簡易式による南海トラフ地震・首都直下地震の地表面加速度の推定

高圧ガス保安協会　フェロー会員　木全宏之　小山田賢治　佐野　孝　藤井　亮　大野卓志

1. はじめに

内閣府より，2003 年，2004 年に南海トラフ地震及び首都直下地震の被害想定が公表され，2012 年，2013 年にそれぞれ見直しが行われた[1)-3)]．これを受けて，当高圧ガス保安協会では経済産業省からの委託調査研究として，「高圧ガス設備等耐震設計基準」(以下，「耐震告示」と呼ぶ)の見直しに向けた検討を実施した[4),5)]．本調査研究の一部として実施した簡易式による南海トラフ地震及び首都直下地震の地表面加速度の推定結果について報告する．

2. 簡易式の選定と検証

南海トラフ地震及び首都圏直下地震による地表面での地震動については，内閣府からは気象庁震度階の推定値のみが公表されている[6),7)]．一方，構造物の耐震安全性評価に当たっては，地表面での最大加速度(以下，PGAと呼ぶ)や応答スペクトル等のより緻密な情報が求められる．

PGAを推定するに当たって，気象庁震度階とPGAの関係を表わす経験式を用いる方法がいくつか提案されている[8)]．しかし，ⅰ)10段階しかない震度階はPGAの推定には分解能が不十分である．ⅱ)震度階とPGAの間には定性的な関係があるのみで，両者の関係式に物理的根拠があるわけではない．ⅲ)そのため，任意の形の関係式を採用することができるが，用いる式によってPGA の推定結果は大きく異なる．ⅳ)さらに，大きな地震動(震度階)に関する情報が少ない，または外挿となるため，大きな地震動においてPGA を求める式の精度が保証されない．ⅴ)地盤の非線形応答によりPGAが低減される物理現象の効果を取り入れることができない．等といった問題点が指摘され，震度階または計測震度から簡単な関係式を用いてPGA を安定的に推定することは困難である[4)]．

内閣府からは，南海トラフ地震及び首都圏直下地震の工学的基盤面での加速度波形と表層地盤30mの平均S波速度(以下，AVS30と呼ぶ)が公開されているが[6),7)]，工学的基盤面における加速度波形から地表面でのPGA を推定するためには，ⅰ)地盤の非線形動的解析を行う方法，ⅱ)地盤の等価線形解析を行う方法，ⅲ)工学的基盤面と地表面でのPGAの関係を表わす経験式を用いる方法が考えられる．このうち，動的解析を行うためには，地盤の層構造とその動的パラメータが与えられていなくてはならず，ボーリングデータが必須となる．しかしながら，ボーリングデータが与えられている地点は限られており，ボーリングデータが遍在することが制約条件となって情報が得られない地域が生じてしまい，全国を概観するには不適切である．一方，その精度はともかく，全国満遍なく与えられている表層地盤情報としてはAVS30 があり，現実問題としてこの情報を採用せざるを得ない．しかも，地盤情報としてAVS30 を用いるならば，必然的に工学的基盤面と地表でのPGAの関係を表わす経験式を用いることとなる．

このようなことから，工学的基盤面でのPGAと表層地盤のAVS30を用いて，地盤の非線形応答の効果も加味した上で地表面でのPGA を推定する簡易な経験式を採用することが求められる。多くの経験式について調査を行ったが，このような条件を満足する経験式は末富らによる経験式[9)]に限られるようであり，末富らによる経験式を採用し，南海トラフ地震及び首都圏直下地震の地表面でのPGA を推定することとした．

末富らによる経験式の適用に当たり，ボーリングデータが与えられている地点での地盤非線形動的解析との比較によって地表面での PGA の推定精度について検討した．ボーリングデータについては，全国電子地盤図[10)]等を利用した．詳細は別報[5)]を参照されたいが，一例として，首都直下地震(都心南部直下地震)について両者を比較した結果を図-1 に示す．同図を線形近似すると y=1.054x，相関係数 0.875 であり，非線形動的解析による PGA は簡易式による PGA と概ね調和している．ただし PGA の上限については両者でやや差異があり，簡易式では 1000Gal 程度，非線形動的解析では，特異的に増大する箇所を除けば 1300Gal 以下程度である．PGA が 750Gal を超える辺りから非線形動的解析による PGA が簡易式の PGA をやや上回る傾向が見られるが，このうちの殆どのケースにおい

キーワード　南海トラフ地震，首都直下地震，簡易式，地表面加速度
連絡先　〒105-8447　東京都港区虎ノ門 4-3-13　TEL. 03-3436-6103

て非線形動的解析によるひずみは最大で1% を超過していた．非線形動的解析に適用した土の構成モデルのRamberg-Osgoodモデル[11),12)]ではひずみが極端に増大してもある程度高いせん断剛性を有することが知られており，これが簡易式のPGAを上回る主な要因と考えられる．南海トラフ地震についても同様の傾向であり，末富らによる経験式で推定されるPGAは，1000Gal程度までであれば十分な精度で推定できていると考えられる．それ以上のPGAの値については，どちらの推定法を採用するにしてもおよその目安とするのが妥当である．本来，そのような大きな加速度領域では地盤条件によっては液状化を考慮した有効応力解析等が必要であり，本調査研究で採用した推定手法を適用するには限界があり，それ以上については有効数字2 桁程度のおよその目安として取り扱うことが適切であると考えられる．

