

強震を受ける鋼構造ラーメン骨組の梁に生じる塑性変形 (その2:履歴挙動)

Plastic Deformation of Beams in Steel Moment Frames Subjected to Strong Earthquakes (Part 2: Hysteretic behavior)

小川 厚治*1
Koji OGAWA

中原 寛章*2
Hiroaki NAKAHARA

ABSTRACT The previous paper (Part 1) described the magnitude of plastic deformation introduced into beam-ends. In this paper (Part 2), based on the same numerical results, we deal with hysteretic behavior. Cumulative plastic rotation, the increment of plastic rotation during each half-cycle of vibration, and the hysteretic process of plastic rotation are discussed. A method is proposed to approximate damage to the beams in steel moment frames subjected to strong ground motions.

Key Words: 地震応答, 累積塑性回転角, 最大層間変位, 必要変形性能, 性能設計
earthquake response, cumulative plastic rotation, maximum story drift, ductility demand, performance-based design

1. 序

本研究の目的は、標準的な鋼構造ラーメン骨組の地震応答解析結果に基づいて、梁端に生じる塑性変形を、最大層間変位角の関数として評価する方法を確立することである。(その1)¹⁾では、梁端に生じる塑性回転角の大きさに関して検討したが、本論(その2)では、累積塑性回転角など履歴挙動全般に関して検討する。解析骨組や入力地震動など、考察の対象とした動的応答解析の内容はすべて(その1)と同じである。

2. 負曲げと正曲げの最大塑性回転角を生じる2つの梁端の履歴挙動

まず、この節では梁端の塑性回転角の履歴挙動の例を挙げて、1つの層において、正曲げと負曲げの最大塑性回転角を生じる2つの梁端の履歴挙動を比較する。

履歴挙動の例として示した図1は、la01を入力したBRI3Bの第2層の解析結果で、負曲げの最大塑性回転角 $\theta_{p-\max}$ を生じた左端の側柱側梁端と、正曲げの最大塑性回転角 $\theta_{p+\max}$ を生じた右端の側柱側梁端の2箇所について、一連の一方方向への塑性変形によって生じた塑性回転角の増分

$\Delta\theta_p$ を発生順に棒グラフで示し、それに伴う塑性回転角 θ_p の変動を折線グラフで示している。ただし、この図では、正曲げの塑性回転角を正、負曲げの塑性回転角を負として表示している。また、図中の鎖線は、(その1)において、鉛直荷重の影響で梁端に生じると考えた負曲げの塑性回転角 $-\theta_V$ である。 θ_V は、梁の材端条件を単純支持と考えたときの梁上の静的鉛直荷重による材端回転角である。なお、本論でも(その1)と同様に、負曲げの最大塑性回転角 $\theta_{p-\max}$ を生じた梁端の応答値は $p-$ の右下添字で表し、図表タイトルでは単に「負曲げ」と示している。また、正曲げの最大塑性回転角 $\theta_{p+\max}$ を生じた梁端の応答値は $p+$ の右下添字で表し、図表タイトルでは「正曲げ」と示している。

正曲げと負曲げの最大塑性回転角を生じる2つの梁端における塑性回転角の大きさについては、(その1)で、以下のような結果を得ている。

- (1) 負曲げの塑性回転角 $-\theta_V$ を基準とすると、負曲げの最大塑性回転角($\theta_{p-\max} - \theta_V$)と正曲げの最大塑性回転角($\theta_{p+\max} + \theta_V$)は概ね等しい。(図1では、① = ②)
 - (2) どちらの梁端も、塑性回転角の変動幅 $\bar{\theta}_p$ は概ね等しい。(図1では、③ = ④)
 - (3) どちらの梁端も、1回の变形で生じる塑性回転角増分の最大値 $\Delta\theta_{p,\max}$ は概ね等しい。(図1では、⑤ = ⑥)
- 以上の結果は、負曲げの塑性回転角 $-\theta_V$ を生じ

*1 工博 熊本大学工学部環境システム工学科教授
(〒860-8555 熊本市黒髪 2-39-1)

*2 熊本大学大学院自然科学研究科 研究生
(〒860-8555 熊本市黒髪 2-39-1)

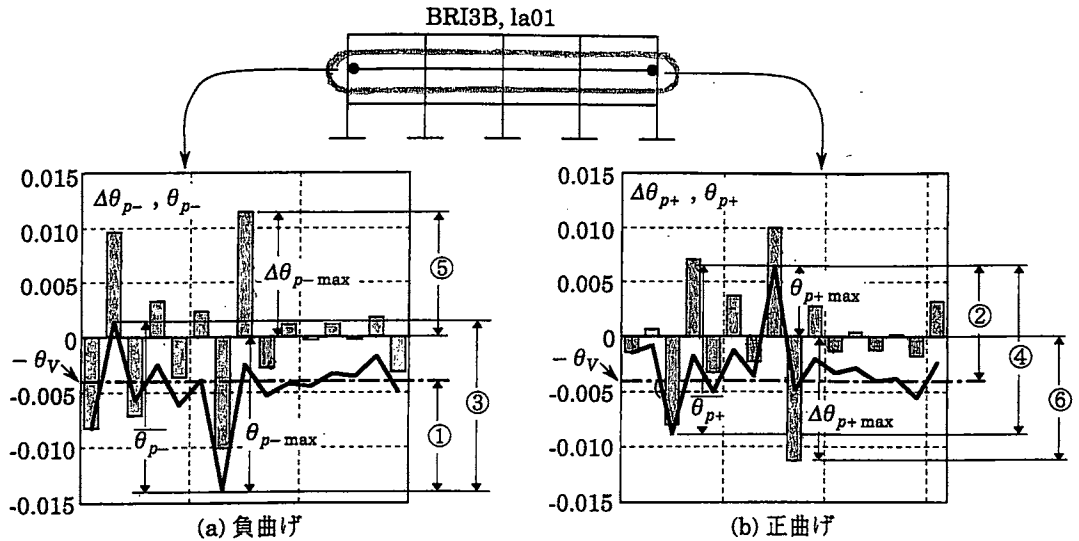


図1 塑性回転角の履歴例 (BRI3B, 2層, la01)

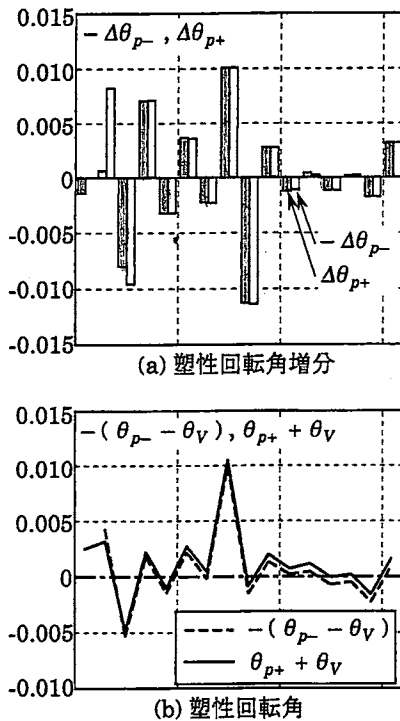


図2 履歴挙動の比較

た状態を基準にして、2つの梁端が正負逆方向にほぼ同じ塑性履歴を受けていることを示唆する。

図2(a)には、図1に示した2つの梁端の塑性回転角増分を比較し、図2(b)には、 $-\theta_v$ を基準とした塑性回転角の変化を比較している。ただし、塑性回転角の発生時期が一致するように、図2では、負曲げの最大塑性回転角が生じた梁端の各回の変形は、正曲げの最大塑性回転角が生じた梁端の変形に対して1回ずらして比較している。また、負曲げの最大塑性回転角が生じた梁端の塑性回転

角は、正負を逆転させている。

図2(a)から分かるように、両端に θ_v 以上の負曲げの塑性回転角が生じる初期3回程度の塑性回転角増分については、2つの梁端に差が認められるが、その後の塑性回転角増分は図2(a)ではほぼ一致している。一定程度以上の塑性回転角を生じる梁端に限定すれば、負曲げと正曲げの最大塑性回転角を生じる2つの梁端の塑性回転角の履歴は酷似しており、負曲げの塑性回転角 $-\theta_v$ を生じた状態を基準にして、正負逆方向にほぼ同じ塑性変形を受ける。

(その1)では、各層における負曲げの最大塑性回転角と正曲げの最大塑性回転角には明確な差があることを示したが、本論で検討する各回の塑性回転角増分やその累積過程については、2つの梁端の応答に顕著な差は生じないことが予想される。この考察結果は、ここでは1例の解析例について示したに過ぎないが、(その1)の結果からも推察されるものであり、本論の以下の結果においても裏付けられる。

3. 累積塑性回転角 $\Sigma \Delta \theta_p$

各層の梁端のうちで、負曲げによる最大塑性回転角 θ_{p-max} を生じる梁端の累積塑性回転角を $\Sigma \Delta \theta_{p-}$ 、正曲げによる最大塑性回転角 θ_{p+max} を生じる梁端の累積塑性回転角を $\Sigma \Delta \theta_{p+}$ と定義して、この2つの指標について検討する。

図3には、 $\Sigma \Delta \theta_{p-}$ と $\Sigma \Delta \theta_{p+}$ との関係を示す。図3によると、 $\Sigma \Delta \theta_{p-}$ と $\Sigma \Delta \theta_{p+}$ とは常に近い値となり、負曲げによる最大塑性回転角 θ_{p-max} を生じる梁端と、正曲げによる最大塑性回転角 θ_{p+max}

