

RC One Point Advice #5

鉄筋コンクリートラーメン橋脚の崩壊過程と靱性評価

要旨

ラーメン構造は通例不静定構造物となり、その崩壊過程では複数の塑性ヒンジを順次形成しながら、最終的にメカニズムに至る。本報では、道路構造物にて多用されるラーメン橋脚（鉄筋コンクリート造）を対象として、静的非線形解析（プッシュオーバー解析）を実施し、その崩壊過程と靱性評価について例示/考察するものである。

なお、本報は、文献[1]にある本学卒業論文を基に編集したことを付記する。

1. 解析対象

1.1 構造形式と構造寸法

図 1.1 に示す橋梁[2]の P2 橋脚を対象とし、鉄筋コンクリートラーメン橋脚（以下 RC ラーメン橋脚）をモデル化する。表 1.1 に、上部構造と下部構造の構造諸元を示す。

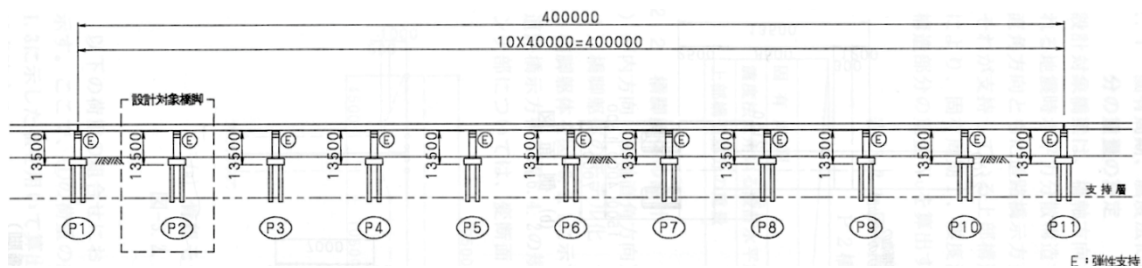


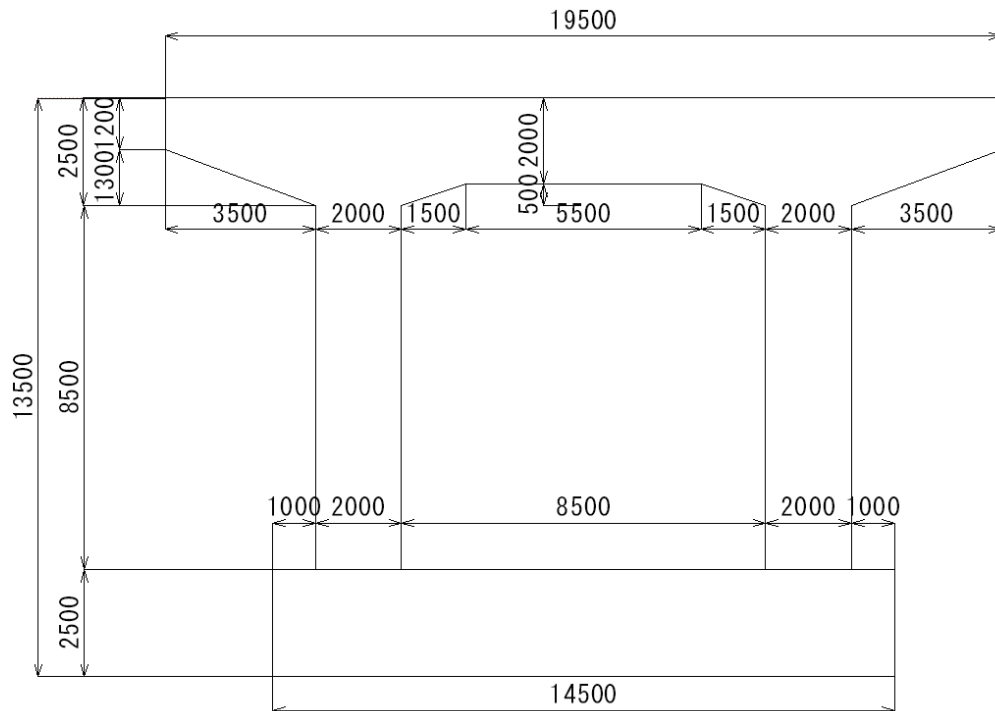
図 1.1 対象橋梁

表 1.1 構造諸元

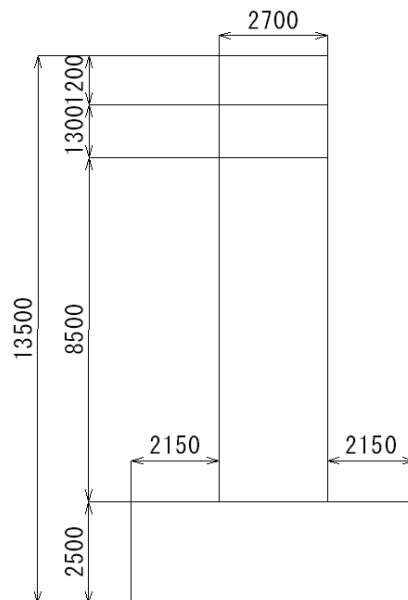
| 名称 | | RCラーメン橋脚を有する桁橋 | |
|------------|-------|----------------|---------------------|
| 略称 | | 連続桁橋 | |
| 上部構造 | 形式 | 10径間連続鋼I桁橋 | |
| | 支間割 | 40m × 10径間 | |
| | 幅員 | 全幅員19.450m | |
| | 活荷重 | B活荷重 | |
| | 支持条件 | 弾性支持 | |
| | 支承の種類 | ゴム支承(タイプB) | |
| 下部構造 | 橋脚 | ラーメン橋脚 | |
| | 基礎 | 場所打ち杭 | |
| | 使用材料 | コンクリート | 24N/mm ² |
| | | 鉄筋 | SD345 |
| 重要度の区分 | | B種の橋 | |
| 地域区分 | | A地域 | |
| 耐震設計上の地盤種別 | | II種地盤 | |

1.2 構造寸法

図 1.2 に解析対象橋脚の構造寸法を示す。対象構造物は、(社)日本道路協会の「道路橋の耐震設計に関する資料」[2]に記載されている、一般的な橋梁条件として取り上げられている RC ラーメン橋脚を参考にした。図 1.3 に柱部材と梁部材の断面寸法と配筋図を示す。



(a) 正面図



(b) 側面図

図 1.2 解析対象の構造寸法

1.3 設計条件と耐震性能照査

本論では、レベル2地震動タイプIIを対象とする。表1.2にRCラーメン橋脚（図1.2）の設計条件と耐震性能照査の一部を示す。

表 1.2 設計条件と耐震性の照査

| 設計条件 | | |
|-----------|----------------|--------|
| 固有周期 | T(s) | 1.23 |
| 上部工重量 | Wu(MN) | 9.6 |
| 耐震性の照査 | | |
| 破壊形態 | 曲げ破壊 | |
| 地震時保有水平耐力 | Pa(MN) | 8.796 |
| 慣性力 | $k_{hc}W$ (MN) | 4.828 |
| 設計水平震度 | k_{hc} | 0.4 |
| 等価重量 | W(MN) | 12.071 |

