

塑性化領域における粘性減衰特性の取り扱い（「瞬間減衰」）に関する資料

1. 塑性化領域での粘性減衰特性

一般に弾塑性振動解析における運動方程式は次式で表される（1 質点系での表現）。

$$M\Delta\ddot{x} + C\Delta\dot{x} + K\Delta x + F_0 + D_0 + R_0 = -M\ddot{z} \quad (1)$$

ここに、 M は質量、 C は減衰係数、 K は剛性、 x は応答変位、 z は地動変位、 Δ は現ステップでの増分値を表し、 F_0 、 D_0 、 R_0 はそれぞれ前ステップまでの慣性力、減衰力、復元力を表す。左辺第 1 項から 3 項は現ステップでの慣性力増分、減衰力増分および復元力増分を表している。ただし、質量 M は常に一定のため、式(1)中の現ステップでの慣性力 $M\Delta\ddot{x} + F_0$ は $M\ddot{x}$ に置き換えてもよい。

振動系の応答が塑性化領域に入ると、粘性減衰のほかに履歴減衰（履歴特性によるエネルギー消費）が現れるが、式(1)を逐次解析していく上で、履歴減衰特性は荷重-変形関係すなわち復元力に関する項で評価することとなり、塑性化領域においても減衰力に関する項は依然として粘性減衰特性を表していることになる。

一方、粘性減衰特性の評価は、たとえ線形領域であっても質量や剛性の評価に比べ不確かさと困難さを残したものであるが、塑性化領域に入ることによる再評価はさらに困難を極める¹⁾。しかし、塑性化領域では履歴減衰が粘性減衰に比べ大きくなる傾向があり、この領域における粘性減衰特性の評価については略算的な扱いが一般的である¹⁾。以下、文献 1)より引用する（式番号は連番）。

設計では粘性減衰を剛性に比例すると仮定することが多いが、非線形域ではみかけの剛性が時間とともに変化するので、粘性減衰を初期剛性ではなく、いわゆる瞬間剛性に比例するよう設定することもある。これを瞬間剛性比例減衰とよび、初期剛性比例減衰と区別する。応答解析上、初期剛性あるいは瞬間剛性比例の減衰行列は一般的にそれぞれ(2)式および(3)式で求められ、粘性減衰係数としては瞬間剛性比例とした方が小さくなる。

$$[C] = \alpha [K_e], \quad \alpha = 2h / \omega_e \quad (2)$$

$$[C] = \alpha_p [K_p], \quad \text{通常は, } \alpha_p = \alpha \quad (3)$$

ここに、 h ：粘性減衰定数、 ω_e ：弾性 1 次モードの円振動数

$[K_e]$ ：初期剛性行列、 $[K_p]$ ：瞬間剛性行列

(3)式において、1 自由度振動系でかつ非線形域における時々刻々の等価円振動数 ω_p と粘性減衰定数 h_p が同定できれば、 $\alpha_p [= 2h_p / \omega_p]$ を逐次変化させることも考えられるが、多自由度振動系ではそれらの同定も不可能に近く、粘性減衰の扱いは結局、上記の 2 つの式のいずれかで評価されているのが実状である。

2. SS21/DynamicPRO, SuperDynamicPRO での対応

地震応答解析プログラム SS21/DynamicPRO および SS21/SuperDynamicPRO では、塑性化領域における粘性減衰特性の取り扱い方法（「瞬間減衰に関する指定」）について、次の 3 つの選択肢を設けている（図 1）。

瞬間マトリックスを考慮しない

瞬間剛性マトリックスから瞬間減衰マトリックスを作成する

瞬間剛性マトリックスと瞬間円振動数から瞬間減衰マトリックスを作成する

以下に、剛性比例型減衰の場合を例に各方法を説明する。

方法 1 は、応答が塑性化領域に入ったとしても常に初期状態で作成した減衰係数により粘性減衰力を評価するものであり、この場合の減衰係数 C は次式で表される（1 質点系での表現）。

