

Pushover 解析による鋼製橋脚の地震時保有水平耐力照査

宇佐美 勉

フェロー会員 D.Sc. 名古屋大学教授 大学院工学研究科土木工学専攻(〒464-01 名古屋市千種区不老町)

1 緒言

弾塑性2次静的解析（Pushover 解析）に基づく鋼製橋脚の地震時保有水平耐力照査法の概要について述べる[1]。対象構造物は、コンクリート部分充填あるいは無充填の単柱形式（逆L型を含む）およびラーメン形式鋼製橋脚である。基本的な考えは、文献[2]に基づいている。適用例として名古屋高速道路公社が行った単柱式コンクリート部分充填鋼製橋脚（約1/3縮尺）の実験を用いる[3]。

2 Pushover 解析の概要[1,2]

(1) 解析モデル

Pushover 解析は1次設計時の荷重状態の慣性力に相当する水平荷重を単調に増大させた解析を行う。図1に示すような2層ラーメンで1層および2層のほりに上部構造（それぞれ、重量が W_1 、 W_2 ）が載るような構造の場合には、荷重状態は左側の図に示したようになる。ここで、 k_{hc} は設計水平震度である。道路橋示方書[4]では水平震度の高さ方向の分布には触れられていないので、高さ方向に一定の水平震度に上部構造重量 W_1 を乗じて慣性力を求める。この構造に対する解析モデルは右側の図に示したようなものになる。ここで、鉛直力は左側の図の場合と同じであるが、水平力は2つの慣性力の比を保ちながら単調増大させていく。そのため、図の場合には上段の水平力を H 、下段の水平力を $H \cdot W_1/W_2$ として、上部構造重量 W_1 を一定に保ちながら H を徐々に増加させる荷重条件で解析を行う。なお、解析は充填コンクリートの有無に関わらず、ほぼ同じ手法を用いることが出来る。

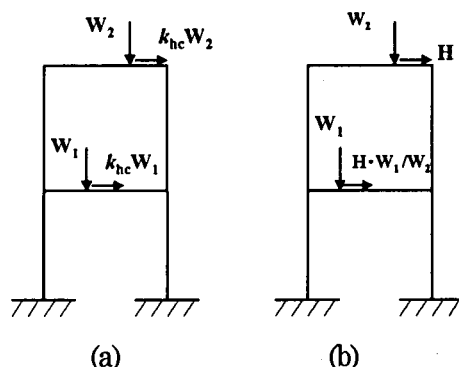


図1 Pushover 解析: (a)荷重状態, (b)解析モデル

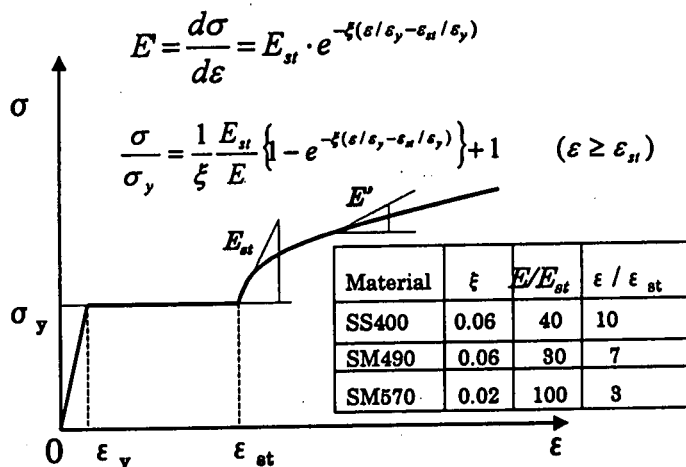


図-2(a) 鋼材の応力-ひずみ関係（引張および圧縮）

(2) 応力-ひずみ関係および破壊条件

解析には次の量を定める必要がある。

- ①材料の応力-ひずみ関係
- ②構造物の破壊条件

①に対しては、新技術報告書[2]に鋼（SS400～SM570）およびコンクリートに対する応力-ひずみ関係の具体的な形が与えられているのでそれらを使用すればよい（図2）。鋼材に対しては、引張および圧縮とも同じ応力-ひずみ関係を用い、ひずみ硬化を必ず考慮する。ひずみ硬化を考慮しないと変形が一断面のみに集中し、塑性域が