2. 解析手法

2.1 RCラーメン橋脚のモデル化

まず、RCラーメン橋脚の降伏限界および終局限界における水平変位および水平耐力を算出する。このため、RCラーメン橋脚の立体図（図2.1）をRCラーメン橋脚を橋軸方向に39点の多質点多要素系の骨組モデル（図2.2）を示した。なお、接合部には道路橋示方書に準拠した剛域を設けた。図2.2のA～Fは、塑性ヒンジの発生が想定される点を示している。

図2.2において慣性力作用位置に水平力を静的に漸増させる静的プッシュオーバー解析[3]を実施し、水平力と水平変位の関係を算定した。

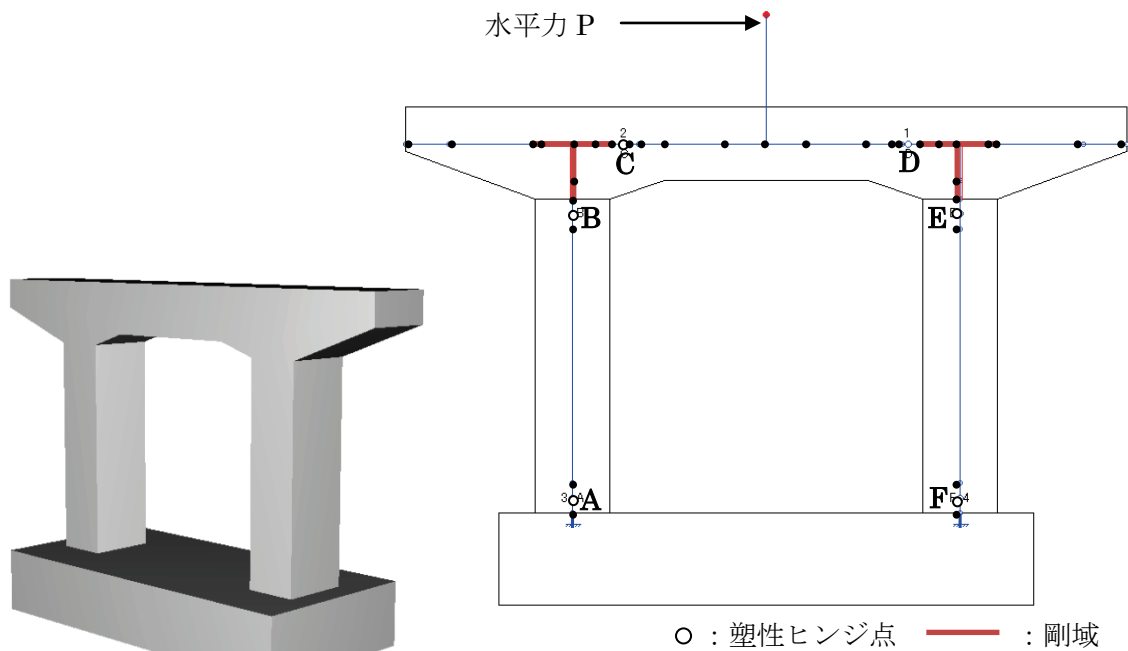


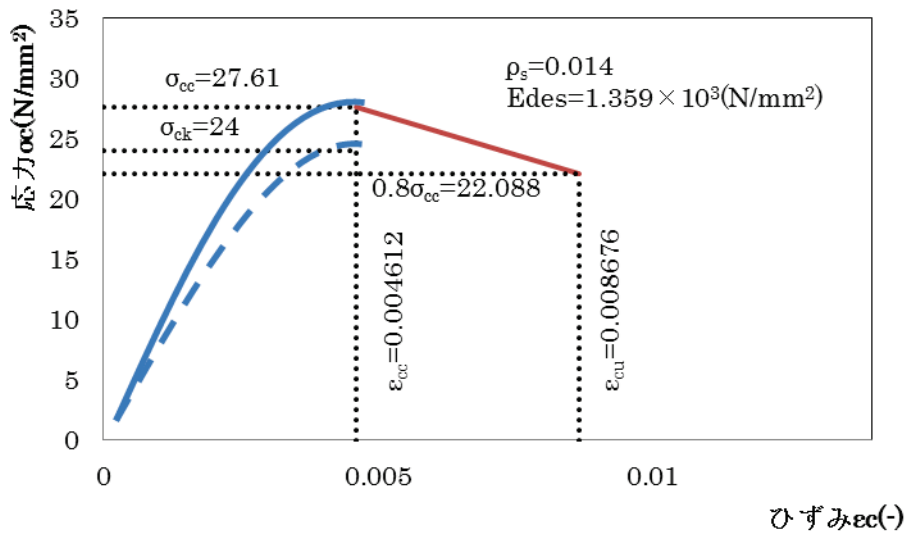
図 2.2 平面骨組モデル

図 2.1 立体図

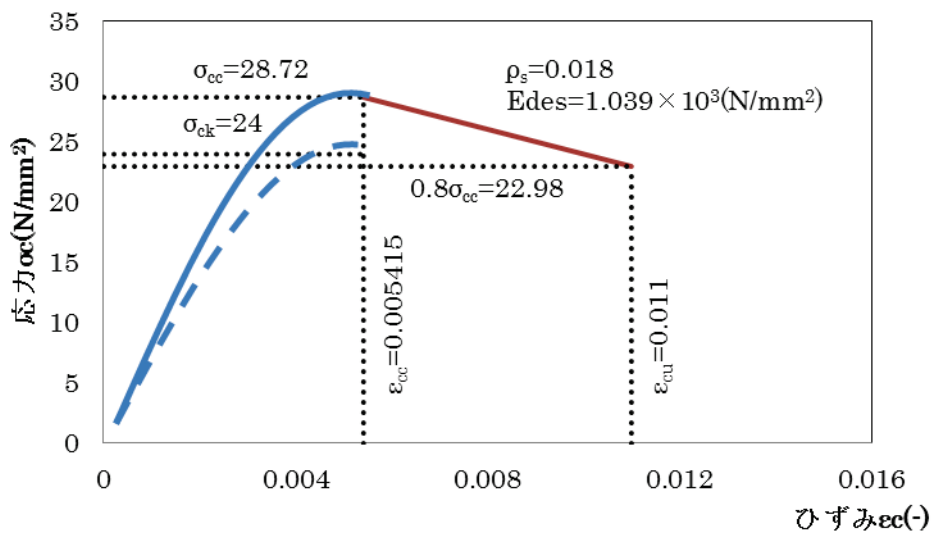
2.2 材料特性

次に、RC ラーメン橋脚の水平力と水平変位の関係を算出する際に用いるコンクリートと鉄筋の応力度-ひずみ関係（ $\sigma - \varepsilon$ 関係）を、道路橋示方書の規定に基づいて示したい。

