと考えられる。高速鉄道を取り巻く沿線の自然環境条件として、欧州諸国とその他の相違点には、大規模地震に遭遇する可能性があるかどうかがある。

2004 年 10 月、新潟県中越地震により新幹線が高速運転中に脱線した。この地震以前から構造物には地震対策を施されており、橋脚・高架の崩落は免れた。高速列車の脱線事故を想定すれば、列車座屈が発生し、大きな車両逸脱につながることも考えられる。しかし、上越新幹線は 200km/h の高速で最初の脱線発生後、停止するまでの約 1600m の間で、半数以上の輪軸が脱線したにもかかわらず編成として列車座屈を起こさず、大きな車両逸脱なく停止した¹⁾。先

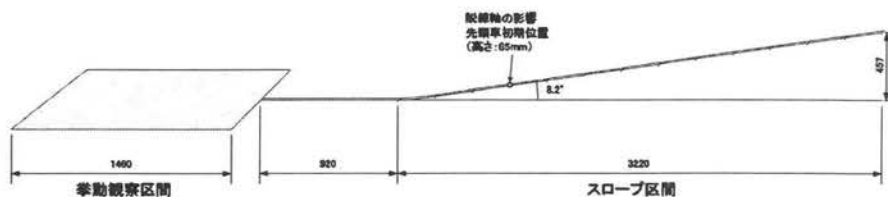
頭車の先頭軸前に装備されていた排障器と先頭車輪がレールを挟み、ガイドとなり車両の逸脱を防いだとされているが、上越新幹線が列車座屈せずに停止できたメカニズムを解明することが必要である。

本研究では、前方車両の脱線による締結装置の破損でレールがなくなったスラブ上に脱線し走行した後方車両が、編成全体に正常に動作する非常ブレーキより大きな制動力を生じ、編成全体として連結器に引張力が作用した状態で減速し停止した、という仮説に基づき、一連の脱線現象におけるブレーキ力の作用と連結の影響を把握するために、1/87 模型の編成列車を用いて、脱線後の挙動を模擬した走行実験を行った。また、1 輪軸の脱線が他の輪軸の脱線にどのような影響があったか、その後、編成がどのような挙動を示したか、さらには脱線車輪がレールに角度を持って衝突した場合の挙動などについても実験を行った。

本論文では、これらの実験結果について述べる。



a. 1/87 縮小模型



b. 実験装置概要

図 1 模型車両および実験装置

2. 模型車両および実験装置

模型車両は 200 系新幹線の 1/87 HO ゲージ模型(真鍮製)である(図 1a)。本実験では、限られた実験スペースの中で車両相互にはたらくブレーキ力の作用と連結の影響を実現するため、最大 5 両編成とした。また、一方の先頭車両床下に天然ゴム製シートを装備し、この車両を先頭あるいは最後部とすることにより、脱線後に編成中に偏在するブレーキ力を模擬した。

実験装置は、位置エネルギーを利用し、列車を走行させるスロープ区間、脱線後の挙動を観察する平板の挙動観察区間から構成されている(図 1b)。スロープ区間は HO ゲージ(17mm)のレールを敷設し、最大高さは 457mm、スロープ距離は 3250mm、傾斜角 8.2° である。挙動観察区間はレールのない平板とした。

3. 実験結果

3.1 ひとつの輪軸の脱線が他に及ぼす影響

新潟県中越地震による新幹線の脱線では、その脱線痕から脱線したすべての輪軸が同時に脱線しているのではなく、地震動により幾度かの脱線が数秒間のうちに発生していることが報告されている¹⁾。一連の脱線の形態としては、地震動によるロッキング脱線および軌間拡大を伴う脱線があるとされている。本実験では、ひとつの輪軸が脱線した後に、その他の輪軸、台車、車両でどのような状態が発生するかの確認を行った。

走行条件を統一するためにスロープ区間の一定の位置に 5 両編成の先頭を合わせ、編成中のある 1 輪軸を脱線させた状態でレールが存在するスロープ区間を走行させ、その列車挙動を観測した。走行開始前に予め脱線させた輪軸は、先頭車(1 両目)、中間車(3 両目)、最後部車(5 両目)の各 4 軸である。