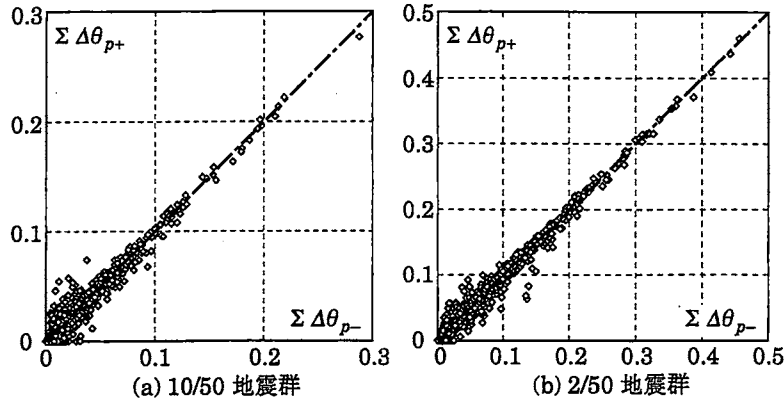


図3 $\Sigma \Delta \theta_{p-} - \Sigma \Delta \theta_{p+}$ 関係

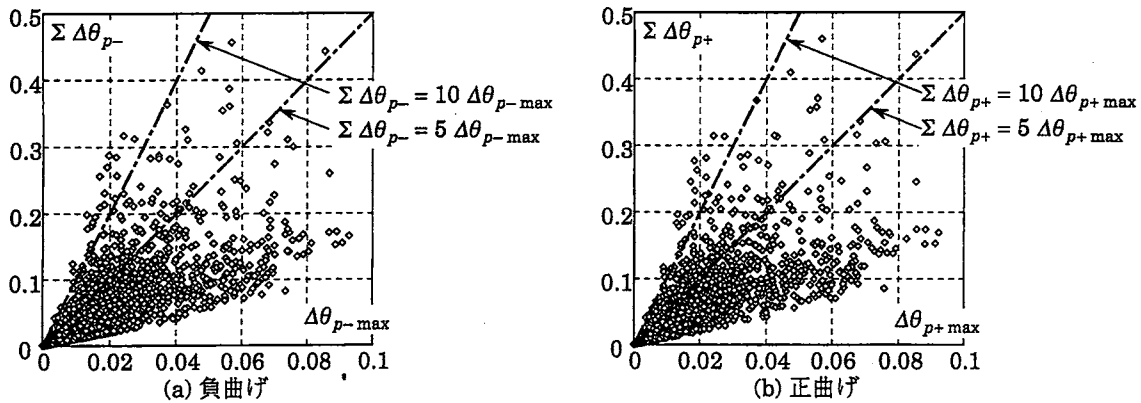


図4 $\Sigma \Delta \theta_p - \Delta \theta_{p \max}$ 関係

を生じる梁端の履歴挙動は類似しているという前節の考察結果を裏付ける。

次に、図4は、1回の変形で生じた塑性回転角増分の最大値 $\Delta \theta_{p \max}$ と累積塑性回転角 $\Sigma \Delta \theta_p$ の関係を示したもので、この図でも、負曲げによる最大塑性回転角 $\theta_{p-\max}$ を生じる梁端と、正曲げによる最大塑性回転角 $\theta_{p+\max}$ を生じる梁端とに分けて示している。

図4に示した累積塑性回転角 $\Sigma \Delta \theta_p$ と最大塑性回転角増分 $\Delta \theta_{p \max}$ の関係はかなりばらついている。多数の応答値が図中のどこに集中的に重ねて表示されているかも判読できないので、累積塑性回転角 $\Sigma \Delta \theta_p$ が最大塑性回転角増分 $\Delta \theta_{p \max}$ の10倍を超えることは稀であること程度しか、図4からは理解できない。

図5には、累積塑性回転角と最大塑性回転角増分の比 $\Sigma \Delta \theta_p / \Delta \theta_{p \max}$ と、最大塑性回転角増分 $\Delta \theta_{p \max}$ との関係を示す。また、図6には、最大塑性回転角増分 $\Delta \theta_{p \max}$ の大きさによって区分して、累積塑性回転角と最大塑性回転角増分の比 $\Sigma \Delta \theta_p / \Delta \theta_{p \max}$ の累積度数分布を示している。

図5によると、最大塑性回転角増分 $\Delta \theta_{p \max}$ が

大きくなると、累積塑性回転角と最大塑性回転角増分との比 $\Sigma \Delta \theta_p / \Delta \theta_{p \max}$ は小さくなるように見える。しかし、これは最大塑性回転角増分 $\Delta \theta_{p \max}$ の小さい方が圧倒的にデータ数が多いため、図6からわかるように、累積塑性回転角と最大塑性回転角増分の比 $\Sigma \Delta \theta_p / \Delta \theta_{p \max}$ の分布は、最大塑性回転角増分 $\Delta \theta_{p \max}$ の大きさにあまり影響されず、正曲げと負曲げの最大塑性回転角を生じる2つの梁端共あまり変わらない。

図4～6に示したように、最大塑性回転角増分 $\Delta \theta_{p \max}$ と累積塑性回転角 $\Sigma \Delta \theta_p$ の関係は非常にばらつきが大きい。これは、次のような原因が挙げられる。

- (1) 主要動の継続時間が長い地震や基本固有周期が短い骨組では、塑性化の回数が多くなり、累積塑性回転角と最大塑性回転角増分との比率は大きくなる。
- (2) 他の梁端より低い荷重レベルで塑性ヒンジが形成される梁端では、塑性化の回数が多くなり、累積塑性回転角と最大塑性回転角増分との比率は大きくなる。
- (3) 地震応答中に一部の層で崩壊機構を形成する

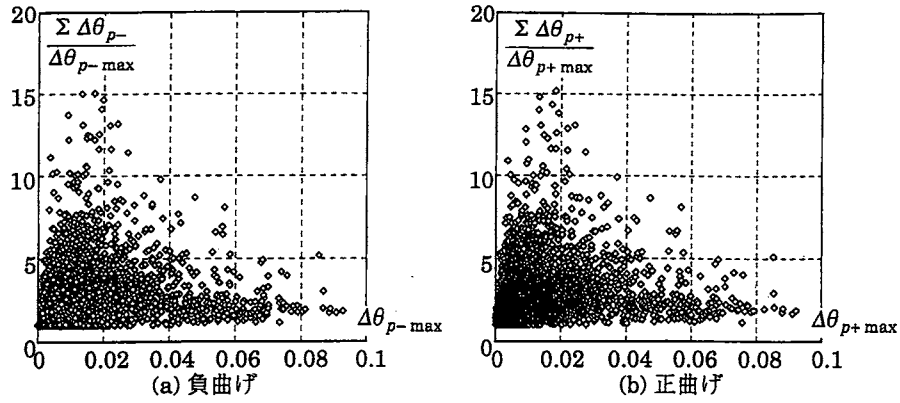


図5 $\Sigma \Delta \theta_p / \Delta \theta_{p \max} - \Delta \theta_{p \max}$ 関係

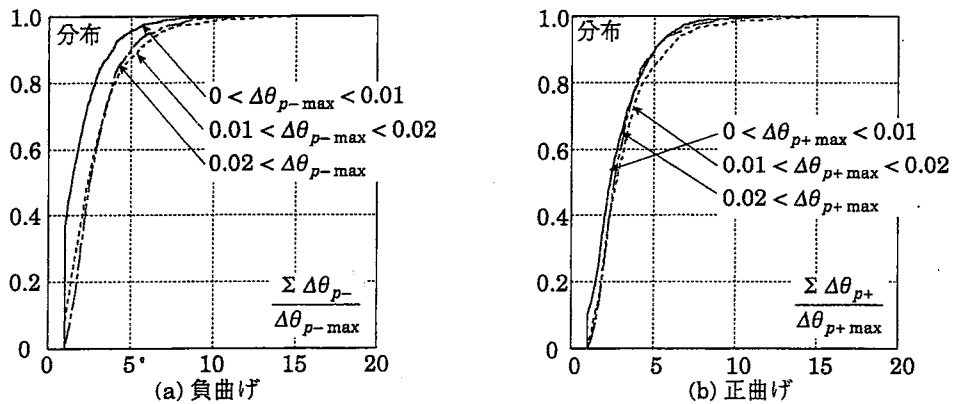


図6 $\Sigma \Delta \theta_p / \Delta \theta_{p \max}$ の累積度数分布

と、その機構に含まれる梁端塑性ヒンジの最大塑性回転角増分は極端に大きくなり得るが、機構形成の回数が少なければ、累積塑性回転角は最大塑性回転角増分に比例して大きくはならない。

本研究では、最大層間変位角 R_{\max} から梁端に生じる塑性変形を予測することを目指しているので、入力地震動や骨組の特性に由来する上記のような影響の考慮は不可能であると考えて、ここでは累積塑性回転角 $\Sigma \Delta \theta_p$ の上限値の近似を得ることだけを目的に検討を進める。

図6によると、負曲げの最大塑性回転角 $\theta_{p-\max}$ を生じる梁端において、最大塑性回転角増分 $\Delta \theta_{p-\max}$ が0.01以下と小さいときには、塑性変形は1回しか起こらず、累積塑性回転角と最大塑性回転角増分の比 $\Sigma \Delta \theta_{p-} / \Delta \theta_{p-\max}$ が1となる場合が4割程度になっている。この点を除くと、それ以外の解析結果ではすべて、累積塑性回転角と最大塑性回転角増分の比 $\Sigma \Delta \theta_p / \Delta \theta_{p \max}$ は1~5程度の範囲にはほぼ一様に分布しており、5を超えるのは1割程度である。この結果から、累積塑性回転