(1) コンクリート



(a) $\sigma - \varepsilon$ 曲線（梁部材）



(b) $\sigma - \varepsilon$ 曲線（柱部材）

図 2.3 コンクリートの応力-ひずみ関係（ $\sigma_{ck}=24\text{N/mm}^2$ としている）

ここに,

| | | | | |
|--------------------|---|---|--|--|
| σ_c | : | コンクリート応力(N/mm ²) | | |
| σ_{ck} | : | コンクリートの設計基準強度(N/mm ²) | | |
| σ_{cc} | : | 横拘束筋で拘束されたコンクリートの強度(N/mm ²) | | |
| ε_c | : | コンクリートひずみ | | |
| ε_{cc} | : | コンクリートが最大圧縮応力に達するときのひずみ | | |
| ε_{cu} | : | 横拘束筋で拘束されたコンクリートの終局ひずみ | | |
| ρ_s | : | 横拘束筋の体積比 | | |
| E_{des} | : | 下降勾配(N/mm ²) | | |

図 2.3 において、点線は横拘束筋を用いない場合の応力-ひずみ関係を、実線は横拘束筋を用いた場合を示している（梁・柱ともに $\sigma_{ck}=24\text{N/mm}^2$ としている）。横拘束筋を用いた場合、梁部材は $\sigma_{cc}=27.61\text{N/mm}^2$ 、柱は $\sigma_{cc}=28.72\text{N/mm}^2$ となり、コンクリートの強度 σ_{cc} は拘束しない場合のコンクリート設計基準強度 σ_{ck} よりも強度が増大することが分かる。また、コンクリートが最大圧縮応力に達するときのひずみ ε_{cc} や終局ひずみ ε_{cu} も増大することが分かる。曲げ破壊型の RC 橋脚の水平力と水平変位の関係を算出する際には、横拘束効果を見込んだ応力-ひずみの関係を用いることが多い。

(2) 鉄筋

図 2.4 に鉄筋の応力度とひずみの関係を示す。

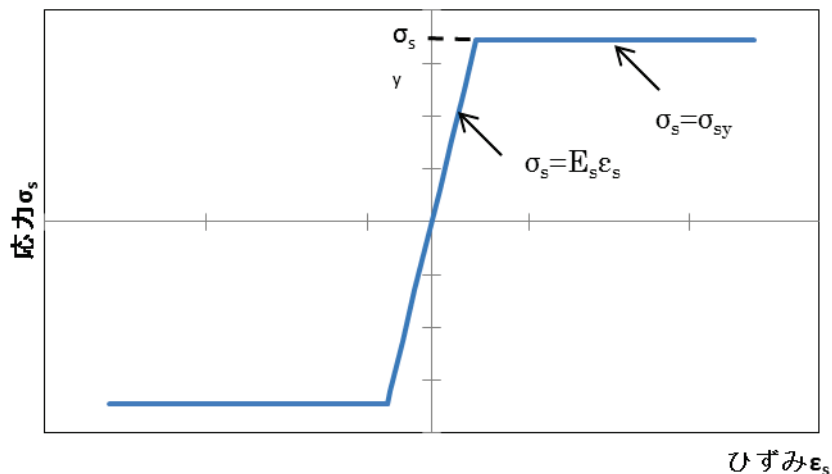


図 2.4 鉄筋の応力度-ひずみ曲線

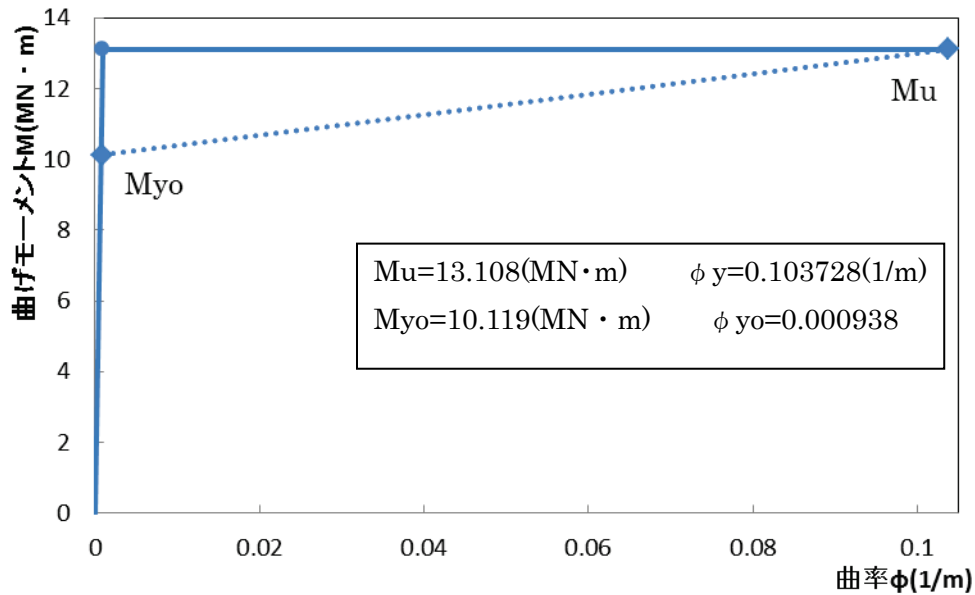
ここに,

| | | | |
|-----------------|---|------------------------------|--|
| σ_{sy} | : | 鉄筋の降伏点(N/mm ²) | |
| σ_s | : | 鉄筋の応力度(N/mm ²) | |
| E_s | : | 鉄筋のヤング係数(N/mm ²) | |
| ε_s | : | 鉄筋のひずみ | |