走行開始時に脱線させた輪軸の条件および走行開始後の脱線輪軸を表 1 に示す。輪軸の名称は、各車両とも進行方向前位から第 1 軸、第 2 軸、第 3 軸、第 4 軸とする。走行

前に脱線させた輪軸を◎、走行開始後に脱線した輪軸を●で示す。

(1) 先頭車・先頭軸(第 1 軸)を脱線させた場合

先頭軸を脱線させて走行を開始すると、走行開始直後から第 2 軸以降も脱線し始め、その後、次々と後方の車両の輪軸も脱線し、車両は前位の車両から最後部車両まで連結により連鎖的に横転した(図 2)。



図 2 先頭車・先頭軸を脱線させた場合

先頭車・先頭軸(第 1 軸)の脱線は、他のすべての輪軸と比較して、編成に与える影響は最も特徴的である。本実験により、先頭軸の脱線は、編成全輪軸の脱線、全車両の転落につながることが示された。先頭軸(第 1 軸)の脱線では前方に連結が存在せず、脱線した輪軸にはたらく抵抗力だけが車輪をレールから遠ざける方向にはたらき、第 2 軸の脱線、つまり先頭台車の脱線に至る。その後も脱線し

表 1 走行開始時および走行後の脱線輪軸

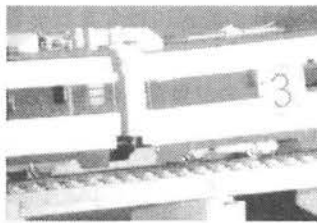
(◎:走行前に予め脱線 ●:走行中に脱線)

走行開始時		走行開始後の脱線輪軸													
脱線車両	脱線軸	1 両目				2 両目	3 両目				4 両目	5 両目			
		1	2	3	4	全軸	1	2	3	4	全軸	1	2	3	4
先頭車両 (1 両目)	第 1 軸	◎	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	第 2 軸		◎												
	第 3 軸			◎	●										
	第 4 軸				◎										
中間車両 (3 両目)	第 1 軸						◎	●							
	第 2 軸							◎							
	第 3 軸								◎	●					
	第 4 軸									◎					
最後部車両 (5 両目)	第 1 軸											◎	●		
	第 2 軸												◎		
	第 3 軸													◎	
	第 4 軸														◎

た第1軸・第2軸には、車輪をレールから遠ざける方向に抵抗力がはたらき続け、先頭車前部の自重がはたらき、第3軸、第4軸の脱線とその後に続く大きな列車逸脱、さらには転落に至ったと考えられる。また、2両目の車両の逸脱・転落は、1両目・2両目の連結により、1両目に引っ張られる形で発生しており、2両目以降の脱線・逸脱・転落には、連結の影響が非常に大きいことも確認できた。

(2) 偶数軸を脱線させた場合

偶数軸(第2軸あるいは第4軸)を脱線させて走行を開始した場合は、図3に示すようにその他の輪軸はレール上に残り、模型列車は編成全体としてはそのまま走行した。先頭車の場合でも、前述のように第1軸を脱線させた場合は転落に至るのであるが、第2軸を脱線させた場合は、第1軸はレール上を走行し続け、編成全体としても転落せずに走行し続けた。



中間車・第2軸を脱線させて走行させると、
その他の輪軸は脱線せず、編成全体としては
そのまま走行

図3 偶数軸を脱線させて走行させた一例

このように偶数軸の脱線は、その他の輪軸の脱線にはつながらない。これは、図4に示すように奇数軸の脱線によって生じる抵抗力は脱線をより助長する方向にはたらくのに対し、偶数軸の脱線によって生じる抵抗力は脱線した車輪をレールに近づける方向にはたらいていることが考えられる。偶数軸脱線の特徴は、編成内全てにおいて同様であった。

