

有効応力に基づく地震応答解析プログラム YUSAYUSA の改良

東北学院大学 学生会員 斎藤孝仁, 高橋英隆

東北学院大学 正会員 吉田 望

1 はじめに

石原らによって開発された有効応力に基づく地震応答解析プログラム YUSAYUSA¹⁾は、筆者に一人により改良され、YUSAYUSA-2²⁾として公開されている。このプログラムは逐次積分非線形の地震応答解析プログラムとして日本で広く用いられている。しかし、プログラムが開発された当時と現在では液状化に対する考え方に差がある様に思われる。

例えば、昔は液状化の発生が予想されると、液状化対策により液状化が発生しないようにすることが一般的であった。しかし、1995 年兵庫県南部地震を契機として設計用の地震動が大きくなったこともあり、現在では、液状化の発生を許容して構造物側で対処する構造的対策や、構造物の機能が維持できれば良いという性能設計の考え方が設計にも導入されるようになっている。

前者の考えであれば、液状化の発生を予測するのが重要であるが、後者の考えであれば、液状化した後の地盤の挙動も知る必要がある。

このような観点で YUSAYUSA を見ると、液状化以後の挙動については問題もあり、その改良が必要であると考えられる。ここではそのために行った改良方策について報告する。

2 YUSAYUSA のモデルと問題点

YUSAYUSA では過剰間隙水圧の発生はせん断応力 τ と有効上載圧 σ_v' で構成される平面上で非排水状態の経路を設定することで求めている。この経路は、載荷初期には載荷時は放物線、除荷時は非線形の増分式で表現されている。また、応力点の変相線を超えた後は、載荷時は双曲線、除荷時は除荷点を通る接線で表現されている。すなわち、サイクリックモビリティ挙動は双曲線と直線の組み合わせで表現されている。図 1 に計算例を示すが、応力平面だけを見ているとサイクリックモビリティが表現できているように見えるが、応力-ひずみ関係を見ると、ひ

ずみが急激に大きくなり、例えば、図 2 に示すような液状化強度試験の結果と比べてみると、ひずみが徐々に大きくなっていくような現象が表現できていない。また、実験では除荷後せん断応力が 0 に付近でせん断応力の変化がほとんど無い状態でひずみが大きく変動する、いわゆる流動の挙動も再現できていない。

設計として考えれば、ひずみが大きくなるのであれば、安全側の設計ということができ、その意味では適用性がないわけではないが、合理的な設計を行おうとすれば、変形はなるべく現実のものと近い方が良い。

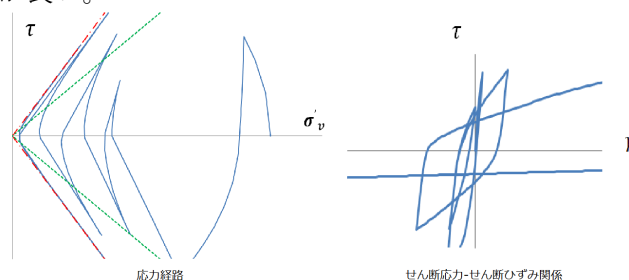


図 1 現行モデルによる計算例

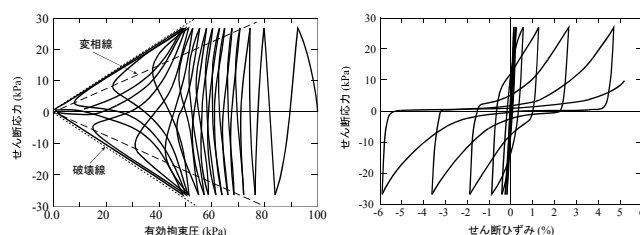


図 2 液状化強度試験の例

3 改良の方法

YUSAYUSA でひずみが急に増大する原因は明らかで、応力点の変相線を超え、その後除荷した時に応力経路は双曲線の接線方向に移動するので、有効応力が急に減少し、それ以後は載荷時には応力点が破壊線の近傍で動くためである。

従って、ひずみの急な増加を改良するためには、有効応力の急激な低下が発生しないような応力経路を設定すれば良い。これに関しては、これまでにい

くつかの方法を提案し³⁾⁴⁾、成果をあげてきた。しかし、せん断応力が 0 の付近で発生する流動に関してはうまく表現できなかった。

これまでの方法では除荷時の直線の傾きを大きくし、急激な有効応力の発生が起こらないようにし、その直線を σ'_v 軸を横切っても延長させていたことが、流動がうまく表現できなかった原因と考えられる。そこで、本論文では、その方法を徹底した方法と、 σ'_v 軸を横切った後、直線の勾配を変化させる方法の二つを試みた。