角の上限は、最大塑性回転角増分の5倍で近似するのが適当であると判断した^{3,4)}。

さて、(その1)によると、負曲げと正曲げの最大塑性回転角を生じるいずれの梁端についても、最大塑性回転角増分 $\Delta \theta_{p \max}$ は最大層間変位角 R_{\max} を用いて次式で近似できる。

$$\Delta \theta_{p \max} = \min \left\{ \frac{3}{2} (R_{\max} - R_y), R_{\max} \right\} \quad (1)$$

上式で、 R_y は、設計用地震荷重を比例載荷したときに梁端に最初に塑性ヒンジが形成される層間変位角である。

図6の結果に基づいて、累積塑性回転角 $\Sigma \Delta \theta_p$ の上限値の近似値 ${}_{pre}(\Sigma \Delta \theta_p)$ として、最大塑性回転角増分 $\Delta \theta_{p \max}$ の5倍を考えれば、(1)式から ${}_{pre}(\Sigma \Delta \theta_p)$ は次式となる。

$${}_{pre}(\Sigma \Delta \theta_p) = 5 \min \left\{ \frac{3}{2} (R_{\max} - R_y), R_{\max} \right\} \quad (2)$$

一方、筆者らは文献2)において、地震入力エネルギーから累積塑性回転角 $\Sigma \Delta \theta_p$ と最大層間変位角 R_{\max} の上限値を予測する方法を提案しており、

これらの式から累積塑性回転角 $\Sigma \Delta \theta_p$ と最大層間変位角 R_{max} との関係式を導くと、上限の近似値 $pre(\Sigma \Delta \theta_p)^2$ は次のようになる。

$$pre(\Sigma \Delta \theta_p)^2 = \frac{1.5}{2(1-k_2)} \left[\frac{1}{r_{cycle}} \times \left(2 + k_2 \frac{R_{max} - R_y}{R_y} \right) (R_{max} - R_y) - R_y \right] \quad (3)$$

上式において、 k_2 は層の荷重-変形関係を Bilinear 型と見なしたときの第 2 分枝剛性比である。荷重-変形関係の第 2 分枝の領域では、すべての梁の一端だけに塑性ヒンジが形成されていると考えると、梁全体としての第 2 分枝剛性比は 1/4 となる。梁の第 2 分枝剛性比を 1/4、層の弾性層間変位に占める梁の寄与率を γ_B とすると、層の第 2 分枝剛性比 k_2 は次式となる²⁾。

$$k_2 = \frac{1}{1 + 3\gamma_B} \quad (4)$$

設計用地震荷重を比例載荷したときの弾性解析結果から、各層の梁端回転角の平均値と上下層の層間変位角の平均値との比を求め、これを梁の弾性変形寄与率 γ_B の概算値として図 7 に示す。層の変形は、梁と柱と接合部パネルの変形之和で表されるが、梁の弾性変形寄与率は 0.5 を上回るものが多く、概括的には 0.6 程度と見なせる。図 7 中には、 $\gamma_B = 0.6$ を鎖線で示している。 $\gamma_B = 0.6$ を (4) 式に代入すると、 k_2 は次の値となる。

$$k_2 = \frac{5}{14} \quad (5)$$

(3) 式の r_{cycle} は、変形が 1 方向に進む半サイク

ルの間の地震入力エネルギーの最大値と全入力エネルギーとの比であり、次の値を用いる⁵⁾。

$$r_{cycle} = \frac{1}{4} \quad (6)$$

(5)、(6) 式の値を (3) 式に代入すると、次式を得る。

$$\frac{pre(\Sigma \Delta \theta_p)^2}{R_y} = \left(\frac{28}{3} + \frac{5}{3} \frac{R_{max} - R_y}{R_y} \right) \frac{R_{max} - R_y}{R_y} - \frac{7}{6} \quad (7)$$

図 8 には、応答値の R_{max}/R_y と $\Sigma \Delta \theta_p/R_y$ の関係を示し、図中に鎖線で示した (2) 式による近似値 $pre(\Sigma \Delta \theta_p)$ 、実線で示した (7) 式による近似値 $pre(\Sigma \Delta \theta_p)^2$ と比較する。また、図 9 には、応答値と (2) 式の近似値との比 $\Sigma \Delta \theta_p / pre(\Sigma \Delta \theta_p)$ の累積度数分布を示し、図 10 には、応答値と (7) 式の近似値との比 $\Sigma \Delta \theta_p / pre(\Sigma \Delta \theta_p)^2$ の累積度数分布を示す。

図 8 によると、 R_{max}/R_y が 2 程度以下の範囲では、2 つの近似値 $pre(\Sigma \Delta \theta_p)$ と $pre(\Sigma \Delta \theta_p)^2$ は近い値となり、いずれも応答値 $\Sigma \Delta \theta_p$ の上限を近似するような傾向が認められる。しかし、(7) 式による近似値 $pre(\Sigma \Delta \theta_p)^2$ は、 R_{max}/R_y が 2 を超えると、急激に (2) 式による近似値 $pre(\Sigma \Delta \theta_p)$ より大きくなり、 R_{max}/R_y が 4 を超える範囲では、 $pre(\Sigma \Delta \theta_p)^2$ 近傍の応答値 $\Sigma \Delta \theta_p$ はほとんど存在しない。

図 10 によると、 R_{max}/R_y が 4 以上の範囲では、 $pre(\Sigma \Delta \theta_p)^2$ の 1/2 以上の応答値 $\Sigma \Delta \theta_p$ は 5% 程

