

埋設管の耐震設計に向けた波動による地盤ひずみの評価

神戸大学 学生会員 ○砂野 大地
 神戸大学 正会員 鋤田 泰子

1. 背景・目的

日本の水道管路の耐震設計指針¹⁾(以下, JWWA 指針)における地震波動による埋設管の耐震計算法は, 1979年に導入されて以降, 1997年にL2地震動導入により外力の引き揚げが行われたものを除いて変更はなく, 日本国内で初めて応答変位法が導入された石油パイプライン設計基準の考え方を踏襲している. 基本的には, 波の速度を波の伝播速度で除することで算出される地震波動による地盤ひずみを作用外力としているが, 後発の米国の水道管路の耐震設計指針²⁾(以下, ALA(2005)指針)と比べても伝播速度の値に10倍以上の差が見られ, 日本の指針が過剰設計であるとも考えられる. 本研究では, 大阪市福島区に設置した強震観測アレイによる地震記録から, 波動による地盤ひずみの特性を明らかにした.

2. 各指針の地盤ひずみ

JWWA 指針では地震時の地盤ひずみ ε は最大変位振幅 U_h とせん断波波長 L より求められる.

$$\varepsilon = \pi \cdot U_h / L \quad (1)$$

最大変位振幅は応答速度スペクトルから算出され, 表層地盤と工学的基盤のせん断波速度の調和平均がせん断波波長の伝播速度となる.

一方, ALA 指針における地盤ひずみ ε_{max} は最大地表速度 PGV と伝播速度 C より求められる.

$$\varepsilon_{max} = PGV / C \quad (2)$$

伝播速度 C は, 計算例で $C=3.9\text{km/s}$ と記載され実体波速度が想定されている. JWWA 指針で掲載されているモデル地盤を使用して算定すると, レベル1地震動で地盤ひずみは $6.0 \times 10^{-2}(\%)$, レベル2地震動で $5.0 \times 10^{-1}(\%)$ である. 一方, ALA 指針で PGV が12~120cm/sの地域で地盤ひずみは $9.0 \times 10^{-3} \sim 3.0 \times 10^2(\%)$ となることから $PGV=100\text{cm/s}$ でJWWA指針と同程度を想定しても, ALA 指針に比べJWWA指針は10倍程度地盤ひずみを大きく算定している.

3. 観測の概要

著者らは, 2017年より大阪市福島区に関西地震観測研究協議会の観測点FKSを利用して, その周辺に3つの地震計(OSA, OSB, OSC)を設置することで, OSA-OSB-FKSで半径600m, OSB-OSC-FKSで半径700mの三角形強震観測アレイを構築して, 継続観測している. 図1は設置場所を示す. 観測システムの概要は既報3)を参照されたい. いずれの地震計の地点も上町断層の西側でほぼ同じ表層地盤であることを確認している. なお, 2021年11月よりOSCは5km西に移動して観測している.



図1 地震計設置場所

(FKSは関西地震観測研究協議会によるもの)

4. 観測記録

本研究では, 観測開始以降の2018年の大阪府北部の地震と直後の地震, FKSでの PGV が0.1cm/s以上の地震記録を整理し, 表1に示す9記録から分析した. いずれの観測地点で震度1~震度4以下の記録である. 多くは大阪府北部の本震・余震と和歌山周辺を震源とする地震であるが, 2021年の福島沖の地震や日向灘の地震の遠方の地震も含まれる.

これらの観測波の伝播特性を分析するにあたり,

キーワード 地盤ひずみ, 伝播速度, 埋設管, 耐震設計, アレイ観測

連絡先 〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1 神戸大学大学院工学研究科市民工学専攻 TEL078-803-6067

表1 地震記録一覧

地震発生日	時刻	場所	Mj	震源深さ(km)	OSAからの距離(km)	FKSのPGV(cm.s)	ID
2018/6/18	7:57	大阪府高槻	6.1	13	20.5	18.15	No.1
2018/6/19	0:30	大阪府高槻	4.1	10	20.5	0.172	No.2
2018/6/19	4:52	大阪府高槻	3.9	13	20.5	0.077	No.3
2018/6/19	7:51	大阪府高槻	3.9	11	20.5	0.231	No.4
2018/11/2	16:54	和歌山県沖	5.4	44	113.8	0.298	No.5
2019/3/13	13:49	紀伊水道	5.3	43	112.5	0.477	No.6
2021/2/13	23:08	福島県	7.1	55	668.4	0.707	No.7
2021/12/3	9:27	和歌山県沖	5.4	20	101.9	0.43	No.8
2022/1/22	1:08	日向灘	6.6	45	406.3	0.782	No.9