$$C = (2h / \omega_e) K_e \quad (4)$$

ここに、 K_e は初期剛性、 ω_e は初期（弾性）1 次モードの円振動数、 h は減衰定数（入力値）である。

方法 2 は、塑性化により変動した瞬間剛性を用いて瞬間減衰係数を評価するが、固有円振動数については

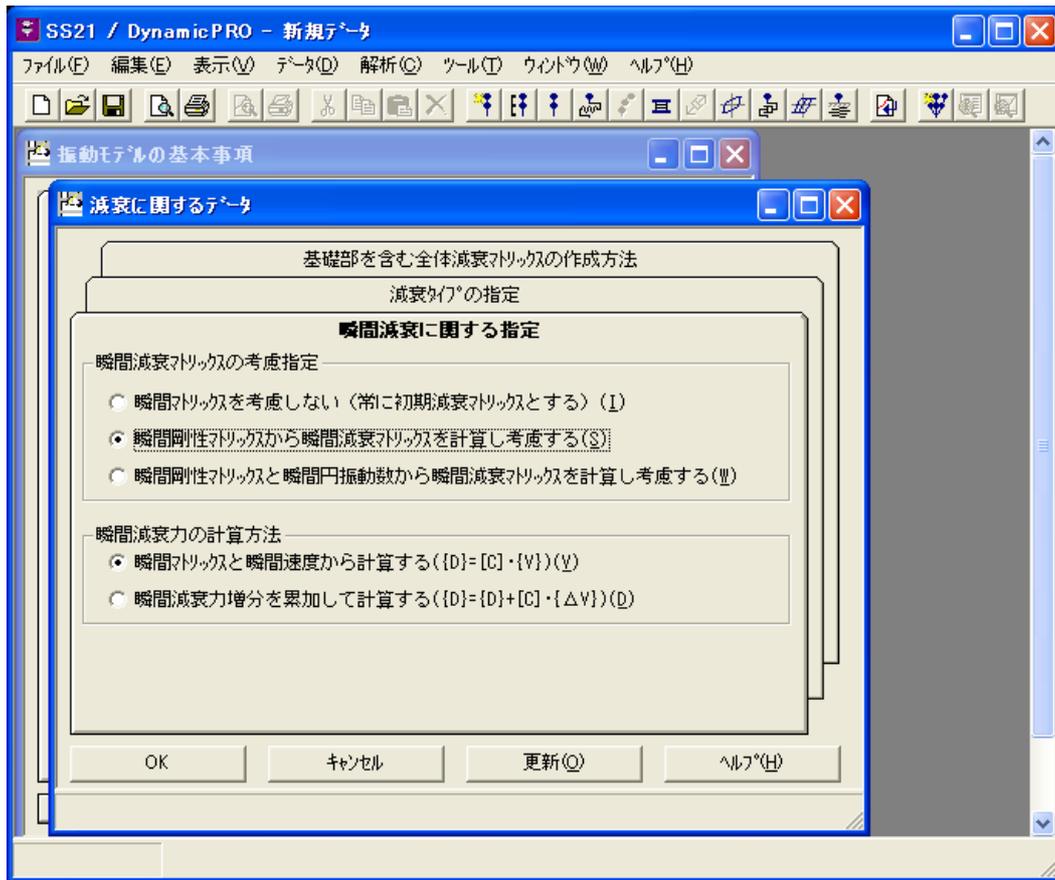


図1 SS21/DynamicPRO による入力画面

塑性化による変動を行わず常に初期（弾性）1次モードの値とする。すなわち式(3)において $\alpha_p = \alpha$ としたものであり、この場合の減衰係数 C は次式で表される。

$$C = (2h / \omega_e) K_p \quad (5)$$

ここに、 K_p は瞬間剛性（接線剛性）である。

方法 は、 においてさらに、塑性化により変動した1次固有円振動数を再評価したものである。すなわち式(3)において $\alpha_p = 2h / \omega_p$ としたものであるが、式(3)と異なるのは減衰定数を入力した値を常に用いている点である。この場合の減衰係数 C は次式で表される。

$$C = (2h / \omega_p) K_p \quad (6)$$

ここに、 ω_p は瞬間剛性を用いて再評価した瞬間1次固有円振動数である。

3. 考察

剛性が変化する非線形応答解析において減衰係数を一定とすると、剛性低下とともに見かけのモード減衰が増大することになるが、これを証明する実験事実は示されていないため、現段階では減衰を瞬間剛性に比例して低減させることで、この不合理を解消することが望ましい¹⁾。これに対応した方法 と方法 を比較すると、剛性低下とともに瞬間固有円振動数も小さくなる傾向にあるので、減衰定数 h を不変とすると、方法 の方が塑性化領域における粘性減衰力が大きく評価されることになる。減衰特性の評価の不明確性や安全側への配慮を考えると、設計では方法 を選択することの方が多きように思われる。

参考文献

1) 日本建築学会：多次元入力地震動と構造物の応答，1998，pp.186-187，pp.300