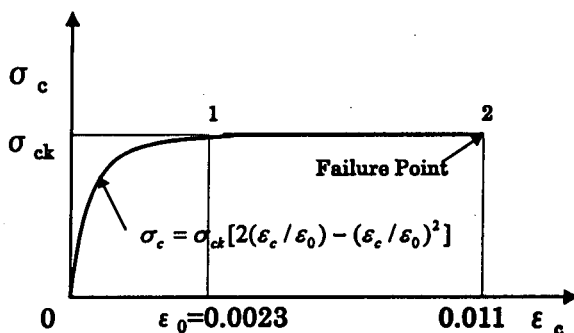


図-2(b) コンクリートの応力-ひずみ関係（圧縮）

広がらないため誤った結果を得る。コンクリートは引張り強度を無視し、圧縮破壊はコンクリートが橋脚内部に拘束されているので、1.1%まで生じないものとしている[5]。

②は解析によって求められる水平荷重—水平変位 ($H-\delta$ 曲線) の終点 (後述の終局水平変位 δ_u) を定めるために必要な条件である。これについては、補剛箱形断面橋脚に対して文献[2]に詳細に記述されている。詳細は同文献に譲るが、基本は最も危険な断面を含む部材のセグメント (有効破壊長と称する長さを持つ部材セグメント) が過度の局部座屈、塑性化などにより変形能を失ったとき、すなわち回転容量 (Rotation capacity) を越えたとき構造物は破壊すると仮定する。なお、断面が比較的厚肉で変形能は十分あるものの、構造がスレンダーでしかも鉛直荷重が大きい橋脚 (いわゆるハイピヤー構造) の場合には、断面が変形能を失う前に $P-\Delta$ 効果により荷重降下が生ずる場合がある。この場合には、最高荷重の 95% の荷重点を終局限界とする[2]。

以上をまとめると、構造物の破壊は次のいずれかが生じたときで、その点が終局限界である。

- ①構造物の一部が部材セグメントとしての変形能を失う (すなわち回転容量を超える)。
- ②構造物全体が不安定になり荷重が最高荷重の 95% まで降下する。

新技術報告書[2]には、補剛箱形断面橋脚 (コンクリート充填および無充填) に対する具体的な計算法が示されている。パイプ断面、八角形断面、その他の断面に対しては、鋼断面の変形能を求める式さえ準備すれば同じように適用可能である。

(3) 解析方法

Pushover 解析には、1 次解析 (微小変位解析) で十分な場合も多いが、結果が妥当であるかどうかの判定が難しいので 2 次解析を行うのがよい。ただし、Pushover 解析で取り扱わなければならない非線形性は材料非線形の方が主体で、幾何学的非線形性はあまり強くない。新技術報告書[2]には鋼製橋脚の保有水平耐力算定専用の解析プログラムの解説があり、プログラムソフトは市販されている。なお、解析では鉛直荷重をまず加え、ついで鉛直荷重を一定に保ちながら水平荷重を増加させる。解析は、前述の終局限界に達するまで継続される。

(4) 結果の解釈

解析結果は図 3 のように、水平荷重 H とその作用点の水平変位 δ として表される。ただし、水平変位は水平荷重を増加させたときからの変位で、それまでの鉛直荷重による変位は考えない。図 3 の δ_u は終局変位であり、 δ_a はそれに安全係数を見込んで定めた許容変位である。

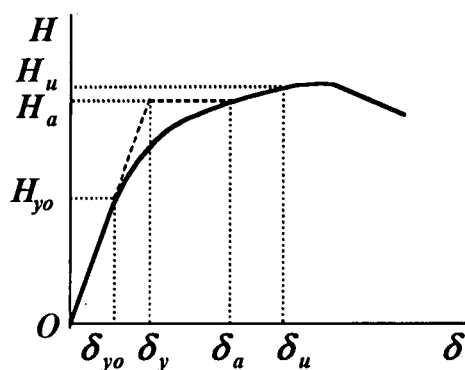


図-3 Pushover 解析結果 ($H-\delta$ 曲線)