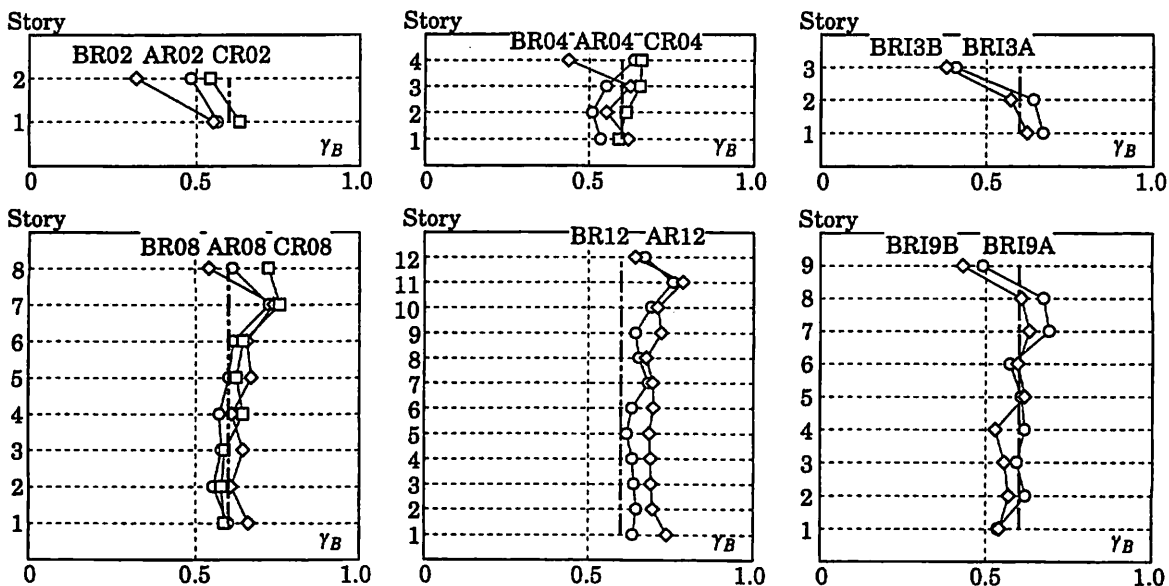


図 7 梁の弾性変形寄与率 γ_B

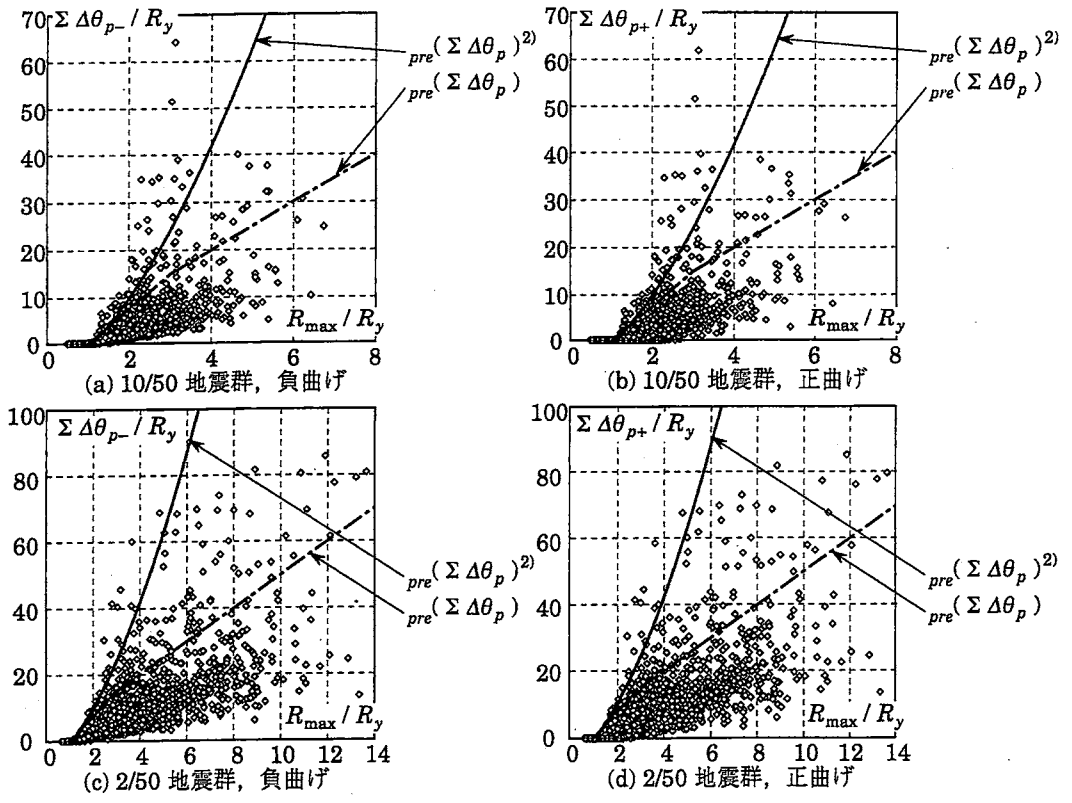


図8 $R_{max}/R_y - \Sigma \Delta\theta_p / R_y$ 関係

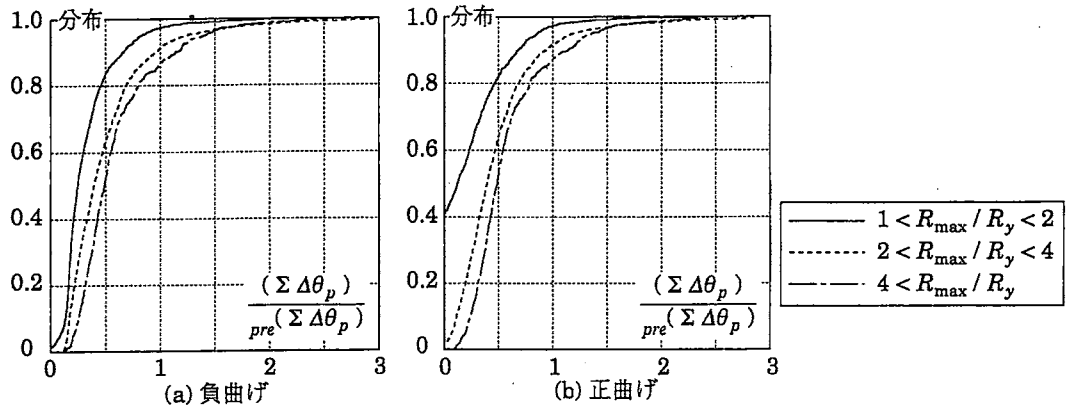


図9 $(\Sigma \Delta\theta_p) / pre(\Sigma \Delta\theta_p)$ の累積度数分布

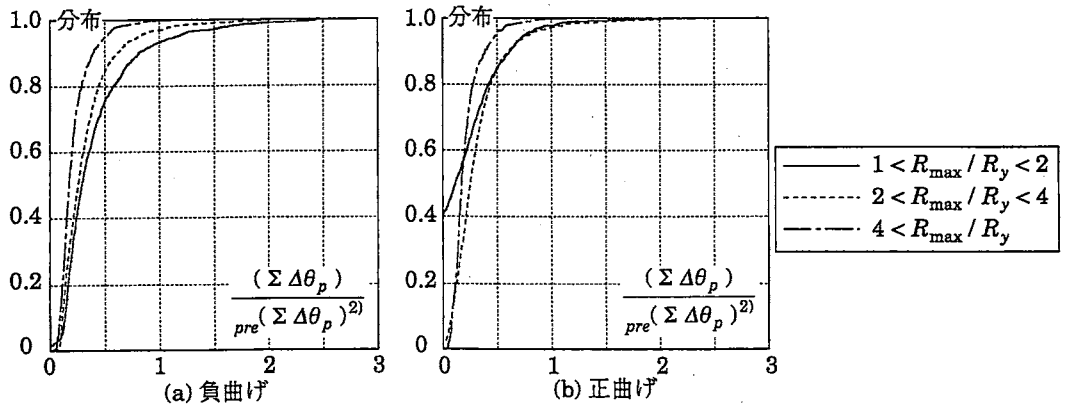


図10 $(\Sigma \Delta\theta_p) / pre(\Sigma \Delta\theta_p)^2$ の累積度数分布

度しかない。(7)式は煩雑であり、(7)式の $(\Sigma \Delta \theta_p)^2$ は応答値 $\Sigma \Delta \theta_p$ の上限値の近似としても適切とは考えがたい。

(7)式の元とした(3)式は、文献2)の結果から導いたものであるが、累積塑性回転角 $\Sigma \Delta \theta_p$ が大ききときには過大評価する性質を持っている。更に、文献2)は、地震入力エネルギーに基づいて、最大層間変位角 R_{max} と累積塑性回転角 $\Sigma \Delta \theta_p$ の上限を近似することを目的としているので、これらの式を連立させた(3)式では上限値の近似という意味も薄れている。

さて、(2)式の近似値 $pre(\Sigma \Delta \theta_p)$ について示した図9によると、(2)式の近似値 $pre(\Sigma \Delta \theta_p)$ を応答値 $\Sigma \Delta \theta_p$ が超えるのは、 R_{max}/R_y が2以下の範囲では2%程度であるが、 R_{max}/R_y が2~4の範囲では7%程度、 R_{max}/R_y が4以上では13%程度となる。(2)式の近似値は、最大層間変位角が大きくなるほど、近似値 $pre(\Sigma \Delta \theta_p)$ を超える応答値 $\Sigma \Delta \theta_p$ が増える傾向が認められる。しかし、入力地震動の不確定性を考慮すれば、この程度の割合で応答値を過小に評価することは許容できると考えた。

最大層間変位角 R_{max} から梁の変形を予測することを目的とする本論では、累積塑性回転角 $\Sigma \Delta \theta_p$ の上限値は、(7)式によるより、(2)式に示したように、最大塑性回転角増分の5倍という形で近似する方が適当であると判断した。

4. 塑性変形の回数と各回の塑性回転角増分

この節でも、各層の梁端のうちで、負曲げの最大塑性回転角と正曲げの最大塑性回転角を生じた梁端について検討する。

まず、図11に塑性変形の回数 n_p の累積度数分布を示す。この図で、回数が零は、負曲げまたは正曲げの塑性回転角を生じた梁端が全くない層を

示す。正曲げの最大塑性回転角が生じた梁端の方が負曲げの最大塑性回転角が生じた梁端に比べて、回数が零になる応答値が多いことを除けば、負曲げの最大塑性回転角を生じた梁端について示した図11(a)と、正曲げの最大塑性回転角を生じた梁端について示した図11(b)に顕著な差は認められない。

図11に示した塑性変形の回数の単純平均値を求めると、10/50地震群については4.7回程度、2/50地震群については6.7回程度で、2/50地震群の方が2回程度多い。(その1)で述べたように、2/50地震群の擬似速度応答スペクトルは10/50地震群の2倍程度で、地震入力エネルギーは4倍程度と推察されるが、回数の平均値には2回程度の差しかない。一定程度以上の強さを持つ地震動では、地震動の強さが塑性変形の回数に及ぼす影響は、あまり大きくない。

図11によると、正曲げと負曲げの最大塑性回転角を生じる2つの梁端、2つの地震群について示した4種の結果では、いずれも塑性変形の回数が10回未満が8割以上を占め、20回以上のものは3%以下である。

図12は、1回の変形で生じた塑性回転角増分を大きい順に並べて棒グラフで表した例である。この図で取り挙げた解析結果は、10/50地震群の20波の地震について1例ずつ、最大塑性回転角 θ_{p-max} や、累積塑性回転角と最大塑性回転角増分との比 $\Sigma \Delta \theta_p / \Delta \theta_{p-max}$ が比較的大きい梁端を選んだもので、15の解析骨組すべてを網羅するように選んでいる。

図12によると、最大塑性回転角増分 $\Delta \theta_{p-max}$ に比べて、2番目以降の塑性回転角増分がかなり小さい場合もあるが、概ね等差級数的に並んでいるものが多い⁶⁾。図12中の鎖線は、最大塑性回転角増分 $\Delta \theta_{p-max}$ と累積塑性回転角 $\Sigma \Delta \theta_p$ が応答値