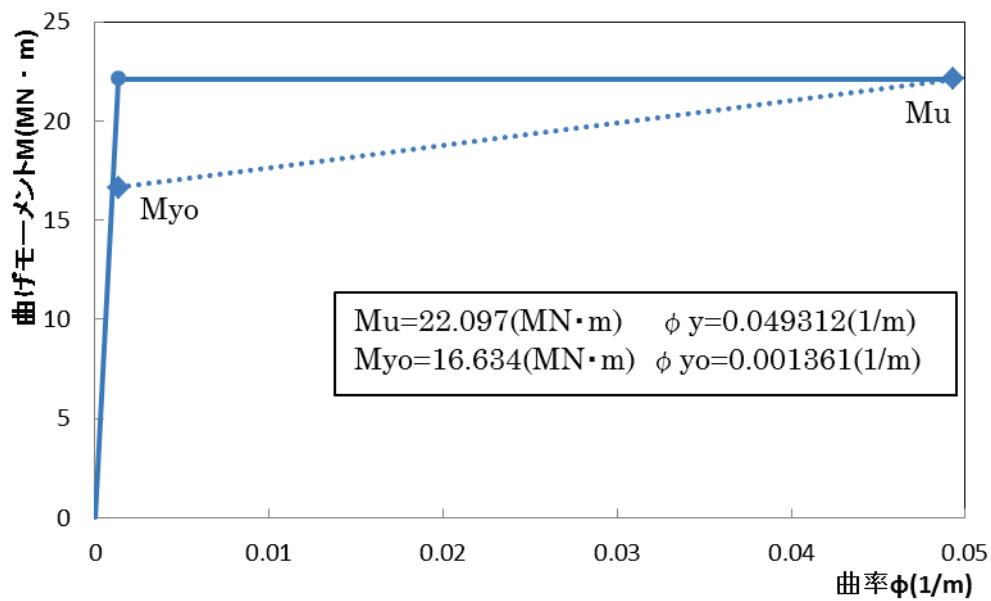
3. 非線形挙動と崩壊過程

3.1 断面の M- ϕ 図

梁部材と柱部材それぞれの断面の曲げモーメントと曲率の関係を以下の図 3.1 に示す。



(a) 梁部材



(b) 柱部材

図 3.1 M- ϕ 図

3.2 崩壊過程：塑性ヒンジ部の降伏発生順序と終局発生順序

(1) 水平荷重と崩壊過程

RC ラーメン橋脚の耐震設計では、特定層に破壊が集中する破壊機構を回避することが重要である。すなわち、骨組全体でエネルギーを吸収し、ある部位が損傷を受けても破壊しない全体降伏機構の形式となることが望ましい。そのためには、意図した箇所に塑性ヒンジを形成するように計画・設計することが肝心である。

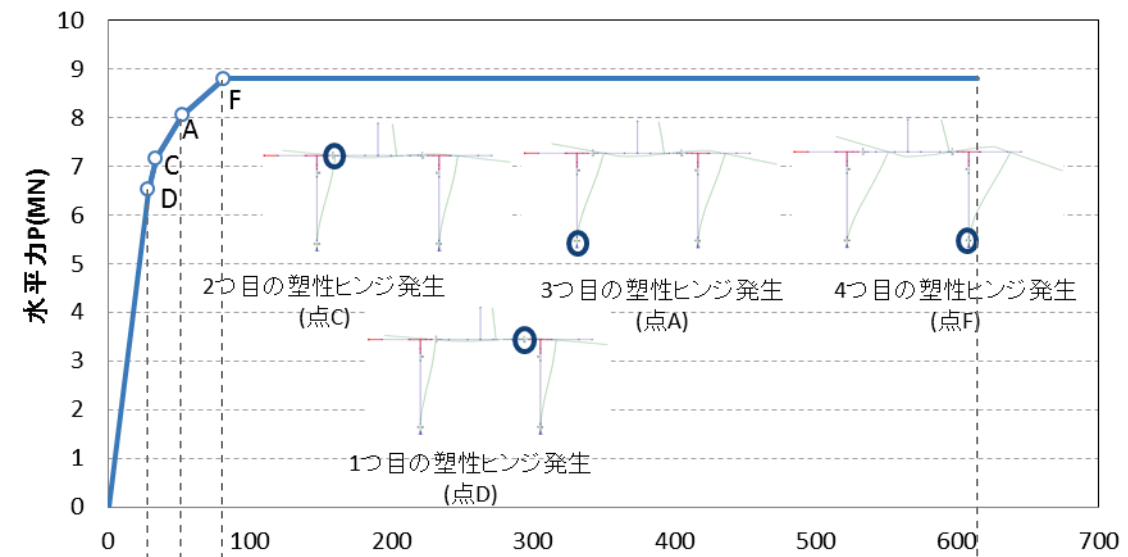
(2) 塑性ヒンジ部の降伏発生順序

RC ラーメン橋脚の骨組モデルに作用する水平力を漸増させると、柱部材の上端部と下端部、梁部材の左右端部が、塑性ヒンジの発生候補箇所となる（いずれも、曲げモーメントが最大値となる箇所である）。このうち、作用する曲げモーメントとその断面の耐荷力（降伏モーメント）の相対比較により降伏判定がなされ、順番に降伏することになる。

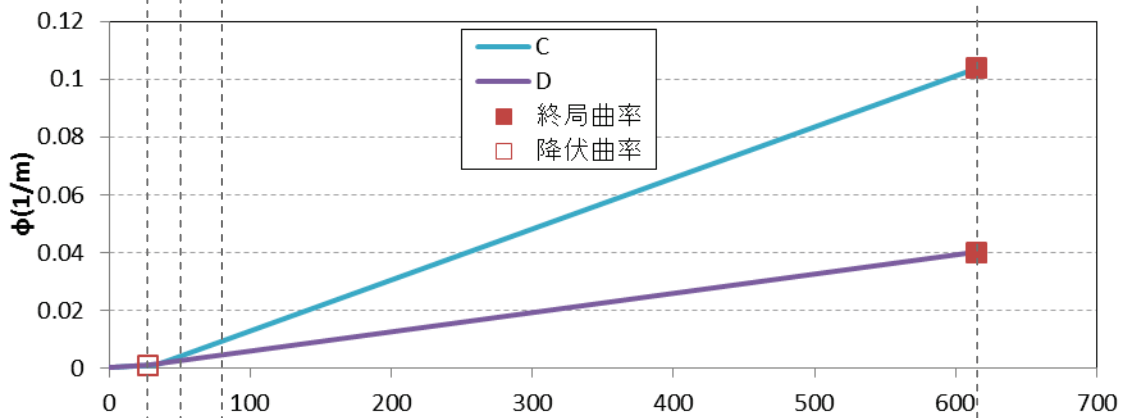
図 3.2(a)に水平力と水平変位の関係と塑性ヒンジ部の降伏発生順序を表す。また、同図(b), (c)には塑性ヒンジが発生するときの曲率と水平変位の関係を表している。

