

(71) 鉄道レールの座屈による地震時地盤歪の推定

東京工業大学総合理工学研究科 (学) ○高橋 成典
同 (正) 大町 達夫
同 (正) 年縄 巧

1. はじめに

長大構造物の耐震設計において、地震時の地盤歪は重要な要因である。これに関連し、強震動によって鉄道レールが屈曲し横方向にはらみ出す現象がよく知られているが、これはレールが地盤の圧縮歪によって座屈を起こしたものと考えられる。本研究では、これらの屈曲被害を起こしたレールが地震時にどのような挙動を示しながら座屈にいたるのかを実験的に検討するとともに、棒状金属の座屈荷重算定式を用いて、実際の被害例においてレールに働いたと思われる座屈荷重を算出した。最終的に、この荷重によってレールに発生する歪量を、その地点で起きた地震時の動的地盤歪として推定してみた。

2. 過去の事例

これまでにレール屈曲の被害例は数多く確認されている。その数例を写真1～写真3に示す。地震によるレールの屈曲被害は、古くは写真3に示したサンフランシスコ地震でも見られている。この他にも最近にいたるまで、1964年新潟地震(M7.5)、1978年宮城県沖地震(M7.4)、1983年日本海中部地震(M7.7)などの地震においては多くの被害例が報告されている。

写真1の兵庫県南部地震、写真2の福井地震の被害例について、これらの地震で発生している他の例も含め、断層などとの位置関係を図1、図2に示す。これらの図からも見て取れるように、これらのレール屈曲被害は大抵、断層付近においてよく発生している。またレールと断層の位置関係については、多少の角度があり平行でないように見える。このほかに個々の被害例に注目した場合、座屈部両端においてレールが路床と固定されていたというケースが多いのが特徴的であった^{1) 2)}。