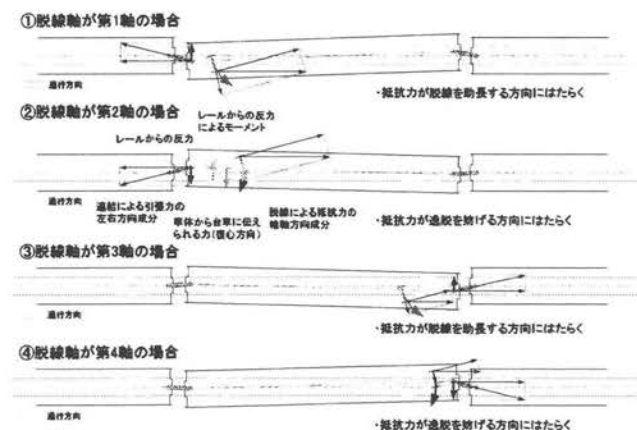
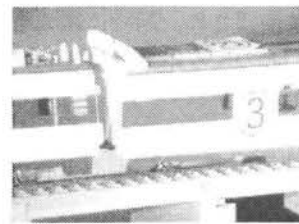


図4 中間車の脱線軸が他の輪軸等に及ぼす影響

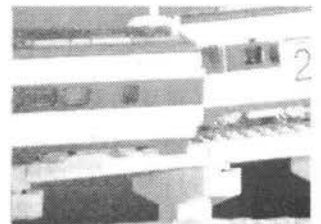
(3) 先頭軸以外の奇数軸を脱線させた場合

先頭軸以外の奇数軸、すなわち先頭車以外の第1軸ある

いは第3軸を脱線させ、走行を開始した場合は、図5に示すように、走行開始直後に、同一台車内のもう1輪軸も脱線したが、模型列車は編成としては横転することなく走行し続けた。



中間車・前位台車は、レール上
に残ってそのまま走行



中間車・後位台車は、走行開始
直後に第4軸も脱線したが、両
側車両との連結により編成とし
てはそのまま走行

図5 中間車・第3軸を脱線させて走行させた一例

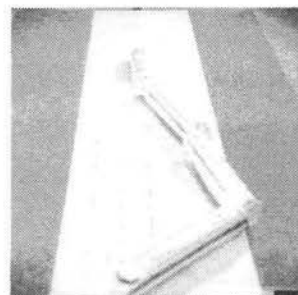
奇数軸の脱線の場合は、先頭車・先頭軸と同様に、抵抗力が脱線車輪をレールからより遠ざける方向にはたらく。それと同時に、両側車両との連結による引張力が車体全体を復心する方向にはたらく、中間車はレール上に残ったまま走行を続けた。しかし、この連結による車体の復心力は、同一台車内のもうひとつの輪軸(偶数軸)の脱線を防ぐだけの力の大きさはなく、その輪軸は脱線したものと考えられる。

3.2 ブレーキ力が負荷される車両の位置が脱線後の列車挙動に及ぼす影響

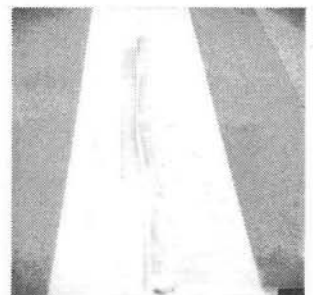
先頭車あるいは最後部車にブレーキ力となる抵抗(天然ゴム製シート)を装備した4両編成模型列車を、スロープ区間で可能な範囲の速度で走行させ、挙動観測区間における脱線後を模擬した状態での挙動を観測した。

(1) 先頭車にブレーキ力を負荷した場合

先頭車に抵抗を負荷した場合、2両目が平板上に達した直後から列車座屈が発生し、その後、座屈は拡大し続け、図6aのように編成全体として大きく軌道中心線から逸脱した。



a. 先頭車両に抵抗を負荷
列車座屈を伴って停止



b. 最後部に抵抗を負荷
列車座屈を伴わず停止

図6 先頭車両または最後部車両に抵抗力を負荷した場合の模型列車の停止状態

(2) 最後部車にブレーキ力を負荷した場合

前述の仮説を検証するため、最後部車に抵抗を負荷して平板上を走行させた。平板上に進入した先頭車および2両目は、一旦座屈を開始する。この現象は2~3両目の車両に関しても認められるが、最後部車が平板上に達すると、各連結部分は座屈状態から直線状に伸ばされ、同時に編成全体も座屈状態から引き戻され、図6bのようにほぼ直線状に復元し大きく逸脱せずに停止した。