(3) 塑性ヒンジ部の終局発生順序

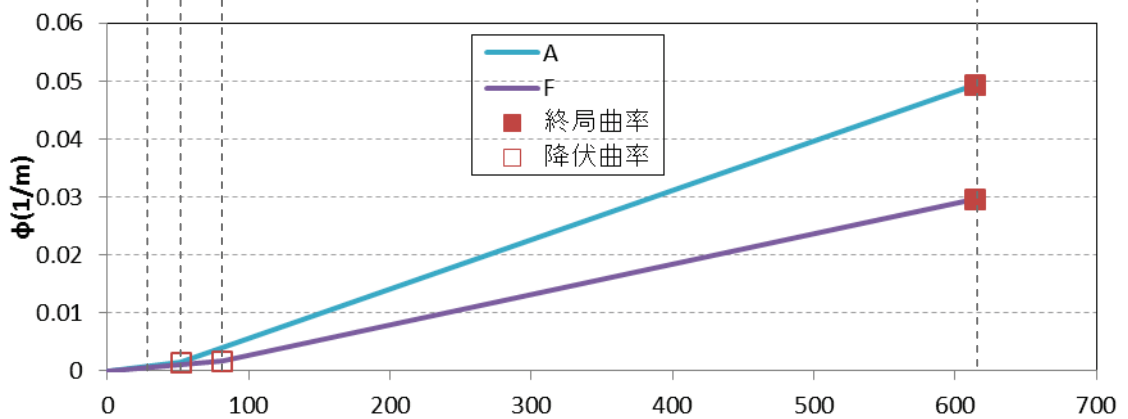
降伏後、さらに水平力を漸増させる（解析上は、水平変位を漸増させる（変位制御））と各塑性ヒンジ点は終局を迎えることになる。RC ラーメン橋脚は構造系全体で靱性を維持するため、1つの断面が終局に達しても、全体構造系の終局とはならないことに注意する必要がある。



(a) P- δ 関係



(b) $\phi - \delta$ 関係 (梁部材)



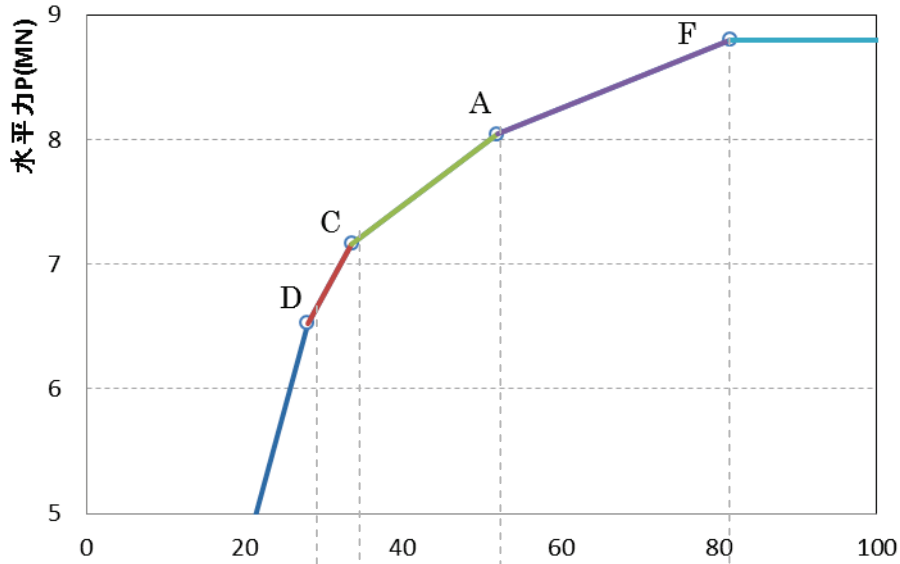
(c) $\phi - \delta$ 関係 (柱部材)

水平変位 δ (mm)

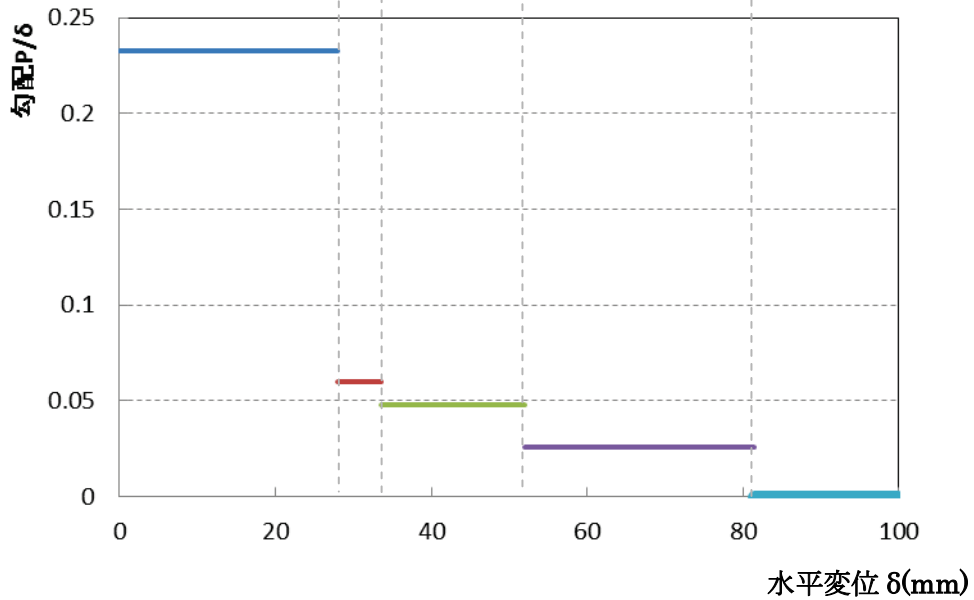
図 3.2 塑性ヒンジの形成過程：P- δ 関係と塑性ヒンジ位置での $\phi - \delta$ 関係

(4) P- δ の勾配図

図 3.2(a)の P- δ 図を拡大し、割線勾配を表したグラフを図 3.3 に示す。塑性ヒンジ点の断面が降伏していくにつれて、全体系の勾配が小さくなっていき、塑性ヒンジ点 F が降伏した後、勾配は 0 になる。



