



基礎 1 2 7 話 No.2 不安定現象と座屈の分類

今回も前回に続いて骨組の非線形性、特に幾何学的非線形問題についてお話する。図 3 に示す 2 種の骨組に静的な荷重を載荷した状態について考える。骨組 (a) は、アーチやドームを模擬した最も単純な解析モデルであり、荷重と変位の関係は図 3(c) の曲線 (a) となる。この荷重と変位の関係を表す曲線は、一般に**釣合曲線**と呼ばれ、同構造では、荷重の増加と共に変位の割合が大きくなる。逆に、骨組 (b) はつり構造に代表されるような引張軸力が主体となる構造であり、荷重と変位の関係は同図(c)の曲線 (b) のように荷重が増加するに従って、変位の増加が小さくなる特徴を有する。

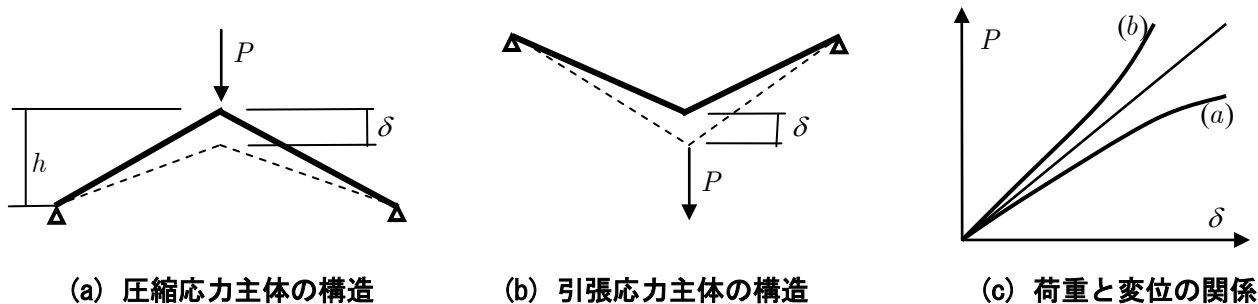


図 3 骨組の非線形性挙動

上記の構造であっても、荷重が微小である場合、荷重—変位図形はほぼ直線といって良く、これを**線形挙動**と呼ぶ。逆に、変位が大きくなると構造種別によって大きくその挙動が異なることになり、これを**非線形挙動**、あるいは**大変位による挙動**と呼ぶ。特に、同図(a)に示されるような構造は特異なふるまいを示す場合がある。次にこれらの挙動を分析し、分類しておこう。

図 3(a) の構造で、変位がさら大きくなると荷重と変位は、図 4 の関係となる場合がある。釣合曲線はある点 (図上の a 点) で屈曲し、変位が増加するに従って荷重が減少する現象が現れる。この屈曲点はリミットポイント(極限点、屈服点)であり、また、その点で生じる現象を**屈服座屈**(snap-through buckling)と呼ぶ。リミットポイントに達した後も荷重を増加させると、釣合状態は図の a 点から b 点に、部材の応力は圧縮状態から引張状態に瞬時に移行する。この現象は**飛び移り**と呼ばれ、実際の現象にも見られる。一方同図の釣合曲線 a-c 間は不安定な釣合であり、この釣合状態を得るためには、実験でも数値解析でも変位を制御しながら注意深く実施する必要がある。

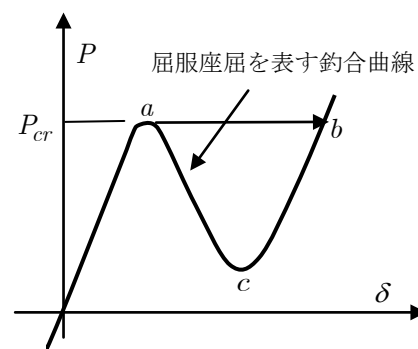


図 4 屈服座屈を示す釣合曲線

屈服座屈には、図 4 のように引張状態となって再度安定釣合を示す場合と、構造形式によってはこのような状態が存在せず不安定のまま耐力を低下させ、崩壊に至る場合とがある。

図 3(a) の構造で、高さ h が大きくなると図 5 のように、釣合曲線上に他の釣合曲線が交差する分岐点 a が現れる場合がある。この現象は**分岐座屈(bifurcation buckling)**と呼ばれ、この分岐点を越えると釣合経路は同図 a 点から b 点に移行する。この a - b 間は不安定な釣合であり、この間の変形状態は座屈前と全く異なった変形形状を示す。

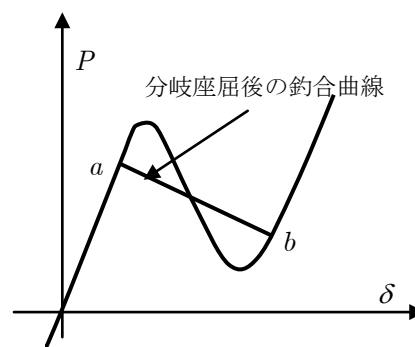


図 5 分岐座屈を示す釣合曲線

分岐座屈は、図 6 のように座屈後の釣合曲線の状態によって分類されている。まず、対称型と非対称型(同図 C)に分類され、対称型には安定型(A)と不安定型(B,E)に分類される。また、屈服座屈後の釣合経路にも、図のように分岐点が発生する場合もある。

以上をまとめると、幾何学的非線形性による座屈形態は屈服型と分岐型に分類され、分岐型は対称分岐と非対称分岐に分かれる。

また、対称分岐には安定型と不安定型があり、座屈時には、座屈前の変形と全く異なる変形状態に変化する。特に不安定型分岐座屈の座屈後挙動は、不安定となった変形モードが大きくなるに従って耐荷能力が低下する。一方、屈服型では、座屈前の変形状態と同種の変形で不安定となる。屈服点を越えるとその変形状態が大きくなるが、荷重は低下する。この座屈の特徴は、近くに安定釣合曲線が存在すると、その状態に瞬時に移行する。この現象は飛び移りと呼ばれ、実際の現象でも多く見られる。

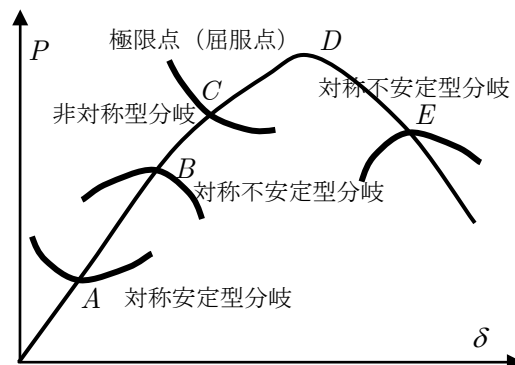


図 6 座屈点の分類

一般的に、建築の構造解析では、幾何学的非線形性は特殊な構造形態以外、ほとんど考慮されることはない。例外として、変形が大きく生じる立体トラスドームなどスペースフレームの応力解析や、高層のビルや免震装置に生じる $P-\Delta$ 効果などがある。また、鉄骨構造内のブレースにおける座屈後挙動でも幾何学的非線形性を考慮した手法が用いられる。ただし、このような大変形問題では数値計算の安定性が悪く、まれに解が発散する。そのため、この種の問題を扱うには多くの経験と知識を必要とする。そこで $P-\Delta$ 効果や座屈後挙動では、上記の幾何学的非線形性を考慮した手法ではなく、付加荷重や材料非線形問題に置き換える方法が良く用いられる。上記の方法で安定性が担保され、誰もが使用できるようになる。

弾塑性解析における崩壊解析は、以後、詳細にお話しする予定である。