衝撃波を用いたリアルタイム中圧管損傷検知システムの可能性の検討

○東京大学地震研究所　正会員　小国　健二
東京ガス（株）　正会員　清水　善久
東京ガス（株）　正会員　若狭　匡輔
東京ガス（株）　正会員　小金丸健一
東京大学地震研究所　正会員　堀　宗朗

1.　研究の背景と目的

地震被害に遭った都市の機能回復の第一段階は、電気・ガス・水道といったライフラインの復旧である。この復旧作業の迅速さが震災後の都市機能早期回復の鍵となる。ライフラインのうち、特にガスに関しては損傷部位への供給再開は深刻な二次災害を引き起こすおそれがあるため、損傷がないことが確認された地域にのみ供給を再開することが出来る。従って、ガス供給ネットワークの震災からの復旧は他のライフラインに比べて後れる傾向がある。この問題の解決のためには、ガス管の損傷部位を早期に同定できるシステムの構築が必要となる。

ガス供給ネットワークの構成要素は、管内のガスの圧力により、高圧・中圧・低圧管の三つに分けられる。このうち、「総延長が比較的長い」・「損傷に気づかずにガスを供給した場合の影響が大きい」という要件を満たす「中圧管」の損傷部位・程度の同定が、ガス供給ネットワーク復旧の合理的システム構築のための最重要課題となる。

このような背景の下、本研究では図１にその概念を示す「衝撃波を用いたリアルタイム中圧管損傷検知システム」の実現可能性を検討する。これは、地震によって中圧管が損傷した場合に中圧管を伝播する衝撃波の走時から損傷地点を、衝撃波の強さ・継続時間から損傷の程度を検知するシステムである。

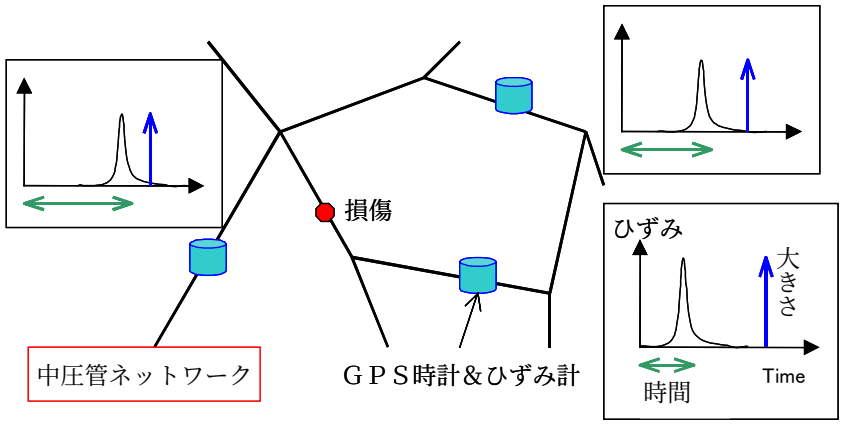

図１　　衝撃波を用いたリアルタイム中圧管損傷検知システム

2.　衝撃波の計測

写真１

研究の第一段階として、写真１に示す400AのFCバルブを用いた大口径引張試験においてバルブ破断時に発生する衝撃波（ひずみ）を計測した。これは、地震によって中圧管が損傷した場合に中圧管を伝播する衝撃波の大きさを推定するためである。この衝撃波の大きさは、バルブ破断時に発生する衝撃波と同程度であることが予想され、ひずみゲージ・ホイートストーンブリッジ回路・デジタルオシロスコープからなる簡易動ひずみ計測装置によって、時間－ひずみの波形として計測される。計測の時間分解能は5×10^{-7}[sec]、ひずみ分解能は4×10^{-6}である。

写真１に示すように４つのひずみゲージをバルブ両側に貼付した。Ch1とCh3をデータ記録のトリガーに用いた。図２にCh1とCh2で計測されたデータから50kHzのローパスフィルターを用いてノイズを除去したものを示す。Ch1・Ch2は、Ch3・Ch4と比較して、破壊面からの距離が遠く、衝撃波の計測可能性の検討にはより厳しい条件下にある。この状況下で最大0.15%(1.5×10^{-3})程度のひずみが計測された。以上から、管の破断に伴い衝撃波が管の壁面内を伝播し、十分計測可能なひずみが生じることがわかる。ただしここでは、破断面から計測地点までの距離は約1mと短く、減衰の影響は実験結果にはほとんど出ていないと考えられる。しかし、ガスパイプの壁というWave Guideの中を波が伝播するため、幾何減衰の影響はほとんどなく、鉄管（優良な弾性体とみなすことが出来る）の材料減衰はあまり大きくないことが予測されるため、結果的に減衰の影響は小さいことが予測される。

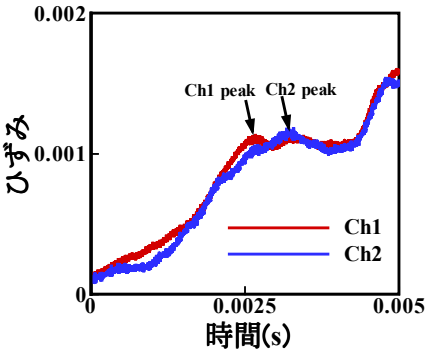

図２　Ch1・Ch2 での計測波形

キーワード：ガス供給ネットワーク・損傷検知・動ひずみ計測
連絡先：〒113-0032　東京都文京区弥生1-1-1　東京大学地震研究所　Tel:03-5841-5692　Fax:03-5802-3391

