

I - 21

繰返し荷重を受けるトラス構造の座屈モードの局所化と変形能の低下

本州四国連絡橋公団 正員 川西 直樹
名古屋工業大学 正員 小畑 誠

名古屋工業大学 正員 後藤 芳顯
名古屋工業大学 正員 松浦 聖

1. まえがき : 大地震等の繰返し荷重を受ける構造物の安全性を把握するためには構造物の強度のみならず、最大耐力到達後の挙動を含めたいわゆる変形能を正確に評価することが必要となる。変形能を支配する一つの要因としては構造物内での塑性化の進行状況が挙げられる。塑性化が均一に進行する場合には良好な変形能を示すが、逆に塑性化が局所的に集中して起こる場合には変形能は低下する。この原因の一つとして、つりあい主経路上にある第1分岐点での分岐座屈モードが何らかの対称性を持つ場合、分岐経路上で最大耐力到達後の荷重減少経路上に存在する第2分岐点により生ずる（図-1）ことが挙げられる。ここでは、トラス構造を対象に単調荷重ならびに繰返し載荷条件下の座屈モードの局所化現象を解析し、変形能の観点から考察を加える。

2. 荷重減少経路上での弾塑性分岐挙動の解析 : 第2分岐に起因した座屈モードの局所化現象は最大耐力到達後の領域で生じるため、Hillの分岐の条件式¹⁾は変位制御型の増分方程式から、次のように表現される。

$$\Delta \Pi = (\Delta \bar{D}_i^b - \Delta \bar{D}_i^f) \Delta \tilde{K}_i^c; (\Delta \bar{D}_i^b - \Delta \bar{D}_i^f) \\ + \sum_{e=1}^n (\Delta \epsilon_e^b - \Delta \epsilon_e^f) [\{ (E_i^c A)_e - (E_i^f A)_e \} \Delta \epsilon_e^f \\ + \{ (E_i^b A)_e - (E_i^c A)_e \} \Delta \epsilon_e^b] L_e = 0 \quad (1)$$

ここで、 $\Delta \bar{D}_i$ は非制御変位増分、 $\Delta \tilde{K}_i$ は変位増分型の接線剛性マトリックス、 $\Delta \epsilon$ はひずみ増分、 $(E_i A)$ は部材の軸方向剛性、 L は部材長、下添字 e は部材番号である。また、上添字 f, b は基本経路および分岐経路を示し、 c は除荷の場合でも負荷剛性を採ると仮定する comparison solids として構造システムを表す。分岐点の特定および分岐経路の追跡²⁾は式(1)より行った。

3. 解析モデル : 図-2に示す2層1径間のトラスタワーを解析対象とする。上部両節点の水平方向の変位成分は自由で、鉛直成分の制御変位量は等しい。各部材の材料構成則としては移動硬化のみを考慮したDafalias-Popovの Bounding surface model³⁾を用いる。この概略とここで用いた材料定数を図-3に示す。ここでは、部材断面の配分の

差が座屈モードの局所化に与える影響を調べるため、接線係数理論に基づく座屈荷重を等しくする ($P_{cr}=490 \text{ kN}$) 条件下の2種類 (TYPE1, 2) の断面配分について検討した。具体的な断面配分は表-1に示す通りである。表-1より、断面配分の特性は以下のようなのである。

柱の断面積 : TYPE1 > TYPE2 斜材の断面積 : TYPE1 < TYPE2

制御する成分としては、トラスタワーの頂部両節点の鉛直変位成分を選ぶ。制御法としては両節点を等しく鉛直下方に単調増加させる場合と、繰返し荷重を想定した両振りの定変位振幅を両節点に同様に与える

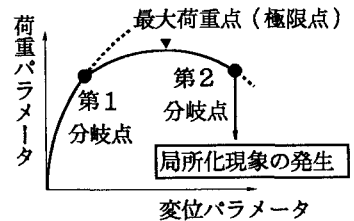


図-1 座屈モードの局所化が生ずる構造物のつりあい経路

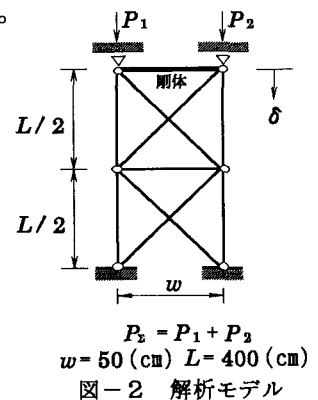


図-2 解析モデル

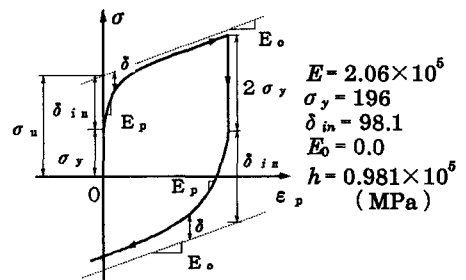


図-3 トラス材料の構成則

表-1 断面配分

構造モデル	柱材 (cm ²)	斜材 (cm ²)	水平材 (cm ²)
TYPE1	16.5	2.37	10.0
TYPE2	15.0	3.46	10.0

場合とを検討対象とした。繰り返し荷重の場合の変位振幅の大きさとしては、単調増加させた場合の荷重-変位曲線の第1分岐点および極限点を越え、さらに第2分岐点を越えない領域で設定した。また、繰り返し載荷を20回行った後、さらに鉛直下方に変位を単調増加させた。解析手法としては文献3)で示したトラス部材の局部座屈を考慮しない弾塑性有限変位解析法を用いた。