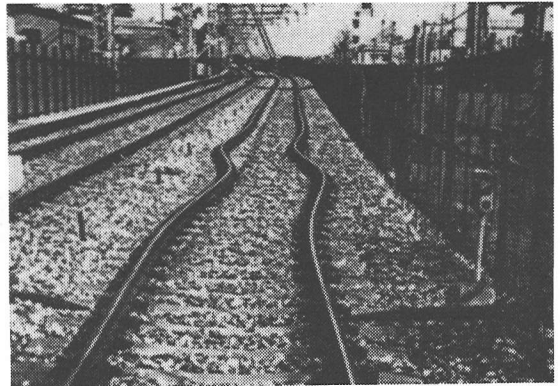


写真1 1995年兵庫県南部地震(M7.2)での例

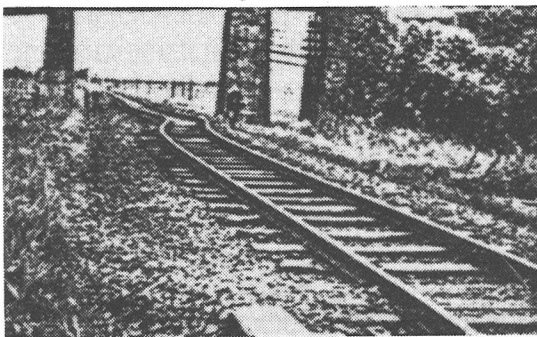


写真2 1948年福井地震(M7.3)での例

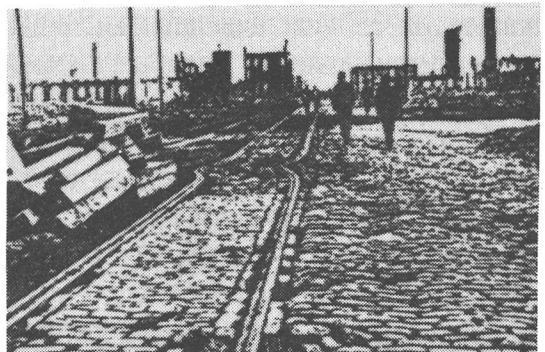


写真3 1906年サンフランシスコ地震(M7.8)での例

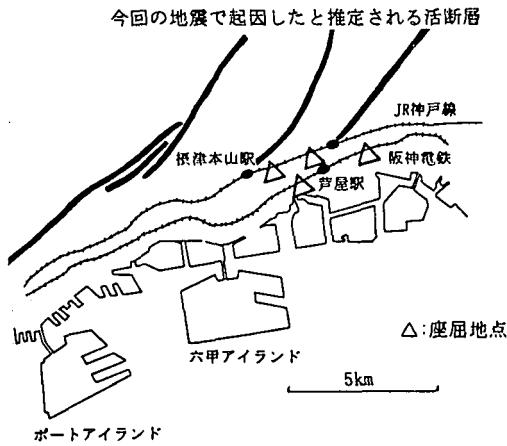


図1 1995年兵庫県南部地震での被害発生状況

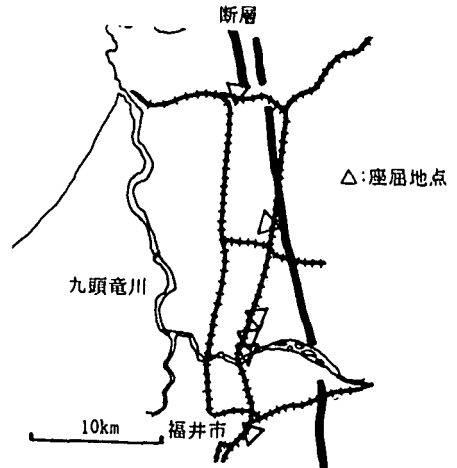


図2 1948年福井地震での被害発生状況

3. 棒状金属の座屈実験

これらのレール屈曲がどの様に起きるのかを確認するため、模型実験を行った。実験装置の概略図を図3に示す。この実験装置は図3に示した振動部が図4の波形のように振幅を増しながら振動するため、様々な周波数の動的圧縮力を供試体に与えることができる。この装置を用いて、動的な圧縮力による座屈を静的座屈と比較し、座屈に至るまでの過程やその座屈形態の違い、また座屈荷重への影響などを考慮することによって、地震時のレール座屈のメカニズムを調べた。

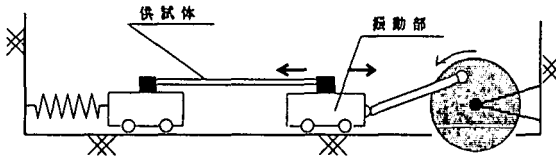


図3 実験装置概略図

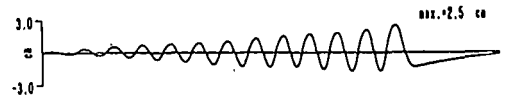


図4 振動部における変位波形

模型実験では、実物に相似なモデルを用いることが必要になるが、種々の制限を考慮した上で幾つかの前提を設けた。まずレールのモデルとして、1本の棒状金属を用いた。本来、実物の線路においては2本のレールが枕木によって剛結、拘束されている。このことの座屈荷重への影響を調べるために予備実験を行い、もう一つの大きな要因である底面摩擦力の影響と比較した。この結果、前者の影響は十分小さいと判断できたため、1本の供試体による実験を行った。また供試体としてアルミと真鍮で、それぞれ径0.8mm、及び1.0mmの合計4種類の金属パイプを使用した。実際の線路で路床、枕木間に働いている底面摩擦力も考慮し、実験では座屈変形に対する抵抗である摩擦力を供試体下部に作用させた。(図5)

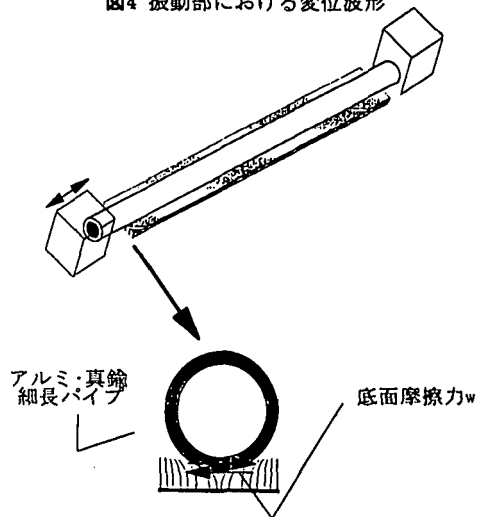


図5 実験概要

写真4にこの振動実験で座屈した供試体を示す。結局、動的な荷重入力、及びその周波数の違いによる座屈発生過程や座屈形態などへの影響はあまり見られなかった。一方、底面摩擦力を伴った座屈実験によって、写真で示した通り実際の被害に類似した形態の座屈を起こせることが分かった。