道示に従えば、 δ_a に対応する水平荷重が保有水平耐力 H_a になる。これらの量から、単柱および 1 層ラーメンに対しては、要求性能および保有性能が求められる。一方、2 層のラーメンについてはまだ定まった方法がないが、たとえばエネルギー一定則を構造物全体の塑性率 (Global Ductility) $\mu_a = \delta_u / \delta_y$ から計算できるとして、次式から要求性能 (D) および保有性能 (S) を計算し、照査を行う。

$$D = k_{hc} W_2 (1 + W_1 / W_2)$$

$$S = \sqrt{2\mu_a - 1} \cdot H_a (1 + W_1 / W_2)$$

$$S \geq D$$

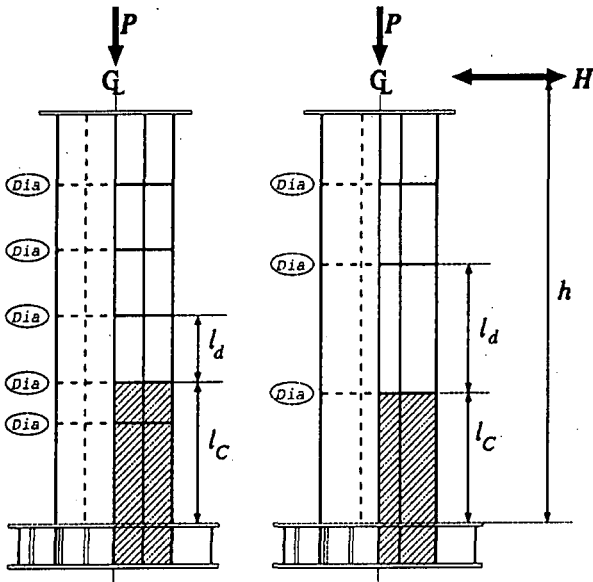
上記の計算仮定から分かるように、この方法は基本振動モードが卓越するとき妥当な解を与えると考えられる。最後に、Pushover 解析に対するコメントを若干述べてい

- (1) この方法は 1 方向載荷に対する骨組構造解析であり、局部座屈は考慮しない。従って、有限要素法を用いるときは棒要素を用いなければならない。
- (2) 解析には、部分塑性化およびひずみ硬化等に伴う構成要素の材料特性の変化、 $P-\Delta$ 効果 (幾何学的非線形性)、および水平荷重による柱の軸力の変化等が考慮されなければならない。
- (3) 従って、鉄筋コンクリート橋脚の解析に用いられるような、 $M-\phi$ 関係を用いた解析よりは、応力—ひずみ関係をそのまま用いた解析 (Fiber model) の方がよい。
- (4) ラーメン構造の解析には隅角部のせん断変形が考慮できる解析が望ましい。
- (5) 残留応力、初期たわみは一般に考慮しなくても良い。それらの影響は繰返し載荷の際は消滅してしまうため単調載荷で繰返し載荷を代用している本解析では無視しても良いと考えられる。
- (6) Pushover 解析は動的解析の便法の一つであり、高次

表—1 供試体パラメータおよび材料定数

供試体名	N-3		N-4		N-5	
	中空断面	充填断面	中空断面	充填断面	中空断面	充填断面
B (mm)	900		900		900	
D (mm)	880		882		882	
t (mm)	10		9		9	
n	4		3		3	
h (mm)	3423		3425		3423	
l_d (mm)	470	810	1030		1030	
l_d/h (%)	32		30		30	
γ/γ^*	3.17	1.04	0.52	0.52	3.09	0.52
R_f	0.488		0.727		0.727	
λ	0.257		0.255		0.262	
λ_s	0.297		1.122	0.527	1.122	
PP_y	0.15		0.15		0.15	
σ_y (kgf/mm ²)	36.5		36.9		36.9	
σ_c (kgf/mm ²)	1.57		1.74		1.71	

注): B =フラジ幅; D =ウェブ幅; t =板厚; n =サマベれ数;
 H =供試体高さ; l_d =ダイアム間隔; l_d/h =コンクリート充填率;
 γ/γ^* =補剛材剛比/最適剛比; R_f =幅厚比パラメータ;
 λ =細長比パラメータ; λ_s =補剛材細長比パラメータ;
 PP_y =軸圧縮力; σ_y =鋼材の降伏応力;
 σ_c =コンクリートの圧縮強度。



N-3 供試体 N-4, N-5 供試体
図—4 実験供試体

のモードが卓越する場合は精度が悪くなる。従って複雑な構造物の場合には動的解析も同時に実施し破壊モードが両解析で一致するかどうかを確かめるのがよい。

3 Pushover 解析の精度の検証

計算法の精度の検証として、名古屋高速道路公社が平成8、9年度に実施したコンクリート部分充填単柱式鋼製橋脚の繰返し載荷実験結果を用いる[3]。実験は5体行われたが、その内2体(N-1, N-2)の実験結果と解析結果の比較は文献[6]に報告されている。本文では、残りの3体(N-3, N-4, N-5)の実験結果との比較について触れる。