3. 簡易式による地表面加速度の推定

末富らの式を適用し，南海トラフ地震及び首都直下地震の影響地域について，工学的基盤面での加速度波形が公開されている 3 次メッシュ(1×1km メッシュ)で地表面の PGA を推定した．一例として，南海トラフ地震(陸側ケース)，首都直下地震（都心南部直下地震)の推定結果を図-2，図-3 に示す．「耐震告示」による地表面の設計水平震度の最大値は 0.6 であり，最大加速度 600Gal の値とは本質的に異なるものであるが，単純比較を行うため 600Gal よりも小さい地域を青で，大きい地域を赤で示し，色が濃いほど 600Gal から離れた値として表示している．

これより，太平洋沿岸や首都圏の多くの地域において，「耐震告示」による地表面の設計最大震度 0.6(600Gal)を上回る地域が多く存在していることがわかる．また，最大値については，南海トラフ地震で概ね 1400Gal 程度(静岡県の一部地域で 1800Gal 以上)，首都直下地震で 1000Gal 程度の極めて大きな PGA が予測される．

このような大規模地震に対処するためには，例えば「耐震告示」の設計地震動を増大させること等を検討する必要があるが，内閣府による 2012 年，2013 年想定の南海トラフ地震や首都直下地震については，考えられ得る最大級の被害想定用の地震であり，高圧ガス設備等の設計に用いるには過大な地震であるとの意見もある．本調査研究では，両地震の地表面の時刻歴加速度応答を入力地震動として各種高圧ガス設備の非線形動的解析を実施し，高圧ガス設備の設計裕度を考慮した損傷評価を行う等，種々の検討を実施している [5)]．今後はこれらの検討結果等を踏まえて，「耐震告示」の性能規定化を始めとした見直しの必要がある．

謝辞：本調査研究において，東京工業大学の盛川　仁教授ならびに飯山かほり特別研究員には多大なるご指導，ご支援を賜った．ここに記して深謝の意を表する次第である．

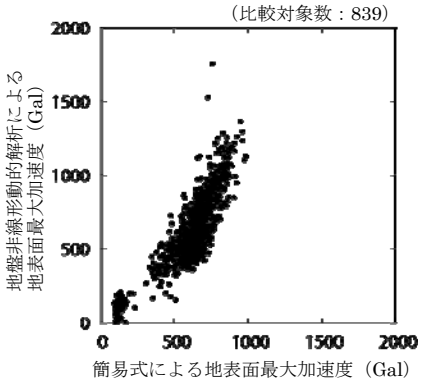

図-1　首都直下地震(都心南部直下地震)の簡易式と地盤非線形動的解析による地表面最大加速度の比較

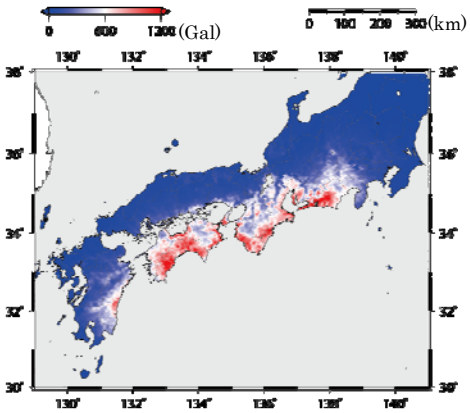

図-2　南海トラフ地震(陸側ケース)の地表面最大加速度

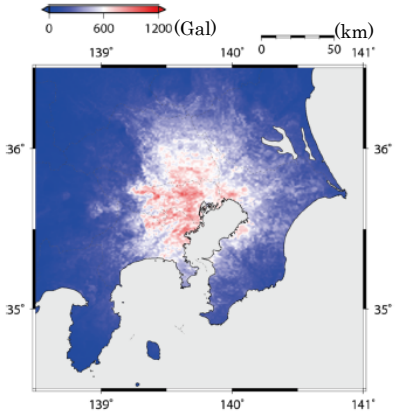

図-3　首都直下地震(都心南部直下地震)の地表面最大加速度

参考文献：
1)内閣府 HP：http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/nankaitrough_info.html
2)内閣府 HP：http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/nankaitrough_info.html
3)内閣府 HP：http://www.bousai.go.jp/jishin/syuto/taisaku_wg/　4)高圧ガス保安協会：平成 25 年度経済産業省委託石油精製業保安対策事業，高圧ガス施設の耐震補強評価に係る調査研究，報告書，2015．経済産業省 HP：http://www.meti.go.jp/meti_lib/report/2014fy/000128.pdf
5)高圧ガス保安協会：平成 27 年度石油精製業保安対策事業(高圧ガス設備等耐震設計基準の想定地震対応に係る調査研究),報告書,2016.
6)内閣府 HP：http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/model/data_teikyou.html
7)内閣府 HP：http://www.bousai.go.jp/kaigirep/chuobou/senmon/shutochokkajishinmodel/data_teikyou.html
8)例えば，童華南他：地震動強さ指標と新しい気象庁震度との対応関係，生産研究，48 巻，11 号，1996．9)末富岩雄他：全国即時地震動分布推定のためのモデル構築に関する一検討，第 13 回日本地震工学シンポジウム，2010．10)(公社)地盤工学会 HP：http://www.denshi-jiban.jp/
11)龍岡文夫他：砂のランダム繰り返し入力に関する応力～歪関係のモデル化について(1)，生産研究 30 巻 9 号，1978．12)龍岡文夫他：砂のランダム繰り返し入力に関する応力～歪関係のモデル化について(2)，生産研究 30 巻 9 号，1978.