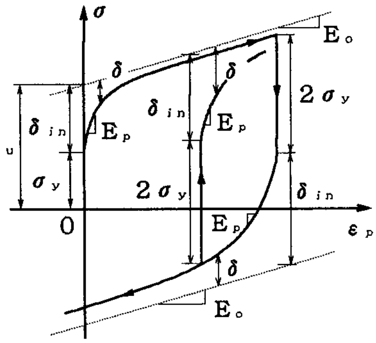
I－18　多点支持柱の座屈モードの局所化と繰り返し荷重下の変形能の低下

名古屋工業大学　学生員　鳥羽　保行　名古屋工業大学　正員　後藤　芳顯
本州四国連絡橋公団　正員　川西　直樹　岐阜工業高等専門学校　正員　宮下　敏

１．まえがき：軸力を受ける構造物の耐荷力は、つり合い経路上に存在する第１分岐点により支配されることは周知のとおりである。しかしながらこの分岐モードが対称である場合、その変形能は分岐後の経路上に存在する第２分岐点に起因する座屈モードの局所化により低下する。ここでは分岐後対称変形を生ずる例として、多点支持柱を対象に繰り返し荷重を受けた場合の座屈モードの局所化が変形能に及ぼす影響を検討する。

２．弾塑性有限変位解析：繰り返し荷重下の材料の構成則は、図１に示すDafalias-Popovのモデルを使用する。棒材の幾何学的非線形解析としては局所的な大変形挙動にも対応できるように有限ひずみ、有限変位問題を正確に扱いうる剛体変位除去の手法[1]を用いる。



$E=2.06\times10^5$	$\delta_{in}=98.1$
$\sigma_y=196$	$h=0.981\times10^5$
$E_0=0.0$	(MPa)

図１　Dafalias-Popov model

３．弾塑性分岐解析：変形能に影響する第２分岐点は、分岐後の極限点以降の荷重減少経路上に存在するために、その分岐挙動は荷重増分型の手法では解析できず、変位制御型の解析手法を用いることになる。荷重載荷点の節点番号をｍとし、ΔD_m を制御変位に選んだ場合の変位制御型の分岐の条件式を文献2)と同様に導くと以下のようになる。

$$\Delta\Pi=(\Delta\overline{D}{}_i^b-\Delta\overline{D}{}_i^f)\,\Delta\widetilde{K}{}_{ij}^c\,(\Delta\overline{D}{}_j^b-\Delta\overline{D}{}_j^f)+(\Delta D_i^b-\Delta D_i^f)\{(\Delta K_{ij}^c-\Delta K_{ij}^f)\Delta D_j^f+(\Delta K_{ij}^b-\Delta K_{ij}^c)\Delta D_j^b\}=0 \qquad (1)$$

ここで、ΔD は変位増分、$\Delta\overline{D}$ は制御する節点変位番号をｍとし、ΔD から第m成分を削除したものを示す。また$\Delta\widetilde{K}_{ij}$ は接線剛性ΔK_{ij} のｍ行ｍ列を削除したものを示し、上添え字ｆ，ｂは、基本経路、分岐経路に関する物理量を表す。上添え字ｃは除荷の場合も負荷剛性をとると仮定するcomparison solidsとしての構造システムを意味する。式(1)を満足する点が分岐点で、この点で、以下の条件式が成立する。

$$det\,|\Delta\widetilde{K}{}_{ij}^c|=0,\ \Delta\mu=0,\ \Delta D_j^b-\Delta D_j^f=CD_j^g \qquad (2.a\sim c)$$

ここに、$\Delta\mu$ は式(1)の第2項、またD_j^g はΔK_{ij}^c の零固有値に対応する固有ベクトル、Ｃは任意定数である。定数Ｃは、基本経路方向ひずみ増分を$\Delta\varepsilon_{ij}^f$ 、分岐経路方向ひずみ増分を$\Delta\varepsilon_{ij}^b$ とすれば、式(2.b)より次式の条件を満足する最小値として定めることができる。

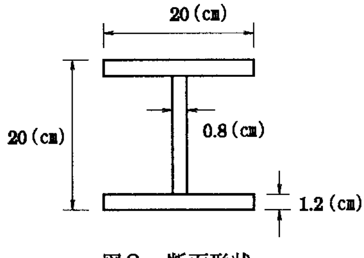


図２　断面形状

$$\Delta\varepsilon_{ij}^f\geqq0\ ,\ \Delta\varepsilon_{ij}^b\geqq0 \qquad (3.a,b)$$

つまりC の最小値をC_{min} とすれば分岐ベクトルは次式で与えられる。

$$\Delta D_j^b=\Delta D_j^f+C_{min}\times D_j^g \qquad (4)$$

これを分岐経路方向の変位増分ベクトルとして収束計算を行えば分岐の第１ステップの解が得られる。すなわち、第２分岐の場合も第１分岐の場合とほぼ同様に分岐経路を追跡することができる。

