

水平伝播する地震波の地盤ひずみと埋設管のひずみ

(株)建設技術研究所 正会員○津田喜裕

(株)川崎製鉄 正会員 小池 武

金沢大学工学部 フェロー 北浦 勝

金沢大学工学部 正会員 宮島昌克

1. はじめに

現在の耐震設計では、埋設管ひずみは地盤ひずみから求められており、その地盤ひずみは水平方向に伝播する地震波の見かけの波長に依存している。水平方向に伝播する地震波の波長算定式の妥当性を検証するため、本研究では地震動の伝播速度を加速度観測記録を用いて検討する。

2. 上水道耐震設計指針におけるせん断弾性波速度

上水道管路では、地盤のせん断弾性波速度は弾性波探査やPS 検層によって測定するのが望ましいとしながら、実測値がない場合は地盤の N 値より推定している。図1は沖積層におけるせん断弾性波速度である。図1より N 値の低い部分から高い部分まで大きく変化しないことがわかる。せん断弾性波速度をほぼ一定の速度で扱うのは、地震波で考えると実体波としての扱いであることに相当すると言える。よって、上水道耐震設計指針では地盤条件の違いにかかわらず波長が小さいため、耐震設計の基準となる地盤ひずみは比較的大きく見積もる設計である。

3. 見かけの平均伝播速度

見かけの伝播速度とは群速度を指し、ここでは実地震動の加速度観測記録を使って求める。解析対象地震は1994年の北海道東方沖地震の釧路市(震源からの距離約270kmでの観測記録)における5観測点である。

速度算定の基本となるのが速度 v =距離 L / 時間 T の式である。距離を震源からの距離として、観測点に到達する時刻の差を時間として考える。時刻を特定するに当たって以下の3つをあげる。

1)加速度が最大値となる時刻。 2)加速度の上下動変位を求め、その変位波形における S 波の到達時刻。 3)加速度観測記録の包絡線を求め、それが最大値となる時刻。
1)では任意の2観測点間の距離とそれぞれの観測点における加速度が最大値(絶対値)となる時刻同士から平均の伝播速度を求めると、約870(m/sec)となった。2)では加速度地震波形(上下動に注目)を積分して得られる、変位波形から S 波の開始点の時刻を推定し、任意の2観測点間の時刻差と距離から速度を算出した。これによると平均の伝播速度は約390(m/sec)となった。2)では5観測点での地

地震動、表面波、実体波、埋設管、ひずみ
東京都中央区日本橋本町 4-9-11 第9中央ビル

震波形の加速度、速度、変位の全てを比較した。その波形は長周期性を示し、形状も概略的に相似形を示した。3)では任意の2観測点の加速度観測記録の包絡曲線が最大値をむとなる時刻同士の差とその間における距離から速度を算出した。この場合の平均の伝播速度は約470(m/sec)となった。以上より実際の加速度波形による伝播速度の推定の結果は、上水道管の耐震設計指針の値(図1)よりも大きくなった。なお実際の地震動では、特定の周期成分が卓越することがあるため周期ごとの伝播速度を4.で考える。

4. 周期ごとの伝播速度

周期ごとの伝播速度を求める。地震記録は同様に1994年の北海道東方沖地震のものをを用いる。まず加速度観測記録を0.1~10Hzでバンドパス・フィルタをかける。それに対して加速度計による基線のずれを補正した後、積分を2

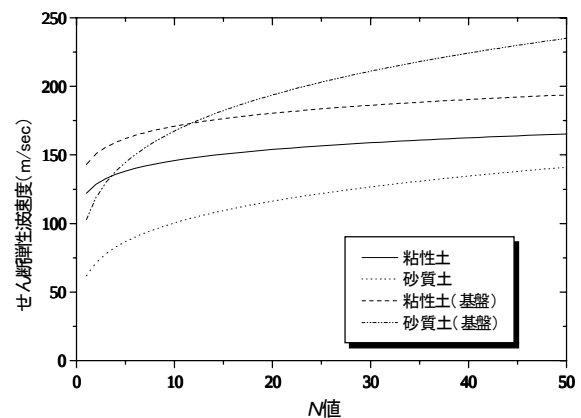


図1 上水道耐震設計におけるせん断弾性波速度

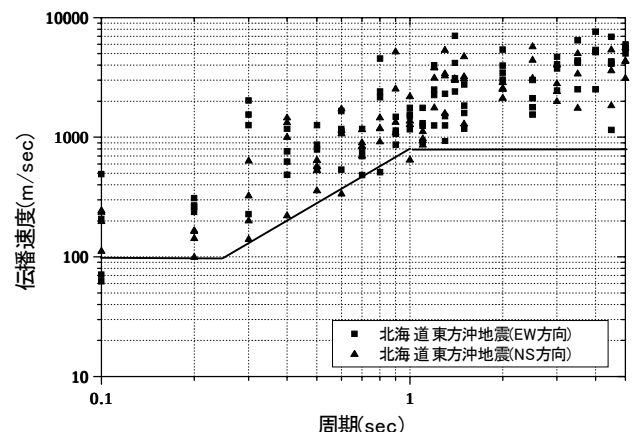


図2 周期ごとの伝播速度(北海道東方沖地震)