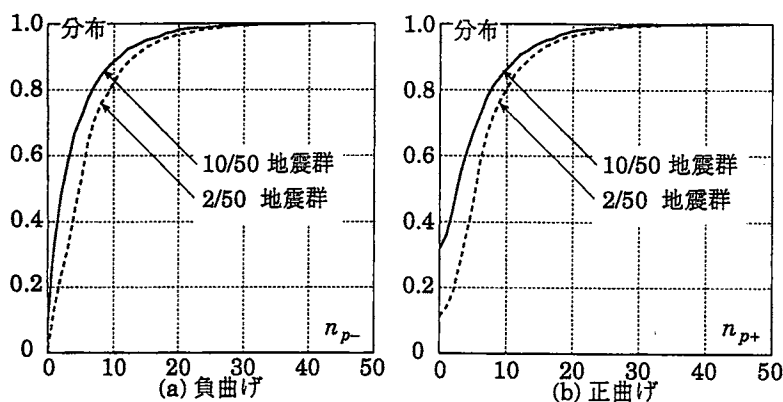


図11 塑性変形の回数の累積度数分布

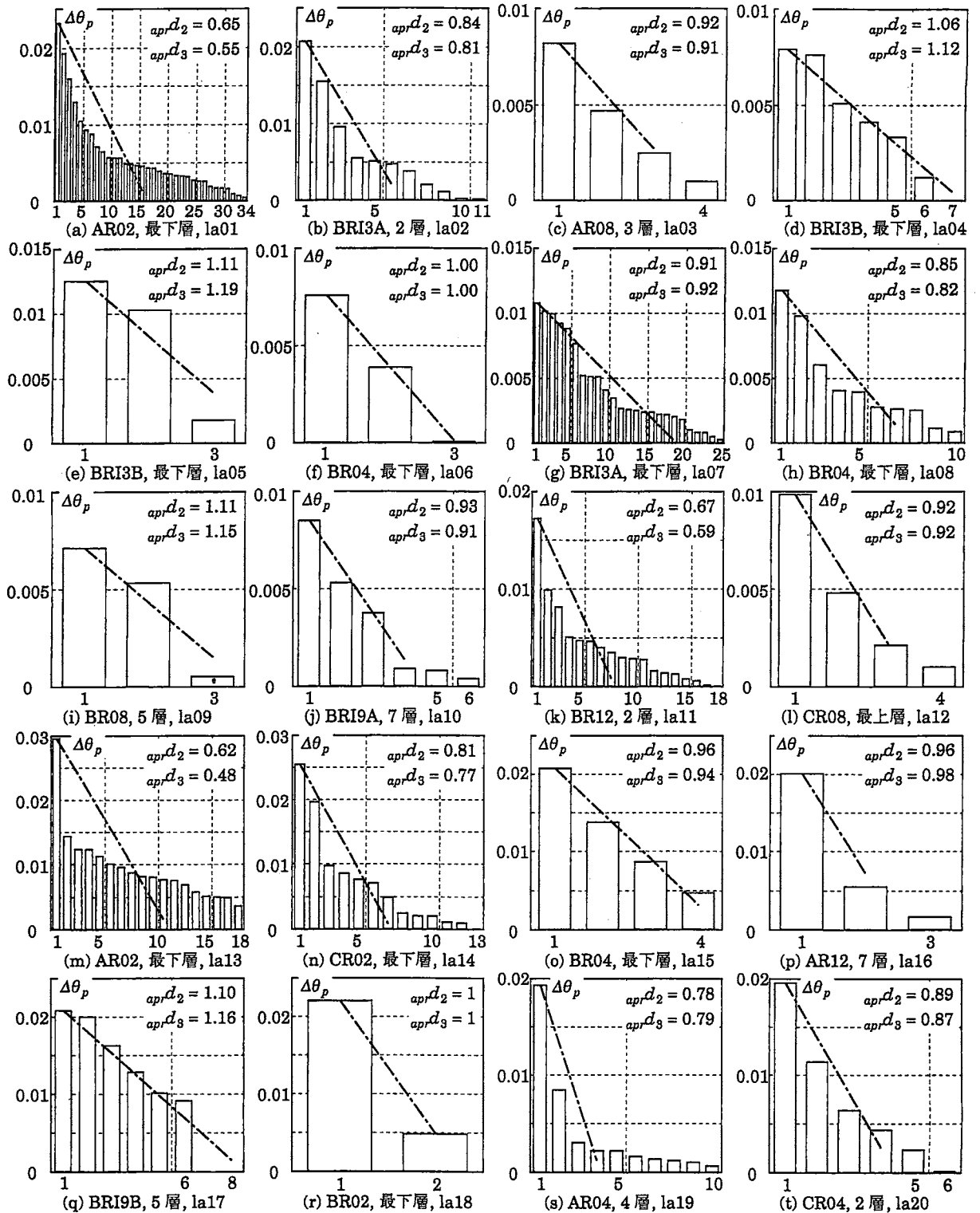


図 12 各回の塑性回転角増分

と一致するように算定した等差級数である。

図 12 によると、等差級数で近似した鎖線は応答値と近い値を取っているものが多いが、図 12 (a), (k), (m) などのように、塑性回転角増分の最大値 $\Delta\theta_{p-max}$ に比べて、2 番目以降の塑性回転角増分が

かなり小さい場合もある。既往の実験結果によれば、1 回毎の塑性回転角増分は小さいほど、梁端が変形性能の限界に達するまでの累積塑性回転角 $\Sigma\Delta\theta_p$ は大きくなる^{3,7)}。したがって、累積塑性回転角 $\Sigma\Delta\theta_p$ が同じであれば、各回の塑性回転角増

分が小さいほど損傷は小さくなるはずであり、各回の塑性回転角増分を等差級数で近似することは、図 12 (a), (k), (m) などの例では損傷を過大に評価することになると考える。

上記のような損傷に関する評価を、定量的に行うことを試みる。

一定振幅の繰返し载荷において、一回の変形で生じる塑性回転角増分 $\Delta\theta_p$ と、破断など変形性能の限界に達するまでの繰返し回数 N_f には次のような関係が提案されている^{8,9,10}。

$$N_f = C (\Delta\theta_p)^{-\alpha} = \frac{C}{(\Delta\theta_p)^\alpha} \quad (8)$$

上式で、 C と α は定数であり、 α は 1 より大きい。

Miner 則に倣って^{11,12}、(8) 式から i 番目の塑性回転角増分 $\Delta\theta_{pi}$ による損傷度 D_i を次式と考える。

$$D_i = \frac{(\Delta\theta_{pi})^\alpha}{C} \quad (9)$$

応答全体の梁端の損傷度 D は、次式で評価する。

$$D = \sum D_i = \frac{1}{C} \sum (\Delta\theta_{pi})^\alpha \quad (10)$$

上記の考察から、梁端の損傷度を評価する指標としては、各回の塑性回転角増分の単純和である累積塑性回転角より α 乗和の方が適当と判断した。

既往の研究^{8,9,10}から α は 2~3 程度と考え、ここでは α を 2 または 3 としたときの 2 つの場合について検討する。

等差級数で近似したときの各回の塑性回転角増分 $\Delta_{apr}\theta_{pi}$ についても、(10) 式と同様に損傷度 $_{apr}D$ を求め、応答から求めた損傷度 D と等差級数近似から求めた損傷度 $_{apr}D$ との比を次のように定義する。

$$_{apr}d_2 = \frac{D}{_{apr}D} = \frac{\sum (\Delta\theta_{pi})^2}{\sum (\Delta_{apr}\theta_{pi})^2} \quad (11.a)$$

$$_{apr}d_3 = \frac{D}{_{apr}D} = \frac{\sum (\Delta\theta_{pi})^3}{\sum (\Delta_{apr}\theta_{pi})^3} \quad (11.b)$$

上式で求めた $_{apr}d_2, _{apr}d_3$ の値は、図 12 中に示している。

図 12 中に示した $_{apr}d_2, _{apr}d_3$ の値は 1 以下のものが多く、各回の塑性回転角を大きい順に並べると等差級数になると考えることは、全体的には損傷度を過大に評価する傾向がある。特に、等差級数で近似したときの塑性変形回数が 10 以上のときには、 $_{apr}d_2, _{apr}d_3$ はすべて 1 以下であり、 $_{apr}d_2, _{apr}d_3$ が 1 を超えるのは、等差級数で近似した塑性変形回数が 10 より小さいときに限られている。

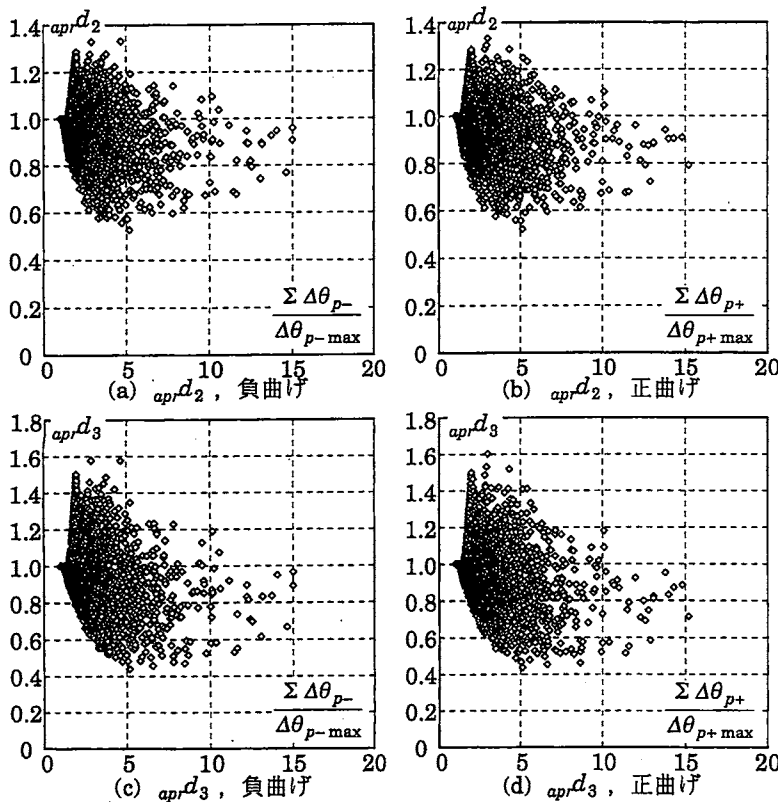
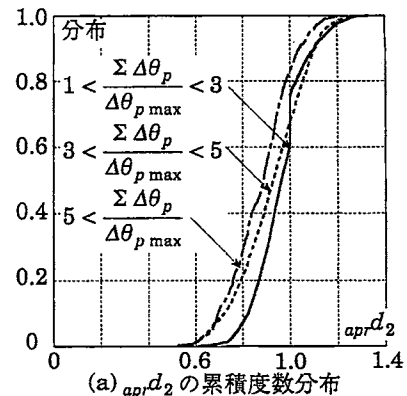
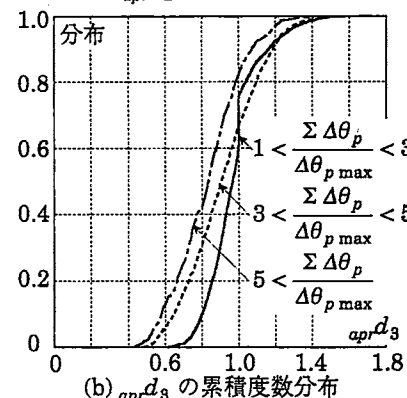


