

三次元センシングストーンによる道床振動加速度測定技術

鉄道力学研究部 軌道力学

主任研究員 相川 明

1. はじめに

道床バラストの動的挙動の測定に関しては、従来、一軸加速度センサを取り付けた碎石を道床に埋設する方法が行われてきた¹⁾。しかし、一軸加速度センサでは、測定軸がどの方向を向いているのか特定できず、設置後にセンサが移動・回転し、当初予定していた設置角度からずれた場合に正確な測定ができないという問題点があった。また、バラストの粒状性に着目すると、個々の粒子の回転挙動が塑性変形の大きな要因であり、バラストの回転運動を含めた三次元的な運動に関する測定技術も必要となる。そこで、三軸方向の加速度を測定可能な「 piezo抵抗型三軸加速度センサ」を複数個用い、バラストの水平方向、鉛直方向、奥行き方向の並進挙動とともに、碎石の回転挙動も同時に測定するセンシングストーンを開発した。本報告では、その動作原理と測定例について述べ、さらに、碎石内部に CPU を内蔵し、A/D 変換機能とデジタル転送機能を碎石内部にコンパクトに収納したインテリジェント・センシングストーンについても紹介する。

2. 三次元センシングストーンの動作原理

2. 1 三軸加速度センサの構造

加速度センサには各種のものがあるが、センシングストーン設置後に、碎石の設置角度を特定するためには、重力による静的な加速度の大きさとその向きを測定できる必要がある。また、車輪とレール間の衝撃荷重によるバラスト挙動も測定するためには、高周波までの良好な周波数特性が要求される。これら理由から、本センシングストーンでは、MEMS 技術を応用した「 piezo抵抗型三軸加速度センサ」を使用した(図-1)。本センサは、シリコン基板内部に支持部、錘、梁からなる微小構造体を構築したものであり、この構造体の錘に作用する加速度に応じて梁が変形し、そのひずみを素子の抵抗値の変化で検出するしくみである。可動部分がないので過大な入力加速度に耐え、消費電力も小さいので、外力・環境ともに過酷な条件下にある道床碎石の内部に密閉・封入しても、外力や発熱により損傷することがない。

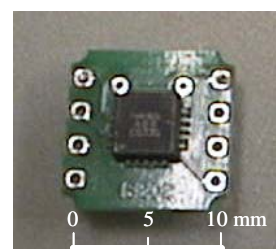


図-1 piezo抵抗型三軸加速度センサ

2. 2 センシングストーンの設置角度の求め方

本センサの場合、動的な加速度のみでなく、地球の重力による静的な加速度も測定できる。静止状態(動的な加速度が作用しない場合)の各軸の加速度出力値は、各軸の傾きに応じた地球の重力の分力となっている。すなわち、静止状態での各軸の加速度出力値より、センサの各軸が重力軸となす角度を計算で求めることができる。以下に、三軸センサの各軸の加速度出力値よりセンサの傾きを求める方法について説明する。

図-2は、センサの三つの軸が傾いた状態を示している。静止状態での、三つの軸 x, y, z に発生する加速度成分を G_x, G_y, G_z 、重力加速度を g ($= 9.81 \text{ m/s}^2$) とすると、次の関係が成り立つ。

$$\sqrt{G_x^2 + G_y^2 + G_z^2} = g \quad (1)$$

また、 x, y, z 軸と重力軸がなす傾き α, β, γ については、幾何学的関係より次式が成り立つ。

$$\cos \alpha = G_x / g, \quad \cos \beta = G_y / g, \quad \cos \gamma = G_z / g \quad (2)$$

すなわち、センサの三つの軸が重力軸となす角度 α, β, γ は次式のように求められる。

$$\alpha = \cos^{-1}(G_x / g), \quad \beta = \cos^{-1}(G_y / g), \quad \gamma = \cos^{-1}(G_z / g) \quad (3)$$

ここに、静止状態での加速度測定値 G_x, G_y, G_z 、および、重力加速度 g は既知である。したがって、センシングストーンが道床内部に埋設され、すでに道床外部からは見えない状態になっていても、これらの値を上式に代入することにより、センシングストーンが現時点でどのような設置状態になっているのかを推定することが出来る。