3. ガス管内での衝撃波の伝播特性

中圧管の材料は主に脆性破壊を起こす鋳鉄であるため、破断に伴い発生する衝撃波のうち最も強い波は、ガス管軸方向の縦波と考えられる。ガス管のように特徴的な長さをもつ媒体内を伝播する弾性波は、無限均質媒体内の伝播の場合と異なり、周波数により伝播速度が異なる「分散性」を示す。ここでは、中圧管を中空円筒 Wave guide とみなし、弾性波動論に基づいて周波数と伝播速度の関係を求める。中空円筒 Wave guide を伝播する縦波によって生じる応力成分σ_{rr}・σ_{rz}は（r：半径方向・z：円筒軸方向）、Bessel 関数を用いて次のようにあらわされる[1)]。

$$\sigma_{rr} = a_1\left[2\mu\frac{\partial^2 J_0(gr)}{\partial r^2} - \frac{\lambda\rho p^2 J_0(gr)}{\lambda+2\mu}\right] + 2a_2\mu k\frac{\partial J_0(hr)}{\partial r} + a_3\left[2\mu\frac{\partial^2 Y_0(gr)}{\partial r^2} - \frac{\lambda\rho p^2 Y_0(gr)}{\lambda+2\mu}\right] + 2a_4\mu k\frac{\partial Y_0(hr)}{\partial r}$$

$$\sigma_{rz} = 2a_1 k\frac{\partial J_0(gr)}{\partial r} + a_2\left(2k^2 - \frac{\rho p^2}{\mu}\right)J_1(hr) + 2a_3 k\frac{\partial Y_0(gr)}{\partial r} + a_4\left(2k^2 - \frac{\rho p^2}{\mu}\right)Y_1(hr)$$

ここで、λ, μ は Lame 定数、ρ は密度、k は波数、p は角速度、$g = \left[\rho p^2/(\lambda+2\mu) - k^2\right]^{1/2}$, $h = \left[\rho p^2/\mu - k^2\right]^{1/2}$ である。

管の外面（$r = r_1$）・内面（$r = r_2$）における境界条件 $\sigma_{rr}\big|_{r=r_1,r_2} = 0$, $\sigma_{rz}\big|_{r=r_1,r_2} = 0$ を満たす自明でない解、すなわち $\boldsymbol{a} = [a_1, a_2, a_3, a_4] \neq \boldsymbol{0}$ となるような解が存在する条件は、境界条件を $\boldsymbol{A}\cdot\boldsymbol{a} = \boldsymbol{0}$ の形で表すと $\det[\boldsymbol{A}] = 0$ となる。

λ	μ	ρ	r_1	r_2
70GPa	60GPa	7000kg/m^3	0.2m	0.18m

表１　FCバルブの材料定数・寸法

これを、表１に示す400AのFCバルブの材料定数・寸法を用いて解くと、図３に示す周波数依存伝播特性が得られる。図３における縦軸は中空円筒を伝わる縦波の伝播速度（C_p）を無限均質媒体中での縦波の速度（C_0）で正規化したもの、横軸は波の周波数である。直観に反し、周波数が大きくなるに従って伝播速度が小さくなることが分かる。

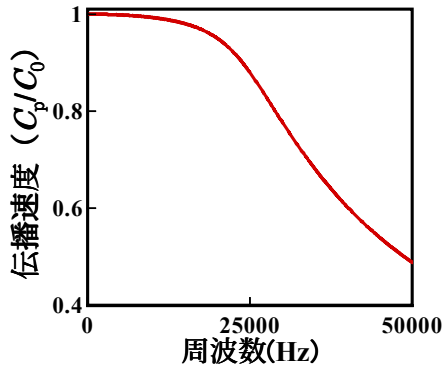

図３　中空円筒内の縦波速度の周波数特性

この伝播特性と、前述のガス管破断実験においてCh2で測定されたひずみのデータを用いて得られる、「伝播距離の増加に伴う波形の変化」を図４に示す。図４では、伝播距離の増加に伴い波形に若干の変化が見られるが、検出されるひずみの最大値・弾性波の継続時間など、破断検出に際して重要な物理量にはほとんど変化がないことが分かる。

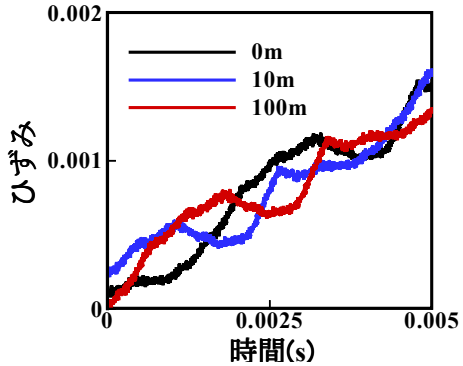

図４　伝播距離の増加に伴う波形の変化

4. まとめ

以上の実験により、ガス管の破断に伴いガス管壁内部で発生・伝播する弾性波を捉えられることが示された。また、周波数依存伝播特性の解析により、波の分散性は破断検知に悪影響を及ぼさないことが示された。この解析結果は「損傷発生検知」の次の段階、「損傷程度の同定」の基礎的データとして用いることができる。「衝撃波を用いたリアルタイム中圧管損傷検知」の実用化に向けての今後の方針として、以下の項目が挙げられる。

- 地中埋設による減衰効果の計測
- 破断進展過程と発生する弾性波の関係の同定
- ガバナー及び中圧管に設置できる装置・処理の検討（例：電圧供給装置の設置・中圧管に設置する計測装置・計測装置から情報を伝達する装置）

参考文献

1）Wasley, R. J.: Wave Propagation in Solids, New York, M. Dekker, 1973.

2）Follansbee, P. S. and Frantz, C.: “Wave Propagation in the Split Hopkinson Pressure Bar”, *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 105, pp.61-66, 1983.