図 3 に改良法のイメージを示す。ここで、●はこれ以後は載荷状態の双曲線の経路に移項する点を表している。除荷点以後、オリジナルでは①の経路となり、有効応力の低下が大きすぎる。これに対して、文献 3)では②の経路として過剰な有効応力の低下を防いだが、 σ'_v 軸以降は双曲線としたため、流動領域が表現できなかった。そこで、文献 4)では③で示されるようにこの直線を YUSAYUSA で低振幅として定義されている状態まで延長することによって、より有効応力を低下させようとしたが、大きな改善は見られなかった。

今回行ったのは、この直線をさらに延長させ、変相線まで維持させる④のケースと σ'_v 軸以降の直線の勾配を小さくする⑤のケースの二つである。

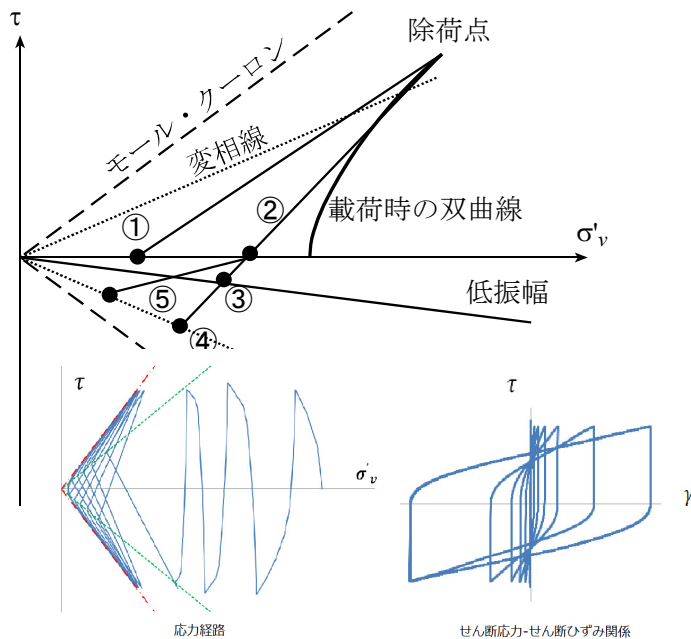


図 4 に④の改良で得られた応力経路と応力-ひずみ関係を示す。目的とした低応力時の流動現象は十分

に再現できていない。次に、図 5 に応力をさらに低下させる経路の計算結果を示す。 σ'_v 軸を横切った後の勾配はかなり小さくなったが、実験値と比べるとまだ大きい。さらに、有効上載圧を小さくしたことにより、ひずみが大きく増加するようになった。

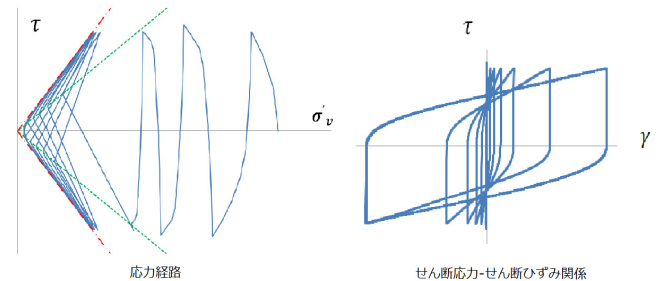


図 4 ④の応力経路の計算例

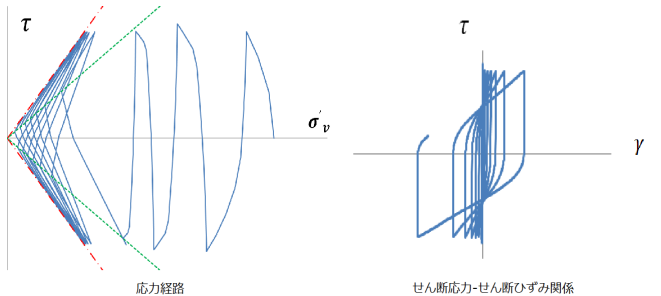


図 5 ⑤の応力経路の計算例

4 まとめ

YUSAYUSA の応力経路の改良を試みた。いくつか改良されたところはあったが、繰返しに伴いせん断ひずみが次第に増加していくという現象と、流動領域を表現するという現象の二つをうまく表現するところまでは至らなかった。これは除荷時の剛性と σ'_v 軸以後の剛性のバランスによることが原因と考えられるので、今後さらに改良したい。

参考文献

- 1) Ishihara, K. and Towhata, I. (1982): Dynamic response analysis of level ground based on the effective stress method, Soil Mechanics - Transient and Cyclic Loads, Pande, G. N. and Zienkiewicz, O. C. ed., John Wiley and Sons, pp. 133-172
- 2) 吉田望, 東畑郁生 (1991): YUSAYUSA-2・SIMMDL-2 理論と使用法, 佐藤工業・東京大学
- 3) 阿部聡太, 吉田望 (2010): 有効応力解析のための構成モデルの改良, 平成 21 年度土木学会東北支部研究発表会講演概要集, Paper No. III-10
- 4) 佐々木啓, 阿部浩大, 吉田望 (2012): 液状化解析プログラム YUSAYUSA の改良, 平成 23 年度