ここで改めて静止状態の測定値より求められた各軸の方向余弦を $i = \cos \alpha, j = \cos \beta, k = \cos \gamma$ とし、車両通過時の三軸加速度時刻歴をそれぞれ $G_x(t), G_y(t), G_z(t)$ と記号表示する。この場合、車両通過による鉛直方向の加速度時刻歴 $G(t)$ は次式のような線形和より求められる。

$$G(t) = i \times G_x(t) + j \times G_y(t) + k \times G_z(t) \quad (4)$$

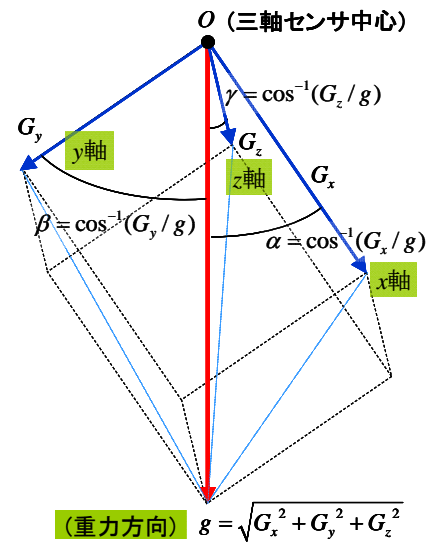


図-2 センシングストーンの設置角度の求め方

2. 3 センサの並進挙動と回転挙動の求め方

図-3 は、碎石内部の対称な位置に三軸加速度センサ 2 個を固定した状態を示している。この碎石に並進運動と回転運動が同時に作用すると、両センサからは並進運動と回転運動の大きさに応じた異なる大きさの加速度値が出力される。ここで、A センサの x, y, z 軸に関する加速度出力値をそれぞれ x_A, y_A, z_A 、B センサの加速度出力値をそれぞれ x_B, y_B, z_B と記号表示し、両センサの加速度について、軸別に平均値 p_x, p_y, p_z 、および、平均値からの偏差量 q_x, q_y, q_z を求める。

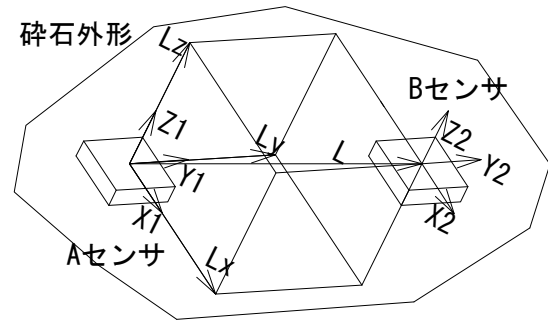


図-3 センシングストーンの試作品の作成

$$p_x = \frac{x_A + x_B}{2}, \quad p_y = \frac{y_A + y_B}{2}, \quad p_z = \frac{z_A + z_B}{2} \quad (5)$$

$$q_x = x_A - p_x = \frac{x_A - x_B}{2}, \quad q_y = y_A - p_y = \frac{y_A - y_B}{2}, \quad q_z = z_A - p_z = \frac{z_A - z_B}{2} \quad (6)$$

$$x_B - p_x = -q_x, \quad y_B - p_y = -q_y, \quad z_B - p_z = -q_z \quad (7)$$

この場合、軸ごとの加速度の平均値 p_x, p_y, p_z は碎石の並進運動成分を意味し、他方、平均値からの偏差量 q_x, q_y, q_z は碎石の回転運動成分を表している。これにより、バラストの三次元的な並進挙動と回転挙動とを同時に測定することが可能となる。

2. 4 インテリジェントセンシングストーンのしくみ

三軸加速度センサで測定を行うと出力ケーブル本数が多くなり、計測作業が繁雑になる可能性がある。また、実軌道での測定に際してノイズ低減対策も必要である。そこで、三次元センシングストーンの実用化のために、AD コンバータ内蔵型の 1 チップマイコン(PIC)を碎石内部に組み