供試体はいずれも、実物のほぼ1/3縮尺模型であり、概要図を図4、諸元を表1に示す。N-3供試体はコンクリート充填率=31%、幅厚比パラメータ=0.46、細長比パラメータ=0.26、縦方向補剛材剛比/最適剛比=3であり、文献[5]の最適コンクリート充填高さに近く、8.0程度の大きな変形能が期待できる供試体である。N-4, N-5供試体は既設橋脚に対する縦方向補剛材の補強効果を調べるために計画された実験で、N-4が補強前、N-5が補強後の橋脚を想定している。N-4は中空断面部の補剛材剛比が最適剛比の0.52でかなり小さいが、N-5供試体は補剛材が補強されたことを想定して最適剛比の3倍程度の大きさの補剛材剛比が用いられている。なお、いずれの供試体もコンクリートは柱基部に柱高さの30%だけ充填されている。

図5~7は実験より得られた水平荷重—水平変位の履歴曲線を数値解析結果と比較したものである。ただし、図5のN-3供試体については、柱基部(コンクリート充填部)の損傷度 D_b 、中空断面部最下端での損傷度 D_s の計算値もプロットしてある。図中の黒丸の点が計算より求められた柱の破壊点である。前述のように、柱は D_b と D_s のいずれかが1.0に達すれば破壊すると仮定しており、それらが同時に1.0に達する充填率が最適充填率である[5]。図5より、N-3供試体はコンクリート充填部が多少先に限界状態に達するものの、充填率はほぼ最適充填率に近く、従って変形能の計算値は7.0近くある。実験の履歴曲線の包絡線と解析結果は非常に良く一致しており、終局状態を表す破壊点は実験の想定破壊点(荷重がピークを過ぎて95%まで低下した点)に比較的良好一致し、安全側にある。図6, 7より、補強による効果が歴然と現れており、補強による変形能の増大は2倍以上に達する。N-4供試体は中空断面部の変形能が小さいため、その部分が先に限界状態に達して局部座屈が進展して、耐荷力が急激に低下している。一方、N-5供試体は中空断面部の補剛材の補強によるその部分の変形能の増大のため、コンクリート充填部が先に限界状態に達し、柱は大きな変形能が得られている。計算値は、そのような実験結果を的確に捉えているといえる。

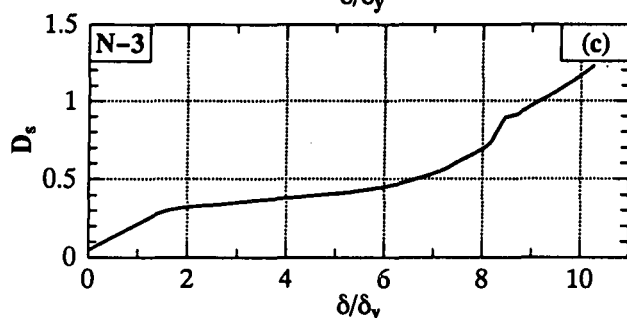
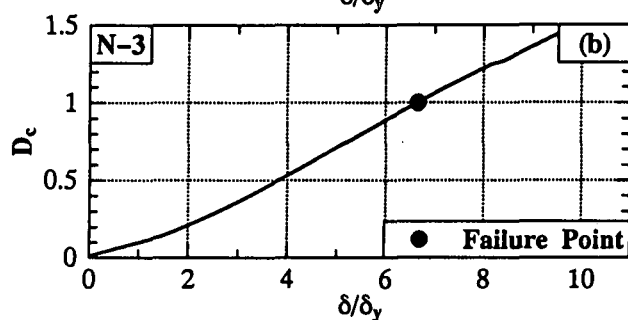
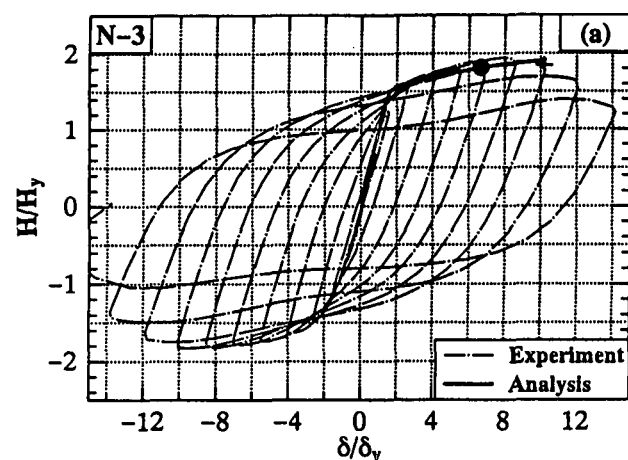