(a) P- δ 拡大図



(b) 勾配図

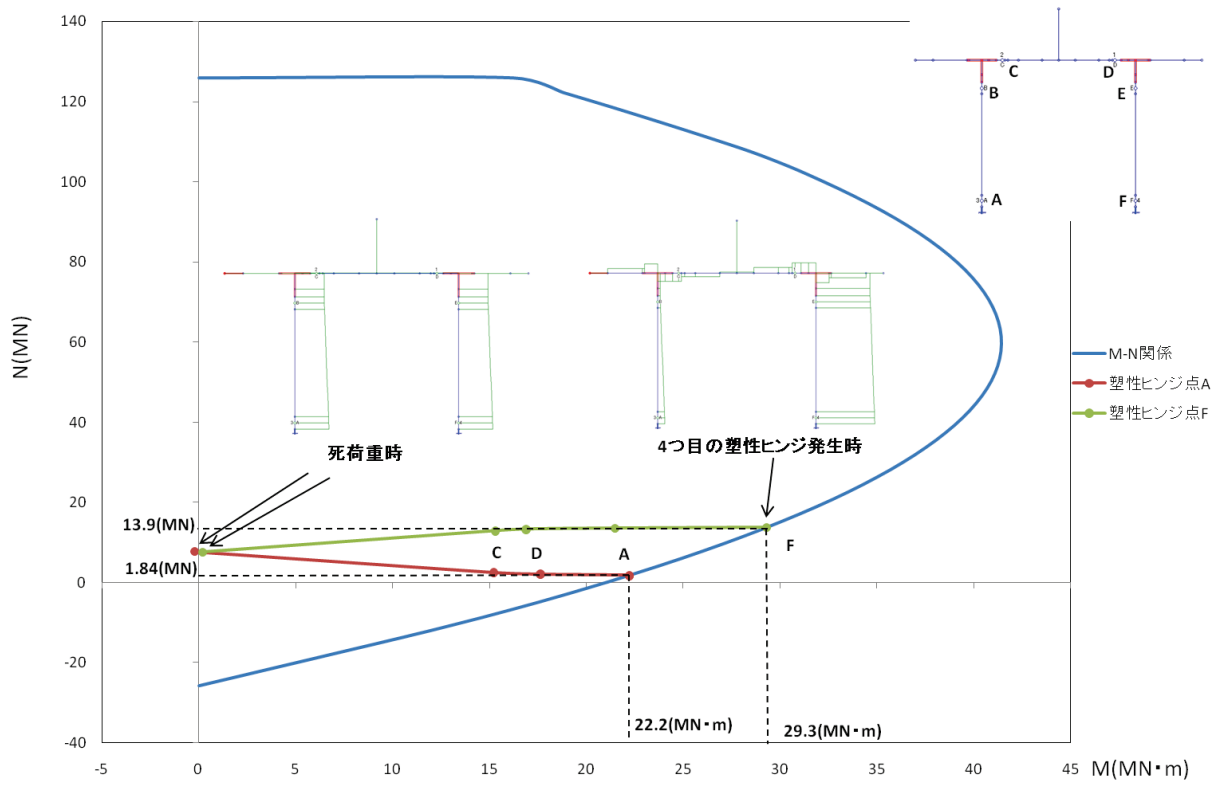
図 3.3 P- δ の勾配図

3.3 軸力と曲げモーメントの相関関係

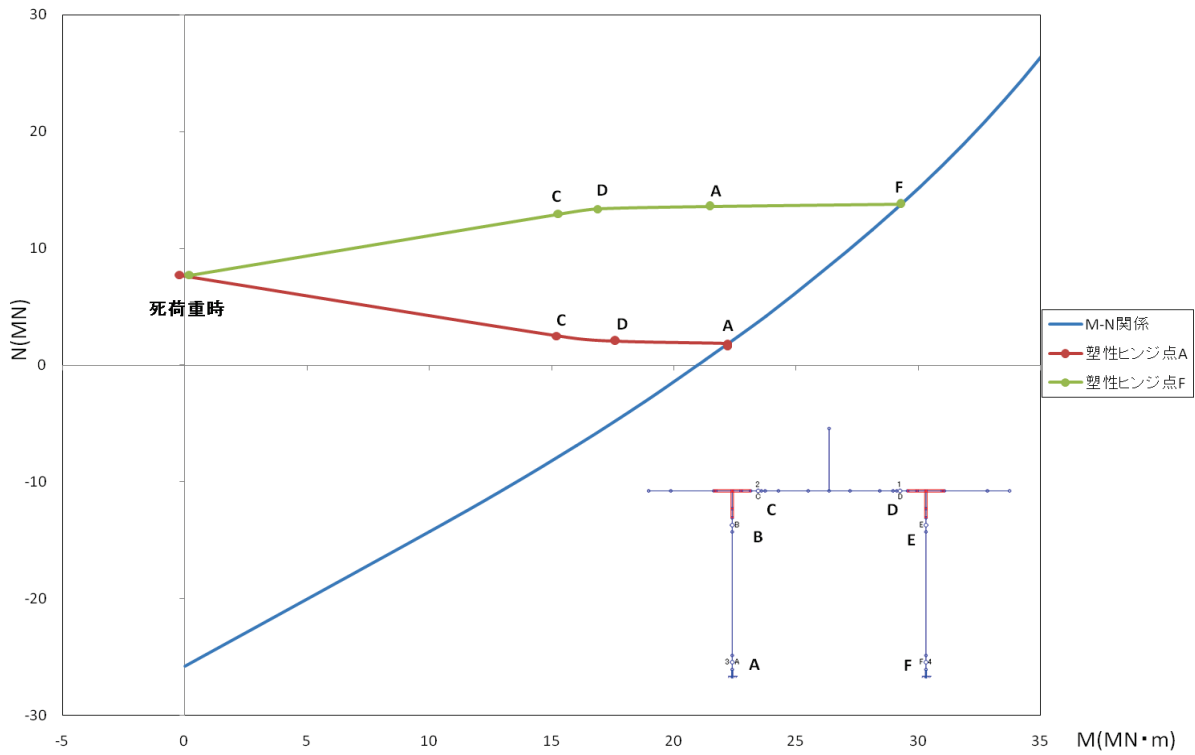
RC ラーメン橋脚などの不静定構造物に地震時保有水平耐力法を適用する場合、軸力と曲げモーメントの相関関係を考慮する必要がある。柱部材に上部荷重による軸力が常時作用し、また、地震時には地震荷重（水平荷重）によって、曲げモーメントとせん断力が付加される。

従って、RC ラーメン橋脚に対する地震時保有水平耐力法を用いる場合、軸力の変動による各柱部材の曲げモーメントと曲率の関係の影響を受けることを調べたい。ここでは、**図 3.4(a)**に塑性ヒンジ部 A 点と F 点における軸力と曲げモーメントの関係を示し、その拡大図を**同図(b)**に示す。