込んだインテリジェント・センシングストーンを開発した。その仕組みを図-4に示す。本センシングストーンでは、PIC 内部の ROM プログラムにより、加速度センサの多チャンネルアナログデータをデジタルデータとして自動的に変換し、さらに、PIC マイコンからの出力データを、電気的なノイズの影響を受けない光ケーブルにて外部に転送することにした。これにより、光ケーブル 1 本のみで測定でき、しかも、計測時のノイズを大幅に低減できることに確認した。

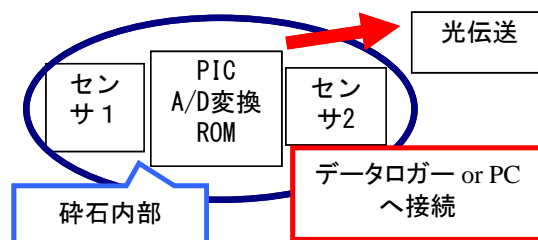


図-4 インテリジェント・センシングストーンのしくみ

3 実軌道における動的挙動測定試験

実軌道にて測定試験を実施した。現場は 60 kg ロングレール区間であり、まくらぎ下の道床厚さは約 25cm である。センシングストーンを溶接継目位置の、PC3 号まくらぎの直下 15 cm の道床内部に設置した。図-5は、静止状態での三軸加速度値と、砕石内部に取り付けたデジタル式方位センサより求めたバラストの設置状況である。図は、まくらぎ側方からみた軌道の縦断面を示している。砕石内部の2個のセンサ A,B を結ぶ直線は、上から見るとほぼレール方向に一致しており、また、図のようにまくらぎ側方から見ると、両センサを結ぶ直線が水平面となす角はおよそ 34° であった。なお、列車はこの図の右側から左方向に向かって走行する。

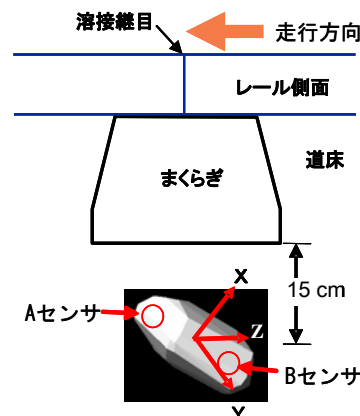
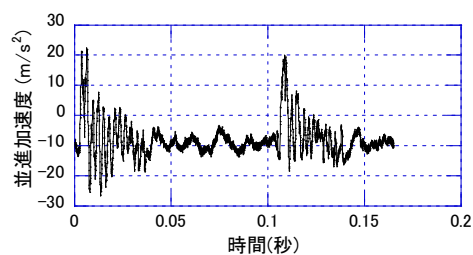


図-5 センシングストーンの設置位置と向き

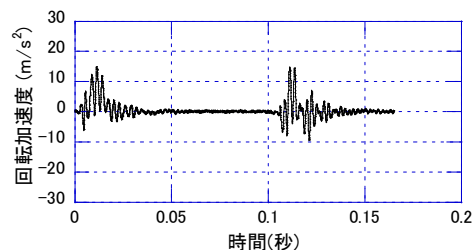
測定結果の一例を図-6に示す。これは、特急列車(走行速度 78 km/h)の先頭車両の前台車第1軸、第2軸通過時の鉛直方向の加速度成分である。図は、センサの三軸の加速度測定値をもとに、Aセンサと B センサの鉛直方向の加速度を合成し、さらに、並進挙動成分(平均成分)と回転挙動成分(偏差成分)に分離して求めたものである。なお、回転成分については、角加速度単位(rad/s^2)でも表示可能であるが、並進挙動との比較のため加速度単位(m/s^2)で表示する。

図-6 (a) の並進成分では、マイナス向きが重力向きである。図より、走行荷重を受けたバラストは、載荷直後に一旦沈下してから跳ね上がるような運動の後、数百 Hz の高周波の激しい振動を伴って急激に減衰したことがわかる。この減衰振動は、載荷後 0.04 s 後にはほぼ終了し、その後は 50~100 Hz 前後の緩やかな振動が生じた。