図 13 $\sum \Delta\theta_p / \Delta\theta_{p \max} - _{apr}d_2, _{apr}d_3$ 関係



(a) $_{apr}d_2$ の累積度数分布



(b) $_{apr}d_3$ の累積度数分布

図 14 $_{apr}d_2, _{apr}d_3$ の分布

図12で認められた上記の傾向を全解析結果について確認するために、図13には、累積塑性回転角と最大塑性回転角増分との比 $\Sigma \Delta\theta_p / \Delta\theta_{p\max}$ と、 $apr.d_2$ および $apr.d_3$ との関係を示す。なお、等差級数で近似したときの塑性変形の回数は、 $\Sigma \Delta\theta_p / \Delta\theta_{p\max}$ を2倍して小数点以下を切り捨てた値であり、等差級数で近似したときの塑性変形の回数が10以上であることは、 $\Sigma \Delta\theta_p / \Delta\theta_{p\max}$ が5を超えることを意味する。

図13によると、 $apr.d_2$ はおよそ0.6~1.3程度の範囲に分布し、 $apr.d_3$ は0.5~1.5程度の範囲に分布しているが、累積塑性回転角と最大塑性回転角増分との比 $\Sigma \Delta\theta_p / \Delta\theta_{p\max}$ が5を超えると、 $apr.d_2, apr.d_3$ 共に1以下となる応答値が多くなる傾向が認められる。

さらに定量的に検討するために、図14には、累積塑性回転角と最大塑性回転角増分との比 $\Sigma \Delta\theta_p / \Delta\theta_{p\max}$ によって分け、 $apr.d_2$ および $apr.d_3$ の累積度数分布を示す。

図14によると、累積塑性回転角と最大塑性回転角増分との比 $\Sigma \Delta\theta_p / \Delta\theta_{p\max}$ が3以下のときには、 $apr.d_2, apr.d_3$ 共に0.8~1.2の範囲に応答値の9割程度があり、各回の塑性回転角を大きい順に並べると等差級数になると考えることは、損傷度

の評価においても妥当な近似となる場合が多いことがわかる。一方、 $\Sigma \Delta\theta_p / \Delta\theta_{p\max}$ が大きくなると、 $apr.d_2$ および $apr.d_3$ の値は小さくなる傾向があり、 $\Sigma \Delta\theta_p / \Delta\theta_{p\max}$ が5を超えると、 $apr.d_2, apr.d_3$ が1以上になるのは15%程度に過ぎない。

以上述べたように、各回の塑性回転角増分を大きい順に並べると等差級数になると考えることは、累積塑性回転角と最大塑性回転角増分との比 $\Sigma \Delta\theta_p / \Delta\theta_{p\max}$ が3程度以下では、損傷度についても近似値を与えることが期待されるが、 $\Sigma \Delta\theta_p / \Delta\theta_{p\max}$ が5程度以上では、損傷度を過大に評価する傾向がある。

$apr.d_2$ および $apr.d_3$ が $\Sigma \Delta\theta_p / \Delta\theta_{p\max}$ の値によって変化する理由は、図12によると、以下のように推察される。

- (1) 塑性変形の回数が10より少ないときには、図12(d), (f), (o) などのように、各回の塑性変形増分が等差級数的に並んでいると見なせるものが多い。
- (2) 図12(a), (k), (m) などのように、塑性変形の回数や、累積塑性回転角と最大塑性回転角増分との比 $\Sigma \Delta\theta_p / \Delta\theta_{p\max}$ が大きいときには、最大塑性回転角増分 $\Delta\theta_{p\max}$ に比べて、2番目以降の塑性回転角増分がかなり小さくなる傾向

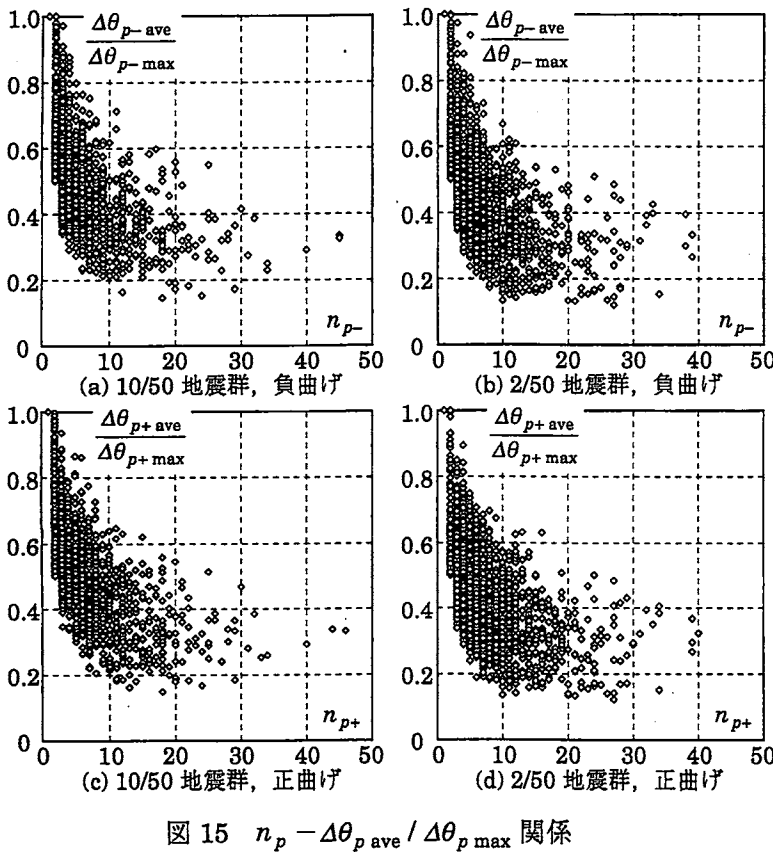


図15 $n_p - \Delta\theta_{p\text{ave}} / \Delta\theta_{p\text{max}}$ 関係

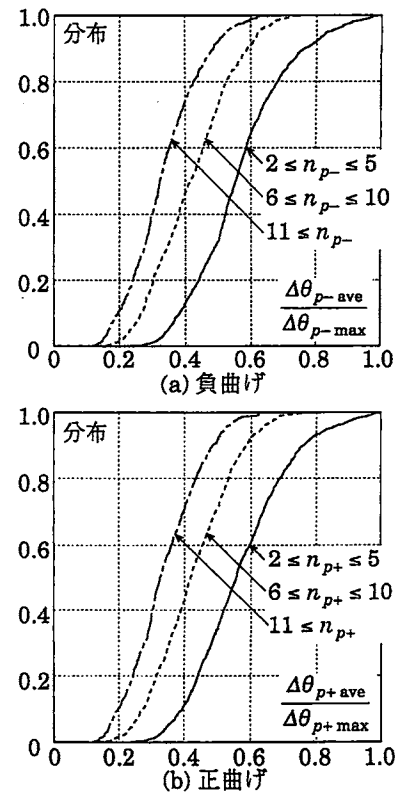


図16 $\Delta\theta_{p\text{ave}} / \Delta\theta_{p\text{max}}$ の累積度数分布

がある。

図 12 において認められる上記の傾向を、全解析結果を用いて検証しておく。

まず、図 15 には、平均塑性回転角増分と最大塑性回転角増分の比 $\Delta\theta_{p\text{ ave}}/\Delta\theta_{p\text{ max}}$ と、塑性変形の回数 n_p との関係を示す。ただし、平均塑性回転角増分 $\Delta\theta_{p\text{ ave}}$ は、累積塑性回転角 $\Sigma\Delta\theta_p$ を塑性変形の回数 n_p で除した値である。等差級数による近似が成立し、各回の塑性回転角増分の最小値が最大値に比べて十分に小さく零近傍であれば、この比 $\Delta\theta_{p\text{ ave}}/\Delta\theta_{p\text{ max}}$ は 0.5 程度になるはずである。

図 15 によると、負曲げと正曲げの最大塑性回転角を生じる梁端による違いや、地震波群による違いは明確ではなく、いずれの結果においても $\Delta\theta_{p\text{ ave}}$ と $\Delta\theta_{p\text{ max}}$ の比は、回数 n_p の増加に伴って減少する傾向が認められる。

図 16 は、塑性変形の回数 n_p によって分け、 $\Delta\theta_{p\text{ ave}}$ と $\Delta\theta_{p\text{ max}}$ との比の累積度数分布を示す。この図によると、塑性変形の回数 n_p の増加によって $\Delta\theta_{p\text{ ave}}$ と $\Delta\theta_{p\text{ max}}$ の比が減少する傾向が明確であり、塑性変形の回数 n_p が 10 を超える範囲では、 $\Delta\theta_{p\text{ ave}}/\Delta\theta_{p\text{ max}}$ は 9 割以上が 0.5 以下になり、中央値は 0.3 程度である。

さらに図 17 には、平均塑性回転角増分と最大塑性回転角増分の比 $\Delta\theta_{p\text{ ave}}/\Delta\theta_{p\text{ max}}$ と、累積塑性回転角と最大塑性回転角増分の比 $\Sigma\Delta\theta_p/\Delta\theta_{p\text{ max}}$ との関係を示し、図 18 には、 $\Sigma\Delta\theta_p/\Delta\theta_{p\text{ max}}$ によって分け、 $\Delta\theta_{p\text{ ave}}$ と $\Delta\theta_{p\text{ max}}$ の比の累積度数分布を示す。