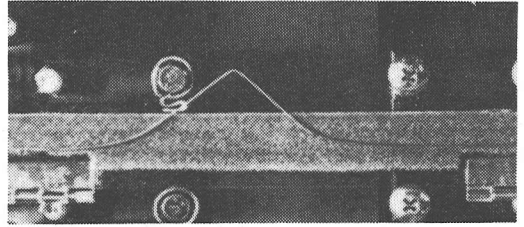


写真4 実験による供試体の座屈

4. 線路の座屈と地盤歪

(1) 座屈荷重の算定

図6に示した座屈後の状態にある釣合荷重 P と、座屈直前の状態にある荷重 P_0 に対し、運動学的条件から次のような関係式が求まる^{3) 4)}

κ : 両端支持部の
弾性係数の逆数

すなわち、ある荷重 P_0 をかけられた部材が、座屈することでこれより小さな荷重 P において釣り合う状態へと移行する。この場合の、 P_0 と P の組み合わせを表したものが上の関係式である。また関数形は図7のように表され、 P_0 は P に対し極小値を持つ。従って、徐々に圧縮力を載荷していった場合、供試体が座屈して釣り合い荷重 P へと移行するのは載荷荷重が P_{0min} のときである。これを算定し P_{cr}

とした。この方法は準静的な荷重に対しては従来の研究によって妥当性が得られている。そこでこの方法で求めた座屈荷重を、動的な圧縮力による座屈を扱った本実験と比較してみた。これを図8に示す。図中○印が理論値で、縦線は各供試体における十数個の実験値の範囲を示したものである。全般的に見て、実験結果は理論値に比べやや大きめの値を示している。一般的に底面摩擦力などの、座屈に対する何らかの抵抗力を受けている棒状金属が起こす座屈現象では、その部材のもつ最低座屈荷重が加えられた状態にいたった場合でも、座屈する可能性があるだけで必ずしも座屈を起こすとは限らない。このことを考慮すれば、理論値と実験値は、ほぼ一致していると言える。従ってこれらのことから、上式による方法で振動による座屈荷重も算定できると言える。

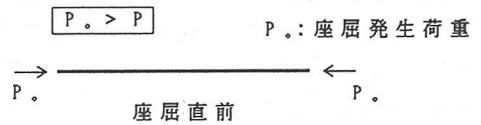
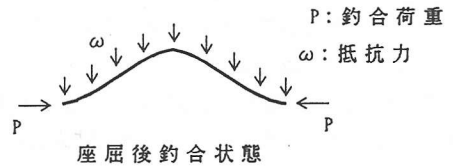