また、図-6 (b)の回転成分では、図-5の右回転が正方向である。図より、載荷直後の高周波応



(a) 鉛直方向の並進加速度成分



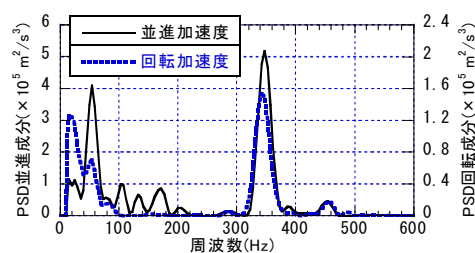
(b) 水平軸回りの回転加速度成分

図-6 鉛直加速度に関する並進成分と回転成分

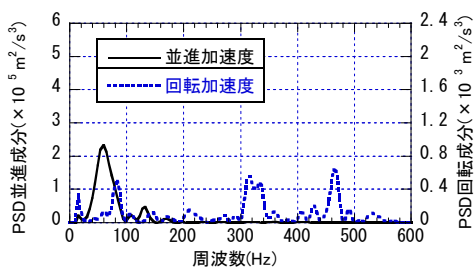
答は回転成分についても見られるが、高周波の減衰振動が終了した後では、回転運動は殆ど生じていない。すなわち、载荷直後の高周波減衰振動は、回転運動を伴ったバラストの局所的な運動と考えられ、また、それに続く 50~100 Hz 前後の波形については、並進運動が主体であり、しかも、この波形には回転運動を伴っていないことから、隣接するバラストもほぼ同位相の一体的な運動をしていることが想定される。

図-7は、鉛直方向の加速度のパワースペクトル密度(PSD)である。図-7(a)は、载荷直後の減衰振動をしている 0.0512 s 間 (20 kHz サンプリング, 窓関数 Welch 関数, データ数 1024 個) についての PSD であり、図-7(b)は、減衰振動終了後の経過時間 0.04~0.10 s の波形 (同, データ数 1200 個) についての PSD を示す。測定結果の並進成分と回転成分の大きさが異なるので、図には、並進成分を左軸に、回転成分を右軸に分けて示す。図より、減衰振動時には、低周波の応答とともに、340 Hz および 460 Hz 近傍の高周波領域にピークが見られ、その周波数は、並進加速度、回転加速度のいずれにも共通していた。すなわち、密に締め固められた状況のバラストは、低い周波数で一体的に運動するとともに、局所的に隣接するバラスト同士が互いに擦れ合うような、高周波の並進運動と回転運動(回転振動)を発生していることが想定される。また、この減衰振動終了後は、200 Hz 以下の低周波の並進成分の振動のみであった。しかも回転成分の PSD は並進成分に比べると 2 桁以上小さく、これらのことより減衰振動終了後は、道床全体がほぼ同位相の運動をしていることが推定される。

紙面の都合で詳細は割愛するが、レールおよびまくらぎの鉛直方向加速度に関する PSD と比べると、340 Hz 近傍の周波数はレールの振動に関する PSD のピークの周波数と一致し、また、460 Hz 近傍の周波数はまくらぎの振動に関する PSD のピークの周波数と一致していた。これらのことより、車輪・レール間の高周波振動成分が、まくらぎ下 15cm のバラストまで伝わっていると考えられる。



(a) 载荷直後の減衰振動時の PSD



(b) 減衰振動終了後の PSD

図-7 鉛直加速度(並進加速度・回転加速度)に関するパワースペクトル密度

4 まとめ

本稿では、三軸加速度センサを用いたセンシングストーンのしくみについて説明し、さらに実軌道での測定概要について述べた。成果を以下に列挙して結論とする。

- (1) 列車走行時の道床内部バラストの三次元的な動的挙動(並進運動・回転運動)を測定するために、三軸加速度センサを複数用いたセンシングストーンを開発した。
- (2) 試作品を実軌道に埋設し、特急列車通過時のバラストの動的挙動を測定した。本測定により、動的荷重を受けた道床バラストは並進運動するのみでなく、高周波の回転振動を伴った急減な減衰運動をしていることが確認できた。

参考文献

- 1) (財)鉄道総合技術研究所編：在来鉄道運転速度向上試験マニュアル・解説，軌道各部の振動特性，pp.216-220，(財)鉄道総合技術研究所，研友社，1993。