図 17 によると、累積塑性回転角と最大塑性回転角増分の比 $\Sigma\Delta\theta_p/\Delta\theta_{p\text{ max}}$ が増えると、 $\Delta\theta_{p\text{ ave}}$ と $\Delta\theta_{p\text{ max}}$ の比は減少する傾向が認められる。また、図 18 によると、累積塑性回転角と最大塑性回転角増分の比 $\Sigma\Delta\theta_p/\Delta\theta_{p\text{ max}}$ が 5 を超えるときには、 $\Delta\theta_{p\text{ ave}}$ と $\Delta\theta_{p\text{ max}}$ の比は 8 割程度が 0.5 以下になる。

以上、図 15～18 に示したように、塑性変形の回数 n_p が増え、累積塑性回転角と最大塑性回転角増分の比 $\Sigma\Delta\theta_p/\Delta\theta_{p\text{ max}}$ が増大すると、塑性回転角増分の平均値と最大値の比 $\Delta\theta_{p\text{ ave}}/\Delta\theta_{p\text{ max}}$ は小さくなる傾向がある。

本研究では、最大層間変位角 R_{max} から梁端に生じる塑性変形を予測することを目的としているが、各回の塑性回転角増分について、ここまで得た結果をまとめると以下ようになる。

(i) 最大塑性回転角増分 $\Delta\theta_{p\text{ max}}$ は (1) 式で近似できる。

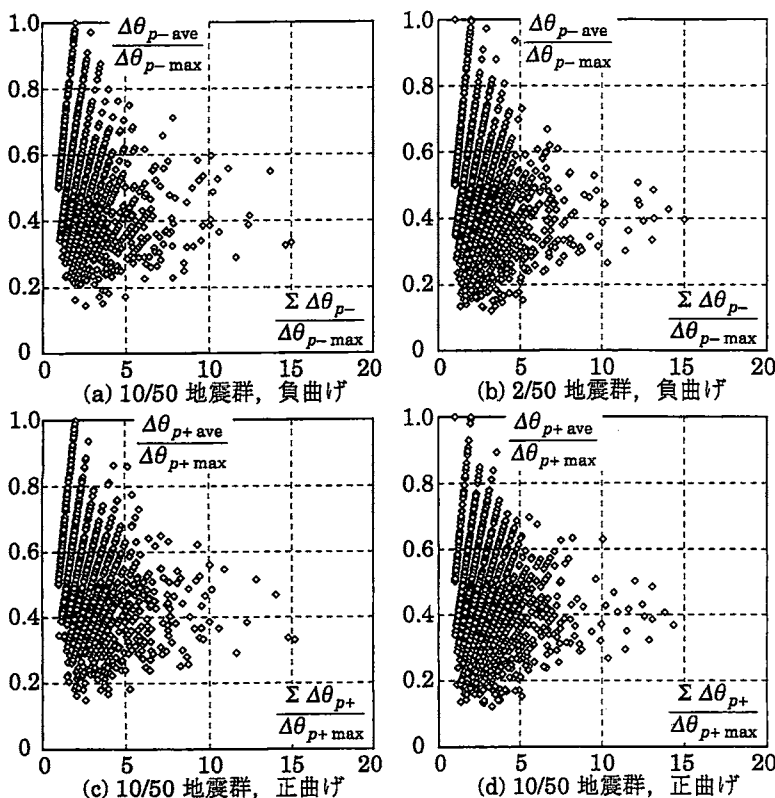


図 17 $\Delta\theta_{p\text{ ave}}/\Delta\theta_{p\text{ max}} - \Sigma\Delta\theta_p/\Delta\theta_{p\text{ max}}$ 関係

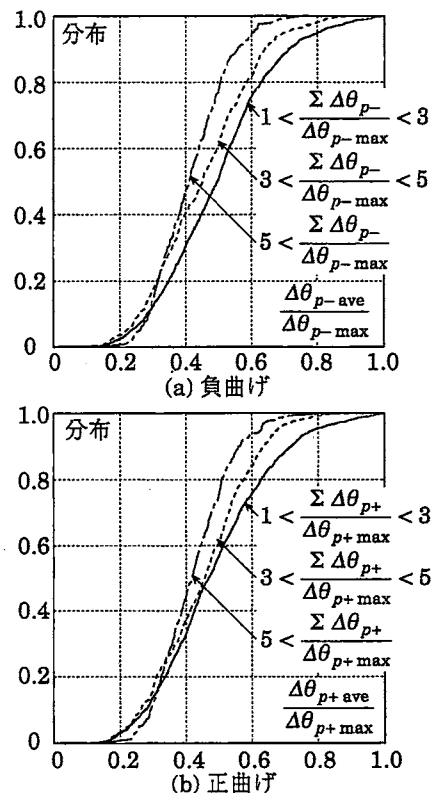


図 18 $\Delta\theta_{p\text{ ave}}/\Delta\theta_{p\text{ max}}$ の累積度数分布

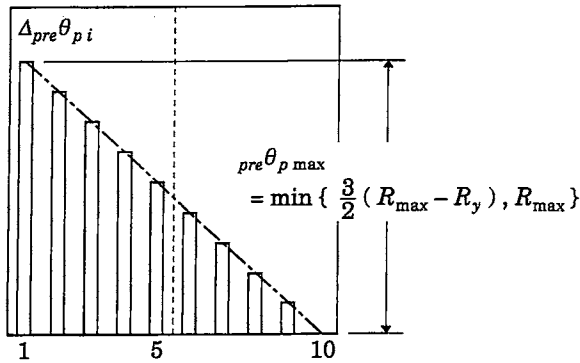


図 19 各回の塑性回転角増分の近似値 $\Delta_{pre}\theta_{p i}$

- (ii) 塑性回転角増分の単純和である累積塑性回転角 $\Sigma\Delta\theta_p$ は, (2) 式で上限の近似が得られる.
- (iii) 各回の塑性回転角増分を大きい順に並べると等差級数で近似できる.

上記の結果から, 各回の塑性回転角増分の近似値 $\Delta_{pre}\theta_{p i}$ は図 19 に示すようになる.

(10) 式と同様に, 図 19 に示した $\Delta_{pre}\theta_{p i}$ による損傷度 $preD$ を求め, 実応答値による損傷度 D と近似値 $\Delta_{pre}\theta_{p i}$ による損傷度 $preD$ との比を次のように定義する.

$$pre d_2 = \frac{D}{pre D} = \frac{\sum_i (\Delta\theta_{p i})^2}{\sum (\Delta_{pre}\theta_{p i})^2} \quad (12.a)$$

$$pre d_3 = \frac{D}{pre D} = \frac{\sum (\Delta\theta_{p i})^3}{\sum (\Delta_{pre}\theta_{p i})^3} \quad (12.b)$$

図 20 には, $pre d_2, pre d_3$ と最大層間変位角 R_{max} の関係を示す. 図 20 によると, $pre d_2, pre d_3$ の値は大多数が 1 以下であるが, $pre d_2, pre d_3$ が 1 を超える応答値は, 最大層間変位角 R_{max} が弾性限界層間変位角 R_y の 2~4 倍程度の範囲に集中する傾向が認められる.

図 21 には, R_{max}/R_y の大きさによって分けつけて, $pre d_2, pre d_3$ の累積度数分布を示す. 図 21 によると, 負曲げと正曲げの最大塑性回転角を生じる梁端のいずれにおいても, また, $pre d_2, pre d_3$ のいずれの値に関しても類似した結果が得られている. すなわち, $pre d_2, pre d_3$ が 1 を超える割合は, R_{max}/R_y が 4 以上のときには 2% 程度であるが, R_{max}/R_y が 2~4 の範囲では 5% 程度で, R_{max}/R_y が 2 以下のときにはほとんど零である. $pre d_2, pre d_3$ が 1 を超える応答値に関しては, 図 19 に示した各回の塑性回転角増分に関する近似が損傷度を過小に評価することにはなるが, その割合はかなり少ない.

前節では, 累積塑性回転角 $\Sigma\Delta\theta_p$ の上限を最大塑性回転角増分 $\Delta\theta_{p max}$ の 5 倍によって近似することを提案したが, R_{max}/R_y が大きいほど, この