速度の水平 2 成分に対してそれぞれセンブランス解析結果を行った。その結果、実体波が卓越している時間帯の伝播速度は全ての地震で震源方向からの入射で 4~8km/s であり、表面波に起因するとみられる後続波の伝播速度は 0.4~1.0km/s 付近に収まり、入射方向は時間帯によって一定ではなかった。

5. 軸ひずみと最大速度との関係

地震観測においてローカルな地盤ひずみを観測することは困難であるため、本研究ではアレイで組まれた 2 点間測線方向の変位差分を測線距離で除して測線上の軸ひずみを式(3)により算出した。

$$\varepsilon_{mn}(t) = \{X_n(t) - X_m(t)\}/L_{nm} \quad (3)$$

ここで、 $X_i(t)$ は観測点 i の変位、 L_{nm} は観測点 n, m の測線長さ。

これら各測線で観測された軸ひずみと PGV との関係を整る。図 2 は全地震の各測線の PGV とひずみの関係を示している。横軸の PGV は 2 測点の測線方向最大速度の平均値、縦軸は測線方向の最大軸ひずみを示している。地震 No.1 以外は 1cm/s 以下なので、図 3 に地震 No.1 の記録を除いた関係を示す。図中には式(2)より見かけの伝播速度を示している。

伝播速度は、地震 No.1 で 5km/s 近くであり、それ以外の地震でも 2~20km/s の範囲で分布したが JWVA 指針のように 1km/s 以下になることはなかった。PGV の最大速度時刻と最大ひずみの時刻は必ずしも一致しなかった。PGV 時刻よりも 5s 以上遅れて最大ひずみが発生する記録を図中に黒丸で示す。震源が和歌山・福島沖・日向灘の震央距離が 100km 以上の地震では PGV の発生時刻よりも最大ひずみは遅れて発生することから表面波によるひずみであることが考えられる。表面波によるひずみが最大の場合、伝播速度そのものは 1km/s 以下であるがその時刻の速度が PGV よりも半減しているため、結果として図の分布域に収まっている。

6. まとめ

観測結果から算出されたひずみは JWVA 指針の算定値よりもはるかに小さかった。また見かけの伝播速度は 2km/s 以上であった。今後、大地震においても PGV とひずみの関係について明らかにしていく必要がある。

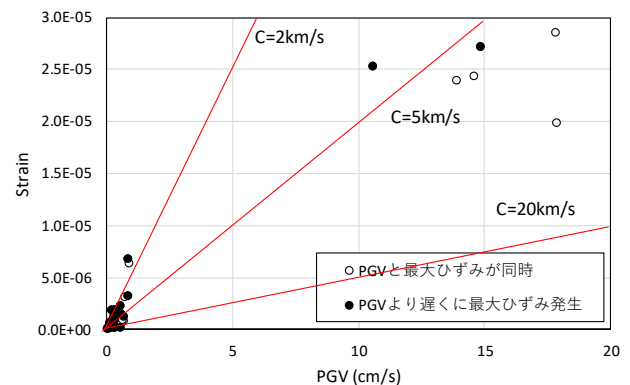


図 2 PGV とひずみの関係 (全地震)

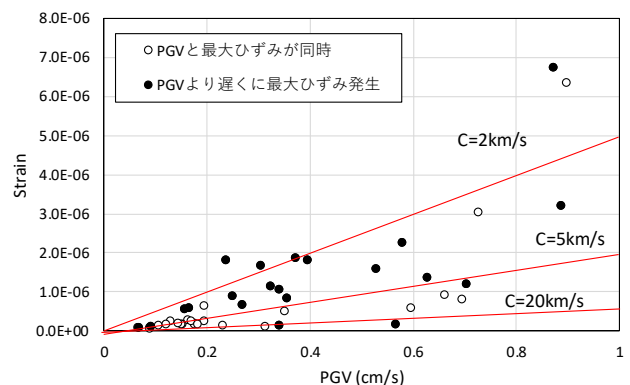


図 3 PGV とひずみの関係 (No.1 地震を除く)

謝辞

本研究の遂行にあたり、関西地震観測研究協議会 (CEORKA) の強震記録を利用させていただいた。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 日本水道協会：水道施設耐震工法指針,1997,1999
- 2) American Lifeline Alliance: Seismic Guidelines for Water Pipelines, 2005
- 3) 水上昌信, 鉦田泰子, 後藤浩之, 福島康宏: 大阪平野における高密度地震観測システムの構築, 平成 30 年度土木学会関西支部年次学術講演会, 2018