4. 単調載荷条件下の挙動：2種類のトラスタワーの挙動を変位制御点である頂部両節点の鉛直方向反力の和 P_z と鉛直方向制御変位量 δ の関係を図-4に示す。この図より、2種類の構造はいずれも設計通り、ほぼ490kN近傍で1回目の分岐が発生している。分岐後は分岐前に塑性化した部材に除荷が発生するため、荷重が上昇し、最大荷重点である極限点に至る。極限点到達後、荷重は減少するが、この経路上で2回目の分岐による座屈モードの局所化が生じ、荷重がさらに減少する。2回目の分岐が生ずるのは1回目の分岐後の変形状が点对称性を有すること、斜材の塑性化によるせん断剛性の低下とに起因している。したがって、この第2分岐点は斜材の塑性化によるせん断剛性の低下とに起因している。したがって、この第2分岐点は斜材の断面積が小さく、せん断剛性が低下しやすいほど小さな制御変位量で発生する。

5. 繰り返し荷重下の挙動：2種類のトラスタワー完全系の荷重変位曲線を単調載荷の場合と同じ要領で描いた結果を図-4に示す。斜材断面積の小さいTYPE1では、変位振幅が第2分岐点の変位量を越えていないにもかかわらず、繰り返し載荷により座屈モードの局所化が生じ、急速に荷重が低下していく。これは、先にも述べた様に、繰り返し載荷による残留変形の蓄積やバウシinger効果による斜材剛性の低下等が座屈モードの局所化を促進したものと考えられる。一方TYPE2では安定したヒステリシスループを描いている。ただ、繰り返し荷重により若干荷重が低下している。この原因としては、残留変形の蓄積やバウシinger効果による斜材の剛性低下等が考えられる。また、繰り返し載荷後に発生する第2分岐は、この蓄積した残留変形の影響でかなり早く座屈モードの局所化が生ずる。

【参考文献】1) Hill, R : J. Mech. Phys. Solids, Vol. 6, pp. 247-265, 1965 2) Dafalias, Y.F. and Popov, E.P. : J. Appl. Mech., vol. 43, pp. 645-651, 1976 3) 後藤芳顯, 大鹿克敏, 川西直樹, 小畑誠 : No. 446, pp. 117-126 1992.4

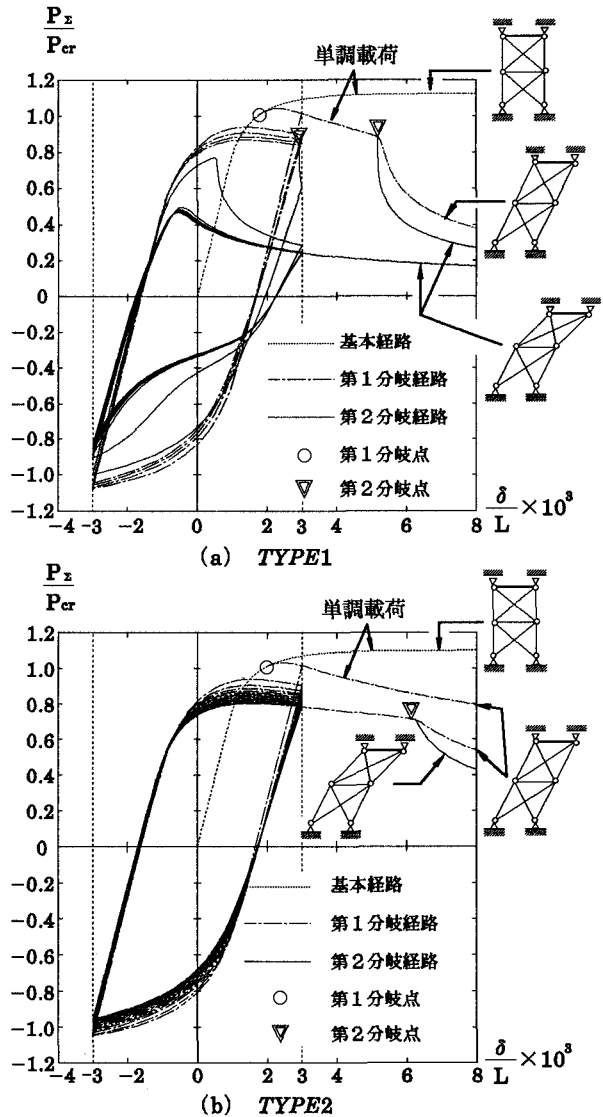


図-4 単調載荷および繰り返し載荷条件下の挙動