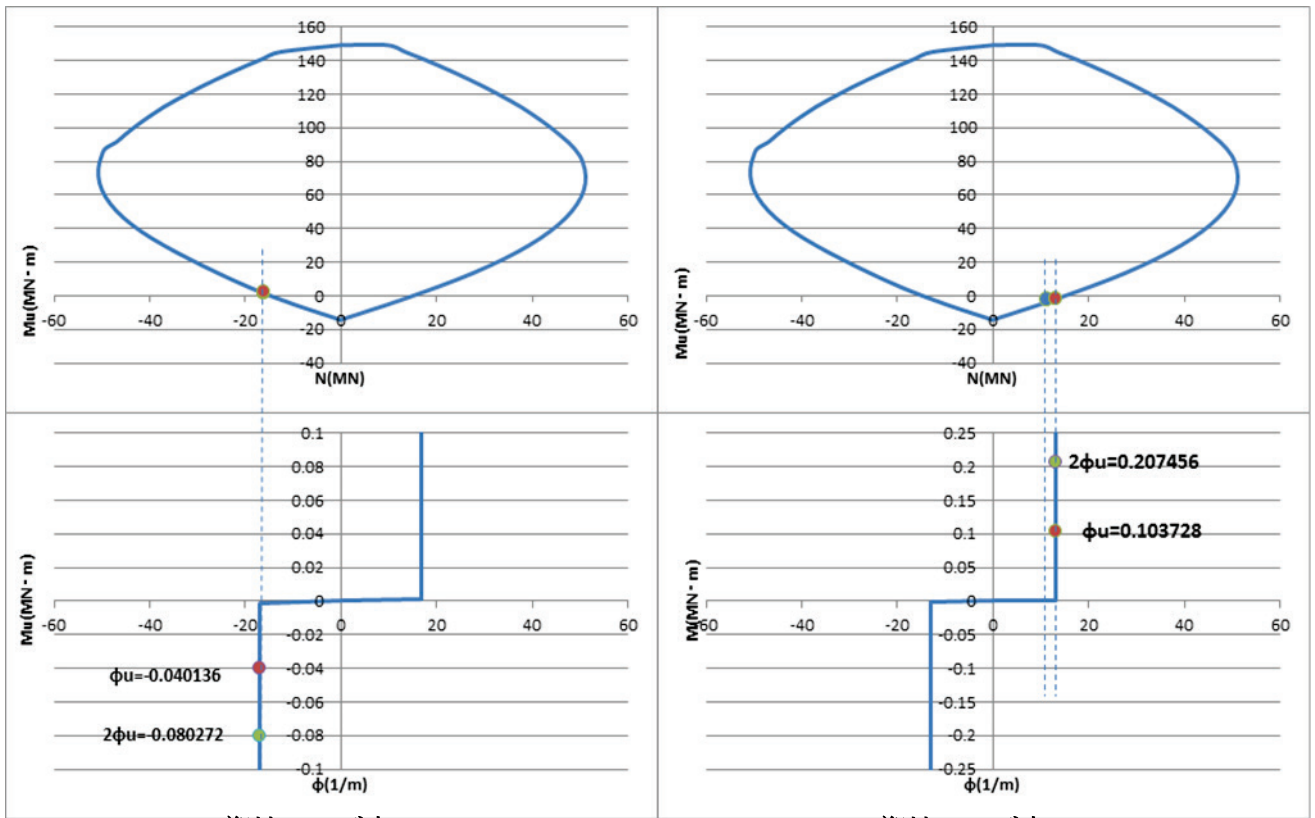
また、各塑性ヒンジ部の M-N 関係と M- ϕ 図を縦に並べたものを**図 3.5**に一覧化し、塑性ヒンジ点 F における拡大図を**図 3.6**に示す。