先頭車に抵抗を負荷した場合、2両目が平板上に達した際に発生する左右方向への微小変位がその後の座屈方向に影響を及ぼしていることが考えられる。

また、最後部車に負荷した抵抗は、編成全体を後方に引っ張るブレーキ力として効果的にはたらき、一旦座屈を開始し始めた連結装置および編成全体をほぼ直線状に引き戻せることが確認できた。このことは、上越新幹線脱線においても後方車両の脱線によるブレーキ力が編成全体を引き伸ばす方向にはたらき、大きな列車座屈、さらには車両逸脱を免れた可能性を示唆していると考えられる。

3.3 脱線車輪がレールを乗り越える際のレールと車輪の角度

列車座屈が発生し車両逸脱に至るには、車輪がレールを乗り越える状況が発生し、その場合、車輪はレールに対して平行ではなく角度を持って衝突することが考えられる。

衝突角度および車両速度を変化させることにより、その後の挙動がどのように遷移するかを確認した。平板上に、レール長手方向に対して角度を持たせて固定した角柱(レールを想定)に車両1両を突入させたとき、その後の車両の挙動を観測した。

レールと衝突する速度が小さい場合、車両はレールに沿って走行するが、速度が大きくなると、ある条件下におい

ては、図7のように、前位台車・第1軸の車輪は角材を乗り越えて、その後、後部台車車輪が角材に沿って走行したところ、車体は横転した。

4. 結論

大規模地震による高速鉄道への被害を軽減する対策を研究²⁾する一環として、編成車両に作用する自連力の影響およびブレーキ力の作用について縮小模型実験を行った。その結果、

- (1)HO ゲージ模型車両のような単純構造の連結器の場合でも、列車座屈に与える影響を実験的に模擬できることがわかった。
 - (2)先頭車・先頭軸の脱線は、他のどの輪軸の脱線よりも脱線後の編成全体としての列車挙動に大きな影響があることがわかった。また、偶数軸の脱線によって生じる抵抗力は脱線した車輪をレールに近づける方向にはたらくており、その他の輪軸の脱線には大きな影響はない可能性があることがわかった。
 - (3)最後部車にブレーキ力が負荷された場合、編成として列車座屈を回避して停止することが確認できた。また、逆に先頭車にブレーキ力が負荷された場合は、編成は列車座屈を起こし、大きな車両逸脱に至ることが確認できた。
- 以上より、今後はより現実性・定量性のある縮小模型実験および数値シミュレーションによる検証を実施することにより、高速鉄道の脱線・列車座屈に関する編成列車の挙動について、研究を進める。さらにこれらの研究を基に緊急時のブレーキシステム開発につなげる予定である。

参考文献

- 1) 航空・鉄道事故調査委員会：鉄道事故調査報告書・I 東日本旅客鉄道株式会社 上越新幹線浦佐駅～長岡駅間 列車脱線事故, 2007.
- 2) 佐々木浩一, 鈴木史比古：高速鉄道車両の脱線挙動解析, 第17回交通・物流部門大会 TRANSLOG'08, 2008

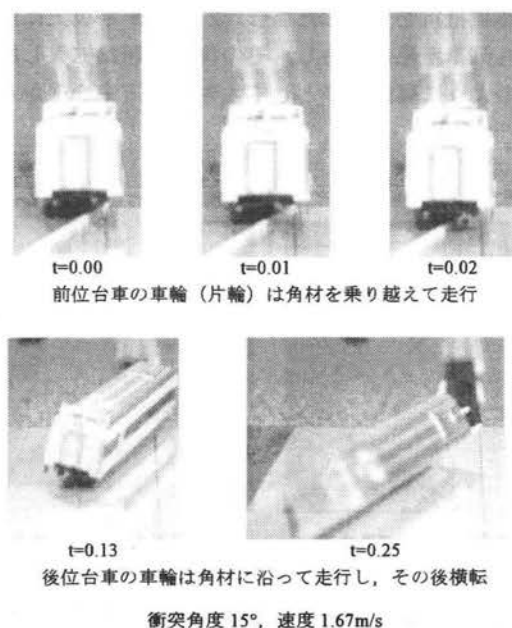


図7 レールに対する突入角度に関する実験