図6

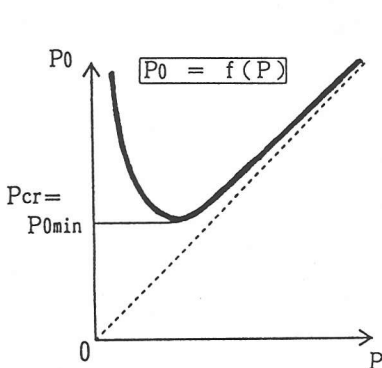


図7 P-P₀グラフ

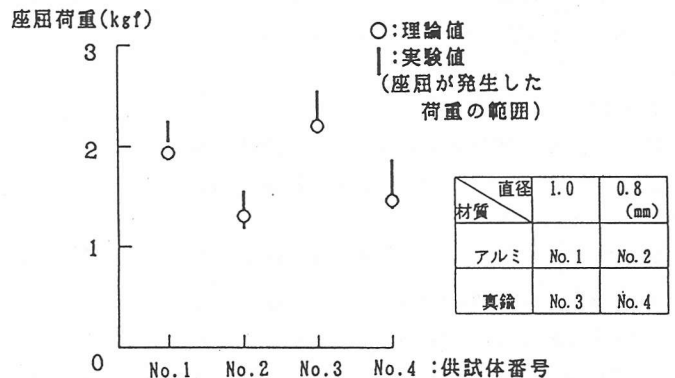


図8 理論値と実験地の比較

(2) 地盤歪の推定

以上より、レールの座屈荷重は前述の理論式によって算定できることが分かった。この算定式を用いて実際のレールにかかったと思われる軸力（座屈荷重）を求める。このとき式中に含まれる w 、すなわち底面摩擦力と求める座屈荷重 P_{cr} との相関に注目すると、これがかなり高く、実際には個々の底面摩擦力を正確に求められないことから P_{cr} を厳密に決定できない。従ってあくまで推定値としての座屈荷重を算定し、この荷重によってレールに発生する最小の歪量を、その地点において発生した地震時地盤歪であるとして以降の検討を行った。

写真5に示した兵庫県南部地震における事例について、具体的に地盤歪を推定してみた結果を以下に示す。

図9のように、57mの座屈部に対し、路床抵抗力がレール敷設時のもの（ $w=4(\text{kgf/cm})$ ）に比べ半減したと仮定する。諸部材定数（ E :ヤング率, I :断面2次モーメント, A :断面積）は実物のレールのものを用い、先ほどの方法で座屈荷重を算定し、応力歪関係（ $P/A=E\varepsilon$ ）を用いてこの時の歪量を求めると、

$$\varepsilon = 5 \times 10^{-4}$$

となる。これは周辺の被害の状況と比較してもほぼ妥当と思われる。

5. まとめ

- ・断層付近にあった線路に屈曲の例が多数見られた。レールの敷設状況としてはその付近に橋梁などが存在し、レールが路床に対して固定されているものが多数見られた。またレールと断層の方向に関し、お互いが平行でなく、多少の角度を持ったものが大半であった。
- ・振動的な圧縮力による座屈荷重への影響は少なく、座屈荷重は従来の理論式で推定できると考えられる。
- ・兵庫県南部地震における摂津本山駅周辺でのレール屈曲の実例から、この付近では $\langle 5 \times 10^{-4} \rangle$ ほどの地盤の圧縮歪が起こったと考えられる。

参考文献

- 1) 北陸震災調査特別委員会：福井地震震害調査報告，p. 35，1950.
- 2) Report of the State Earthquake Investigation Commission: The California Earthquake of April 18, 1906 VOL. 1, pp. 59, 1908.
- 3) 沼田 実：ロングレールの座屈強さ，JR(旧国鉄)鉄道技術研究報告No. 721, 1970.
- 4) W. D. Meyersohn and T. D. O'Rourke: Pipeline Buckling Caused by Compressive Ground Failure during Earthquakes, Proceedings from the Third Japan-U.S. Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures for Soil Liquefaction, pp. 471-487, 1991.

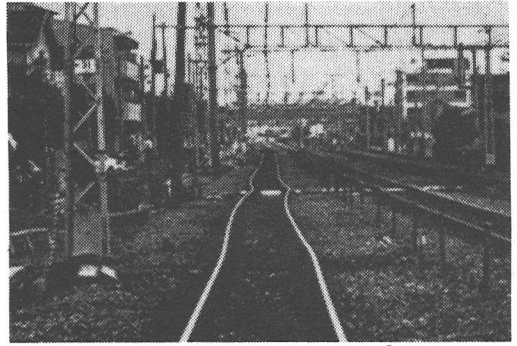


写真5 兵庫県南部地震における事例

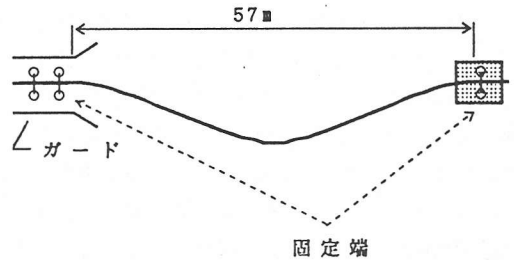


図9 概略図