(a) 塑性ヒンジ点 A, F における M-N 関係

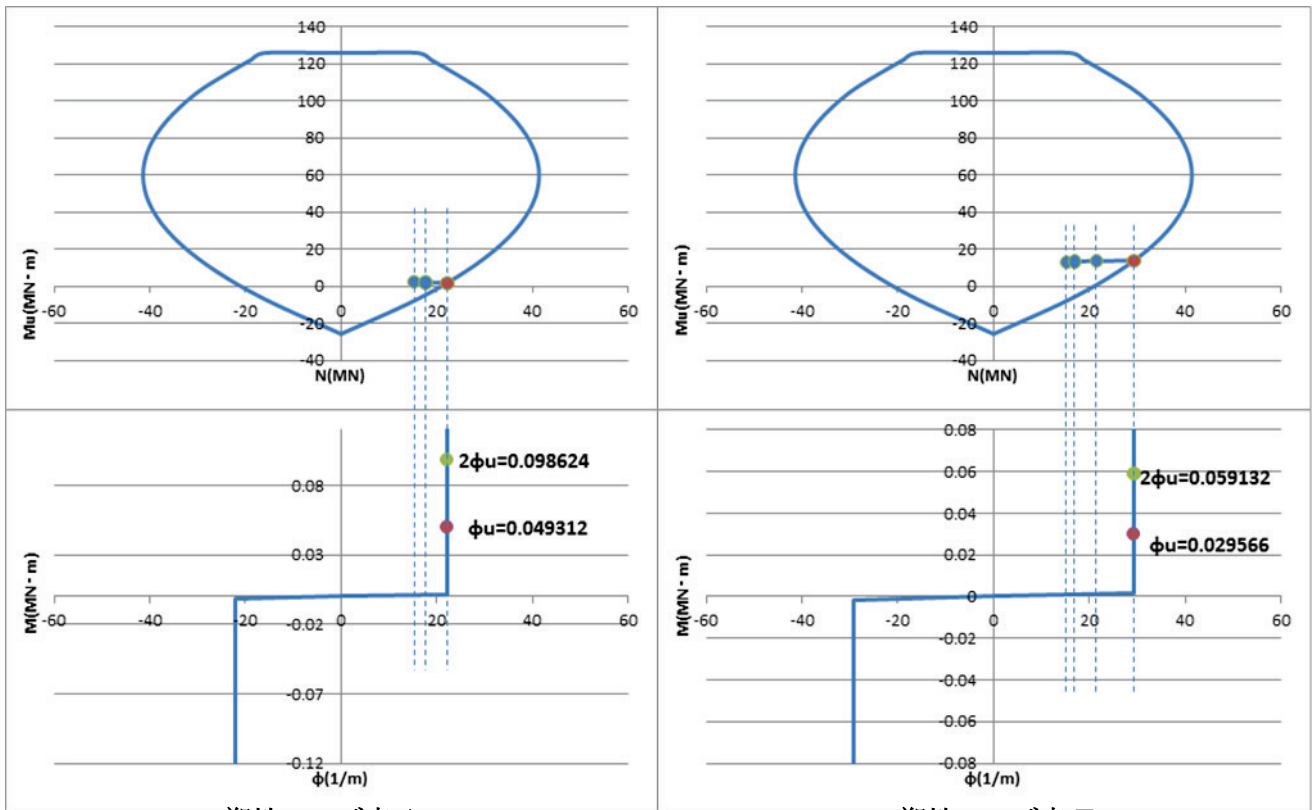


(b) 図(a)の拡大図
 図 3.4 M-N 関係



塑性ヒンジ点 D

塑性ヒンジ点 C



塑性ヒンジ点 A

塑性ヒンジ点 F

図 3.5 塑性ヒンジ 4 点における M-N 関係と M-phi 図

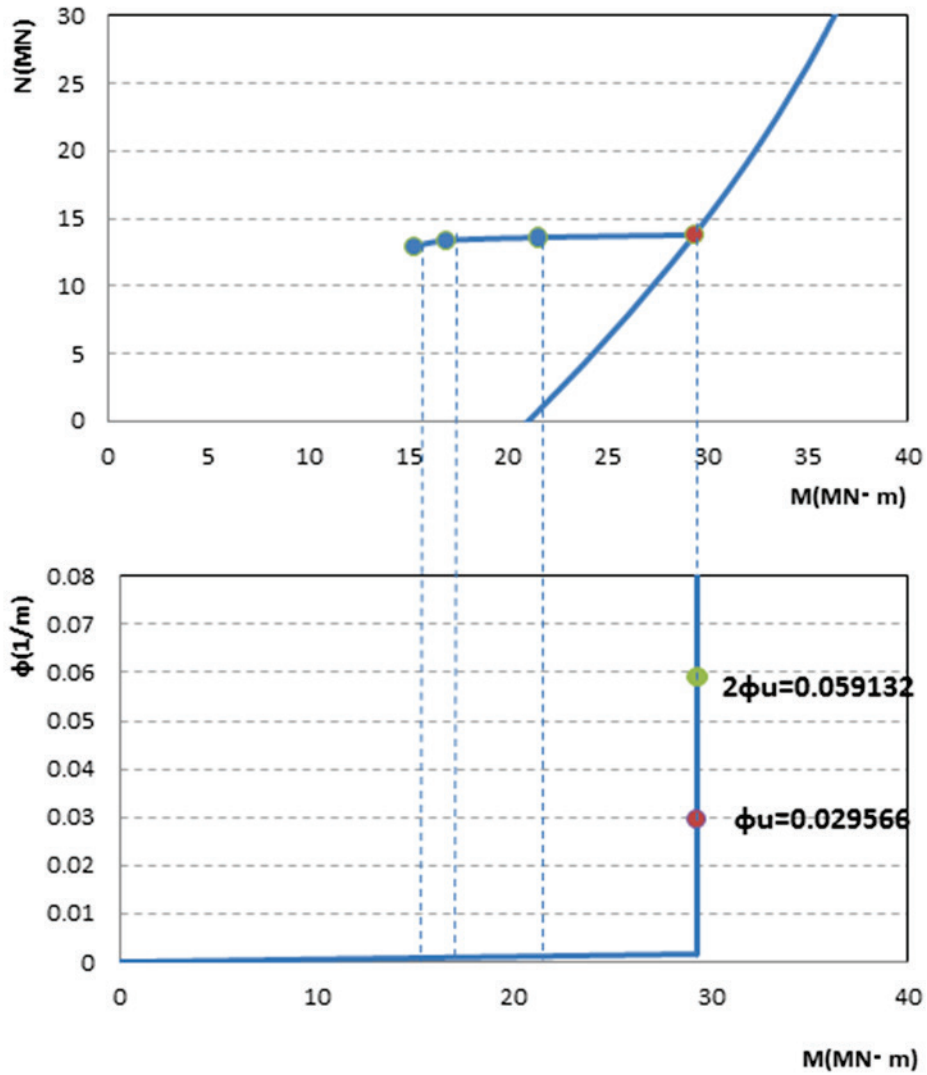


図 3.6 図 3.5 のうち塑性ヒンジ点 F における拡大図

4. 全体構造系の終局判定と靱性評価

道路橋示方書による RC ラーメン橋脚の構造系の終局は、複数箇所に形成される全ての塑性ヒンジが規定（軸方向圧縮鉄筋位置においてコンクリートひずみが終局ひずみに達する時）の終局限界に達した状態とし、このときの変位を終局変位とすることになっている。ただし、構造条件や配筋状態によっては、最後の塑性ヒンジが終局限界に達したときに最初に終局限界に達した塑性ヒンジでは終局曲率を大きく超えるような曲率が発生し、その塑性ヒンジの損傷が顕著となってラーメン橋脚全体としての水平耐力が低下し始めるような場合がある。

そこで、構造系の終局判定を以下の①、②を比較し、小さいほうの水平変位（早期に達した時の水平変位）を RC ラーメン橋脚の終局と定義する。

- ①全ての塑性ヒンジが全て終局塑性回転角 θ_{pu} に達する時
- ②いずれかの塑性ヒンジの終局曲率が 2 倍に達する時

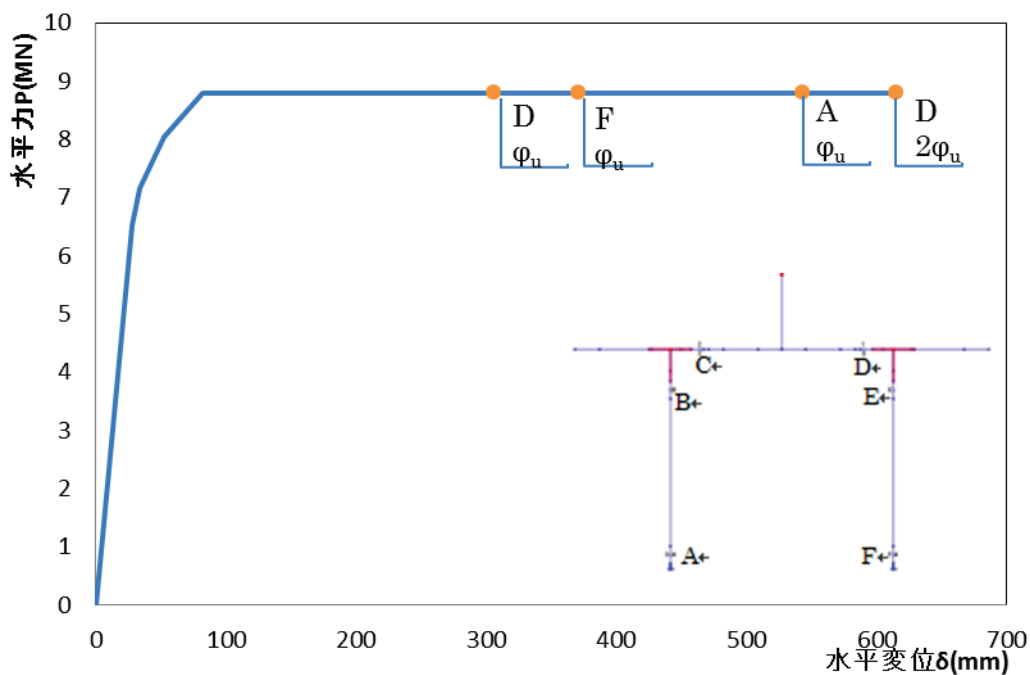


図 4.1 全体構造系の終局判定：判定②にて終局に達した事例

図 4.1 に本例の水平力 - 水平関係（P- δ 関係）として図 3.2(a)を再記し、終局判定を実施した。この事例では、3 箇所（D, F, A）にて終局に達し、その後 D 点にて終局曲率の 2 倍に達していることが分かり、上述の判定②が適用されることになる。

参考文献

- [1] 中村裕美：ラーメン橋脚の崩壊過程と靱性評価、度武蔵工業大学 都市工学科卒業論文
(平成 21 年)
- [2] 社団法人 日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する資料，社団法人 日本道路協会，平
成 9 年 4 月
- [3] 株式会社 FORUM8：RC 下部工の設計計算 Ver.3. 2005 年 9 月
- [4] 日本道路協会道路橋示方書・同解説 V耐震設計編，1996 年 pp161