図-5 N-3 供試体実験および解析結果

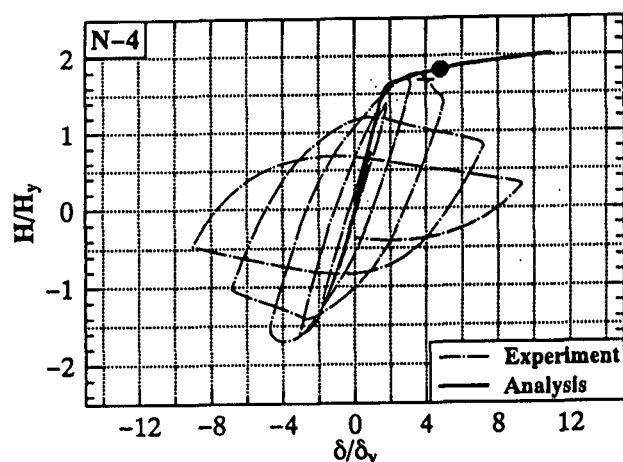


図-6 N-4 供試体実験および解析結果

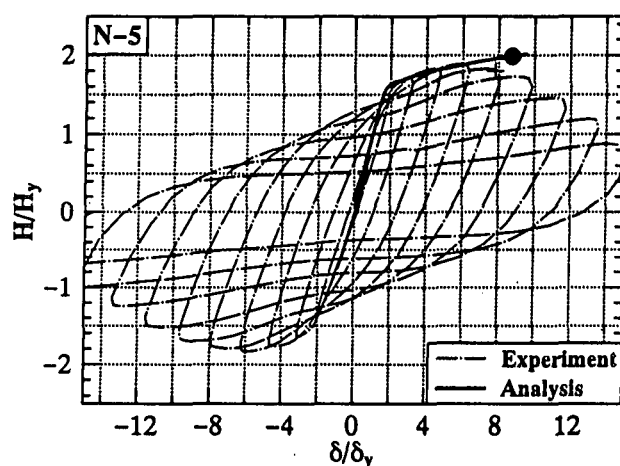


図-7 N-5 供試体実験および解析結果

4 結言

Pushover 解析による鋼製橋脚の保有水平耐力照査法の概要および大型コンクリート部分充填単柱式鋼製橋脚のくり返し載荷実験結果との比較による提案解析法の妥当性の検証について述べた。図 5~7 に見られるように、解析結果は実験結果と包絡線、破壊点とも、非常によく一致することが分かった。今後は、ラーメン式橋脚について解析結果の照査を行う必要がある。最後に、資料を提供していただいた名古屋高速道路公社に感謝いたします。

参考文献

1. 宇佐美勉：鋼構造物の耐震設計の将来展望，「土木構造物の耐震・免震設計の現状と将来の展望」，土木学会中部支部第3回技術講座，平成9年12月。
2. 土木学会鋼構造委員会・鋼構造新技術小委員会・耐震設計WG（主査：宇佐美勉）：鋼橋の耐震設計指針案と耐震設計のための新技術，1996年7月。
3. 道路橋橋脚の地震時限界状態設計法に関する共同研究，平成9年，建設省土木研究所等6社共同研究。
4. 日本道路協会：道路橋示方書・V 耐震設計編，1996年12月。
5. 葛西昭・葛漢彬・宇佐美勉：コンクリート部分充填鋼製橋脚の耐震性能，橋梁と基礎，1997年9月。
6. 葛西昭・天野麻衣・宇佐美勉・葛漢彬・岡本真吾・前野裕文：コンクリート部分充填 鋼製橋脚の非線形解析と実験，鋼製橋脚の非線形数値解析と耐震設計に関する論文集，土木学会・構造工学委員会，pp. 153-160，1997年5月。