

瞬間剛性比例減衰を用いた場合の粘性減衰力の取り扱いに関する資料

1. 瞬間剛性比例減衰を用いた場合の粘性減衰力

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。ここで、減衰係数 C は例えば剛性比例型として評価されるが、応答が塑性化領域に入り剛性が低下した場合の粘性減衰評価法として瞬間剛性 K に比例させる瞬間剛性比例減衰が用いられている¹⁾。

減衰評価法を瞬間剛性比例減衰とすると当然に減衰係数 C は非線形となり、この場合の逐次の粘性減衰力 D は復元力の計算方法に倣って次式で求めることが考えられる。

$$D = D_0 + C\Delta\dot{x} \quad (2)$$

しかし、式(2)で減衰力を計算すると、応答速度が 0 になる瞬間の除荷時において減衰力が発生したり、振動終了時で減衰力や速度が残留するなど、物理的に不可解な現象が解析上で現れる。宮本らは、逐次で減衰力の不平衡力を修正する方法を提案し検討を行っている²⁾。宮本らによると不平衡力を次の手順で求めている（原論文は M- に関する内容であるがここでは上記の表現および記号を用いる）。まず、前ステップの粘性減衰力 D_0 は次式である。

$$D_0 = C_0\dot{x}_0 \quad (3)$$

現ステップの減衰力 D は次式で与えられる。

$$D = D_0 + C\Delta\dot{x} - U \quad (4)$$

ここに、 U は現ステップの不平衡力を表し、次式となる。

$$U = (C_0 - C)\dot{x}_0 \quad (5)$$

式(4)に式(3)(5)を代入すると現ステップの減衰力 D は次式となる。

$$D = C\dot{x} \quad (6)$$

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、瞬間剛性比例減衰を用いるとした場合の粘性減衰力の計算方法（「瞬間減衰に関する指定」）について、次の 2 つの選択肢を設けている（図 1）。

$$\text{瞬間減衰マトリックスと瞬間速度から計算する } \{D\} = [C]\{V\}$$

$$\text{瞬間減衰力増分を累加して計算する } \{D\} = \{D_0\} + [C]\{\Delta V\}$$

方法 1 は、式(6)を用いて宮本らが提案する方法で不平衡力を修正しながら粘性減衰力を求めるものである。

方法 2 は、式(2)を用いて粘性減衰力を求めるものである。

3. 考察

減衰評価法を瞬間剛性比例減衰とし、方法 1 および 2 を用いた応答結果の一部を比較した（表 1）。方法 1 では速度が 0 において減衰力は 0 になるが、減衰力-速度関係や減衰力-変位関係でやや不自然さが目立つ。一方、方法 2 では確かに減衰力が復元力と同じような位相で現れ、不可解である。しかし一般に塑性化領域では履歴減衰が粘性減衰に比べ大きくなる¹⁾ため、全体の応答結果に及ぼす影響は小さいと思われる。

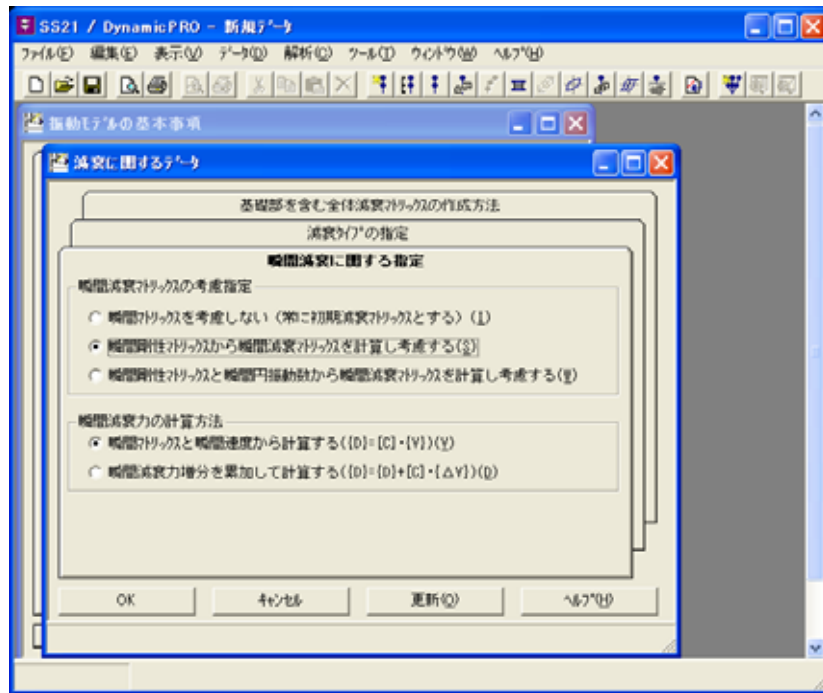


図1 SS21/DynamicPRO による入力画面

表1 粘性減衰力の計算方法の違いによる応答比較

	$D = C\dot{x}$	$D = D_0 + C\Delta\dot{x}$
(減衰力-速度) 関係		
(減衰力-変位) 関係		
(復元力-変位) 関係		

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
- 2) 宮本明倫，白浜健二，竹内義高：減衰変化を考慮した場合の浮上り非線形応答解析，日本建築学会大会学術講演梗概集，昭和 61 年 8 月，pp.963-964