回行い変位波形を求める。変位波形をフーリエ変換し、結果から角振動数 ω ごとの位相差 ϕ を求める。位相差 ϕ とフーリエ振幅 A を用いて正弦波を作る。正弦波が最大値となる点の時間を取り出す。以上の作業を観測点ごとに行い時間差と観測点同士の距離の関係よりその周期における伝播速度を算出する。図 2 は周期と伝播速度を示したもので図中の線はガス耐震設計指針におけるせん断弾性波速度の基準値である。

図中の実線（ガス耐震設計指針の基準伝播速度）を基準としたとき、北海道東方沖地震の伝播速度は全体的に基準値を上回っている。北海道東方沖地震は大規模遠方地震に相当し、大地震が広範囲の地盤を振動させるため地中深くまで地盤が振動したと考えられる。よって地震動は遠距離を伝播する過程で地中深くの地盤剛性の影響を受けて伝播速度が速くなったと考えられる。また図 2 全体をみると周期ごとに伝播速度が変化するという表面波の特徴である分散性が見られることがわかった。

5. 波長算定

実地震の加速度観測記録を使って地表面を水平伝播する地震波の伝播速度の解析を行ってきた。そこで埋設管のひずみ算定に大きな影響のある波長算定について既往の設計方法と表面波を考慮した方法の比較を行う。

上水道耐震設計指針では式(1)にあるように調和平均を使って波長算出を行っている。

$$L = \frac{2L_1 \cdot L_2}{L_1 + L_2} \quad \dots (1)$$

$$L_1 = V_{DS} \cdot T_G \quad L_2 = V_{BS} \cdot T_G$$

V_{DS} : 表層地盤の平均せん断弾性波速度

V_{BS} : 基盤のせん断弾性波速度

T_G : 表層地盤の固有周期

上式を使って求めた釧路の波長、ガス耐震設計指針において算出した波長、Dobry の方法によって求めた波長を表 1 に示す。Dobry の方法は参考文献に示す。

表 1 を見ると、地震動を実体波として捉えて調和平均して求めている上水道耐震設計指針の波長が、他の 2 手法によって算出された波長よりも非常に小さくなっている。地震動を表面波と考えたその他の 2 手法では、上水道に比べて約 2～10 倍程度の大きなものとなった。以上より地表面における地震動の水平伝播を正確に表現するという点では、表面波の分散性を考慮して、周期ごとの伝播速度を使った耐震設計もひとつの方法であると考えられる。

6. 地盤ひずみと埋設管のひずみ算定

ここでは上水道耐震設計指針によって求めた波長をそのまま用いて上水道耐震設計指針の手法によって地盤ひずみを求めるものと、表面波を考慮した波長で求めた地盤ひずみの比較を行う。上水道耐震設計指針では式(2)を使って地

盤ひずみを求めている。

$$\varepsilon_G = \frac{\pi U_h}{L} \quad \dots (2)$$

U_h : 管軸上の地盤の水平変位振幅(cm)

L : 波長(cm)

埋設管ひずみは地盤ひずみに伝達係数を乗じてから求めた。図 3 に上水道耐震設計指針による波長から求めた埋設管ひずみと表面波を考慮して求めた埋設管ひずみを示す。図に示すように上水道の埋設管ひずみは表面波を考慮した埋設管ひずみに比べて約 3 倍程度の大きな値となっている。したがって、上水道耐震設計指針の値は埋設管の耐震設計を考える上では安全側の設計として十分である。これは管路の許容応力などを考えると非常に大きな違いが現れた。言い換えると、伝播速度を与える段階での実体波と表面波の違いは設計において大きな影響を持っていると言える。

以上より、実体波を使ったひずみ計算は表面波を使ったものに比べて非常に大きいものになることがわかった。

7. まとめ

地表面における水平伝播する地震波には、表面波の影響が大きくなることがわかった。実際の埋設管設計の波長算定、ひずみ算定では地盤条件を詳細に調査し、せん断弾性波速度を求めてひずみ算定を行うのが現実的である。しかし、実地震動の加速度観測記録を使って伝播速度を解析すると、表面波の影響があった。また、ひずみ算定において表面波と実体波では大きな違いがあることから、表面波を考慮した伝播速度を算定し、設計に用いていくことも一つの方向であると考えられる。

参考文献 Dobry, R., I. Oweis and A. Urzua : Simplified Procedures for Estimating the Fundamental Period of a Profile, Bulletin of the Seismological Soc. of Am., Vol.66, No.4, pp.1293-1321, 1976.

表 1 波長 L

	周期(sec)	$V(m/sec)$	波長 $L(m)$
上水道耐震設計指針	0.85	—	216.2
ガス耐震設計指針	1.86	800	1488
Dobryの方法による波長	0.75	1067	807.2

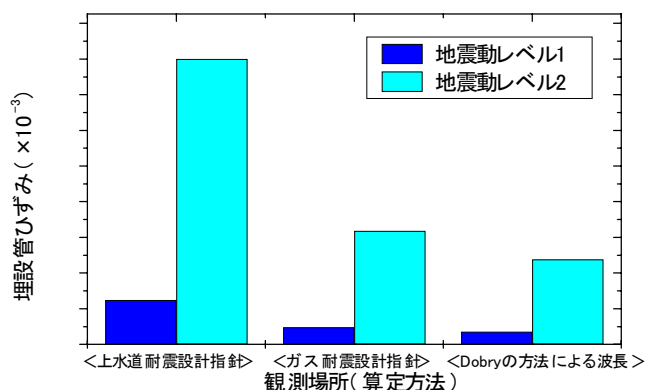


図 3 埋設管ひずみの比較図