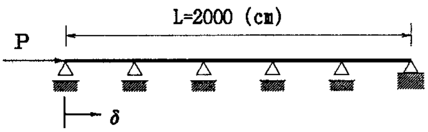


図３　解析対象

4．数値計算例と考察：解析対象は５点で等間隔に支持された図３に示す多点支持柱を考える。はじめに、単調変位増分下の挙動について解析した結果を図４に示す。これより、第１分岐の後、対称座屈変形モードで変形が進み少しの間荷重増加がみられる。これは分岐した後に部材が除荷し剛性が上がるためである。そして極限点を越えたすぐ後に第２分岐点が存在する。この分岐モードは端部の座屈変形が卓越するモードである。第２分岐経路での特徴としては荷重減少が第１分岐経路に比べさらに顕著で、変形能も大きく低下することである。これは対称座屈変形モードでは塑性化がある程度均一に起こるが、非対称座屈変形モードでは塑性化が局所的に集中するためである。

次に、繰り返し荷重下の解析結果を図５と図６に示す。まず図５は第１分岐点の直後で１０回繰り返した後に制御変位を増加させたものである。最初は第２分岐点の影響を受けないので変形の局所化は起こらず、繰り返し荷重により生じる残留変形により最大荷重が減少していく。そしてサイクル数が増えるにしたがって残留変形も大きくなり、３サイクル目に第２分岐点の影響をうけて変形の局所化が起こる。その後非対称座屈変形モードで変形が進み最大荷重も減少していく。図６は第２分岐点の後で１０回繰り返した後に制御変位を増加させたものである。この場合は１サイクル目にすでに変形の局所化がおこっているので、２サイクル目に最大荷重が大きく低下し、その後残留変形によって少しずつ最大荷重が減少していく。

5．あとがき：繰り返し荷重を受ける構造物の変形能の低下は極限点以降に存在する分岐点による変形の局所化が１つの要因であることが明らかになった。したがって構造物の変形能を正確に把握するには、後座屈領域の分岐挙動を解析する必要がある。なお座屈モードの局所化は板構造物においても良く知られており、第２分岐点の解析は有効と考える。

【参考文献】1)後藤芳顯，吉光，他
：土木学会論文集，1991.4
2)後藤芳顯，大鹿克敏，川西直樹，小畑誠
：土木学会論文集，1992.4

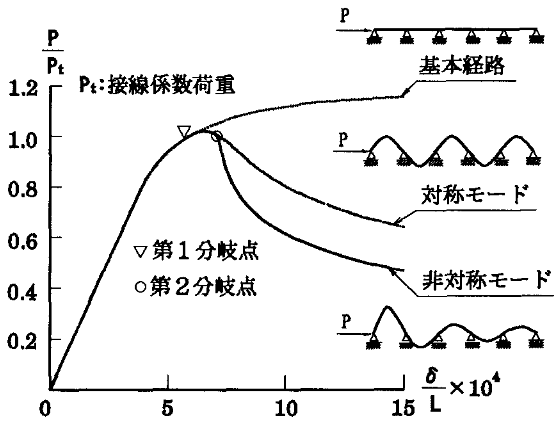


図４　単調載荷条件下の挙動

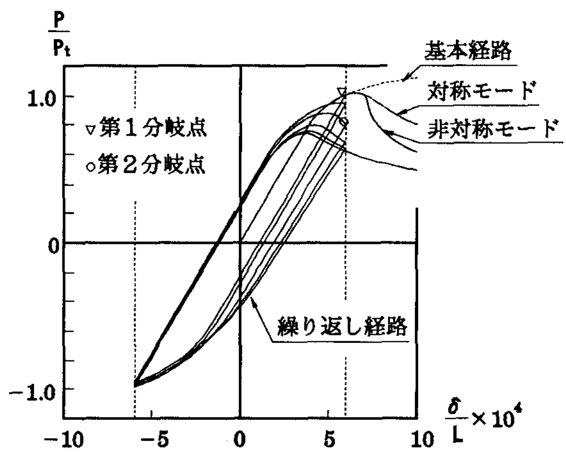


図５　第１分岐点を越えてからの繰り返し経路

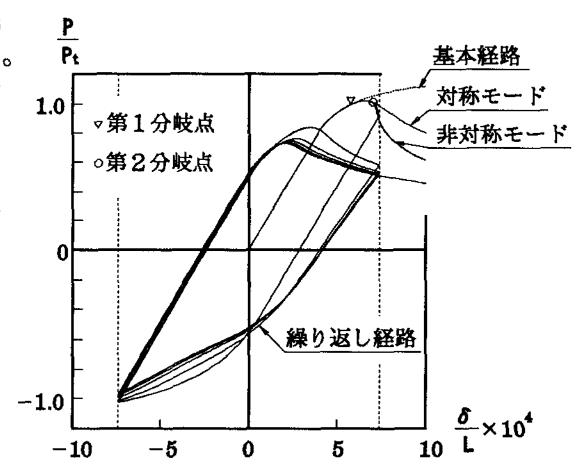


図６　第２分岐点を越えてからの繰り返し経路