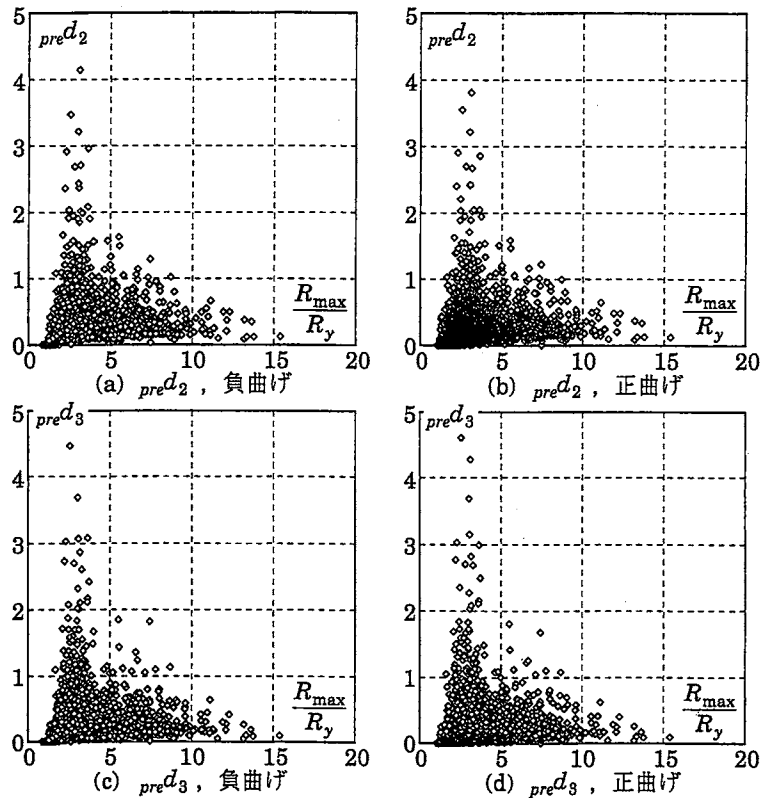


図 20 $pre d_2, pre d_3 - R_{max}/R_y$ 関係

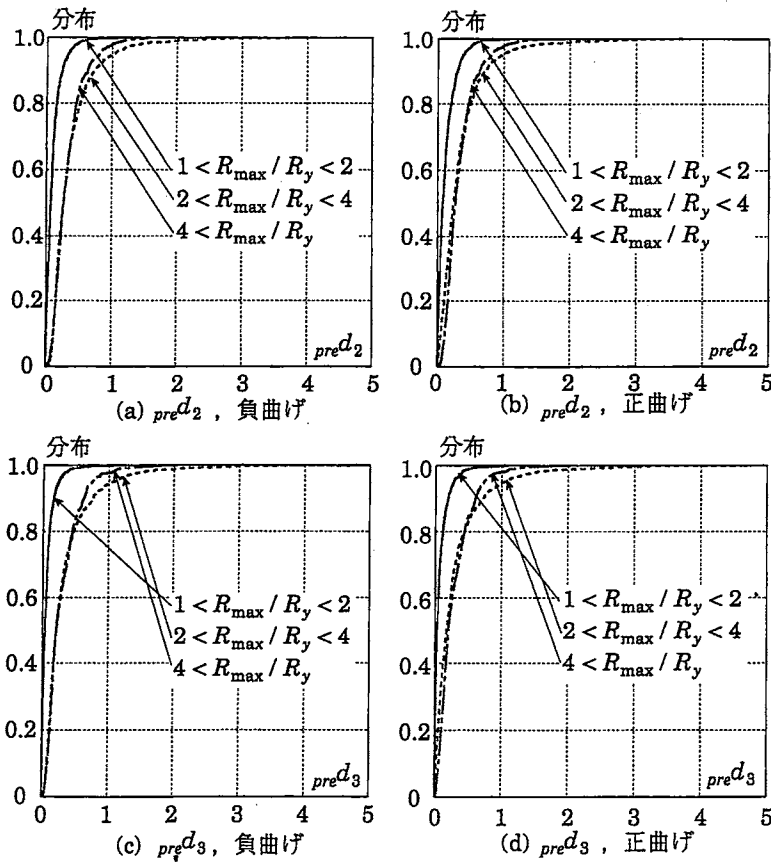


図 21 $pre d_2, pre d_3$ の累積度数分布

上限を超える応答値は増大する傾向を示していた。しかし、累積塑性回転角と最大塑性回転角増分の比 $\Sigma \Delta \theta_p / \Delta \theta_{p \max}$ が大きいときには、各回の塑性回転角増分の平均値は最大塑性回転角増分 $\Delta \theta_{p \max}$ の半分より小さくなる傾向があり、各回の塑性回転角増分を大きい順に並べると等差級数になると考えると、損傷度の過大評価になることが多い。したがって、累積塑性回転角 $\Sigma \Delta \theta_p$ の上限を最大塑性回転角増分 $\Delta \theta_{p \max}$ の 5 倍と仮定しても、各回の塑性回転角増分を大きい順に並べると等差級数になると考えることによって、損傷度を過小に評価する可能性は減少する。

本論では、以上の結果に基づいて、各回の塑性回転角増分を図 19 に示すように近似することを提案する。

なお、本論で採用した損傷度の評価式である (10) 式については、裏付ける資料もなく、 α の値も特定していない。しかし、 α を 2 としても 3 としても、ここでの考察内容にはほとんど影響がない。したがって、各回の塑性回転角増分を不明としたまま累積塑性回転角によって必要塑性変形性能を表現するよりも、各回の塑性回転角増分を図

19 のように近似した方が、必要塑性変形性能を論じる上で合理的であることは示唆できたと考えている。

5. 最大応答値の発生時期

前節では、各回の塑性回転角増分の大きさについて検討したが、その発生順序については言及していない。また、図 1 に示したような塑性回転角の履歴例を眺めても、各塑性回転角増分の発生過程について定性的な傾向を読み取ることすら、はなはだ困難である。一方、実験的に検討されている梁端の保有変形性能に関しても、漸増振幅と漸減振幅のいずれの繰返し載荷が梁端の損傷度を大きくするかというような定性的傾向すら不明なのが現状であろう。このような状況で、最大応答値が塑性履歴中のどのような時期に発生するかを検討することの意味は曖昧ではあるが、ここでは本解析結果から得られた結果を整理しておく。

まず、図 22 には、最大塑性回転角 $\theta_{p \max}$ に至る半サイクルの間に生じる塑性回転角増分 $\Delta \theta_{p \text{ pre}}$ と一回の変形で生じる塑性回転角増分の最大値 $\Delta \theta_{p \max}$ との関係を示す。図 22 においてもわかる

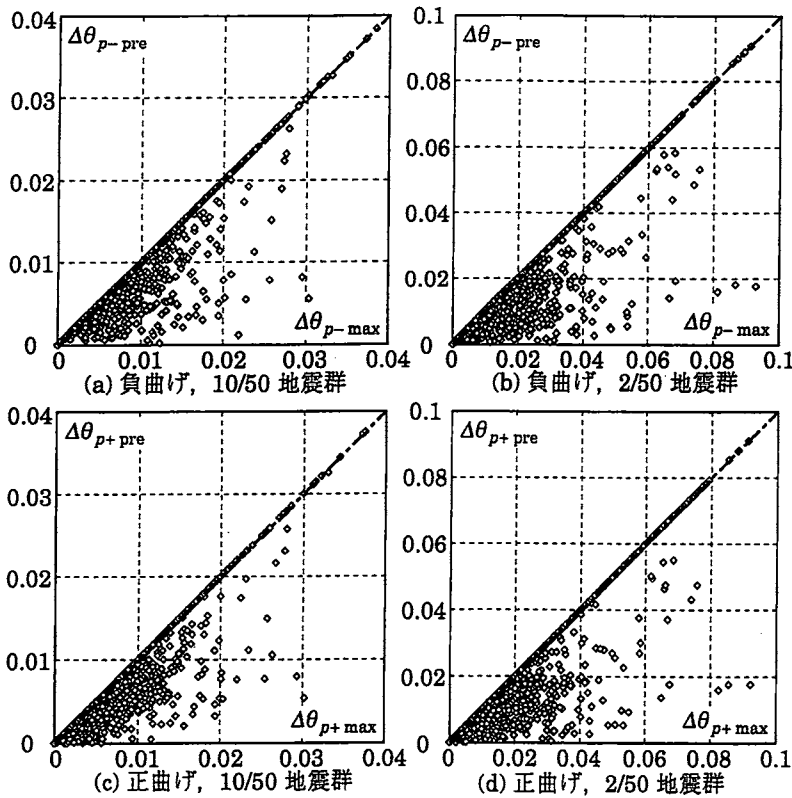


図 22 $\Delta\theta_{p\text{-pre}} - \Delta\theta_{p\text{-max}}$ 関係

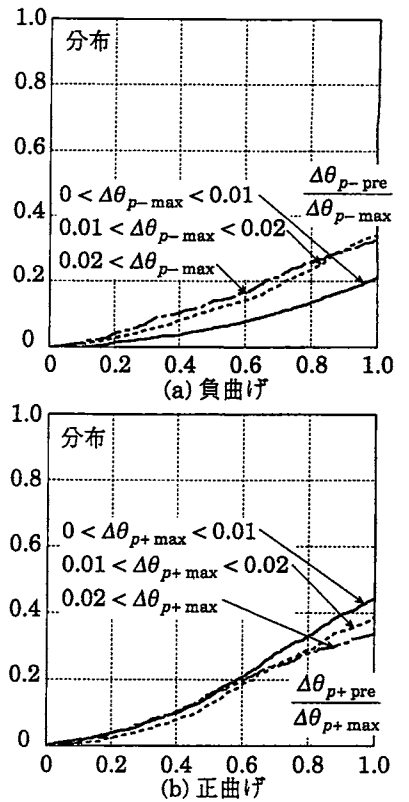


図 23 $\Delta\theta_{p\text{-pre}} / \Delta\theta_{p\text{-max}}$ の累積度数分布

ように、 $\Delta\theta_{p\text{-pre}}$ は $\Delta\theta_{p\text{-max}}$ に一致することが多い。

図 23 には、 $\Delta\theta_{p\text{-pre}}$ と $\Delta\theta_{p\text{-max}}$ との比の累積度数分布を示す。図 22 によると、最大塑性回転角増分 $\Delta\theta_{p\text{-max}}$ が 0.02 程度より小さい範囲では、 $\Delta\theta_{p\text{-pre}}$ が $\Delta\theta_{p\text{-max}}$ より小さくなる割合が増えるようにも見える。しかし、図 23 からわかるように、 $\Delta\theta_{p\text{-max}}$ のどのような領域でも、 $\Delta\theta_{p\text{-pre}}$ の半数以上は $\Delta\theta_{p\text{-max}}$ と一致している。すなわち、最大塑性回転角増分 $\Delta\theta_{p\text{-max}}$ が生じた直後に最大塑性回転角 $\theta_{p\text{-max}}$ に到達する場合が多い。

半サイクルの最大地震入力エネルギーが入力されたときに最大塑性回転角増分 $\Delta\theta_{p\text{-max}}$ は生じ、変位が最大となるときに最大塑性回転角 $\theta_{p\text{-max}}$ が生じることが多いと推察するが、上記の結果は、半サイクルの最大地震入力エネルギーの直後に最大変位を生じることが多いという既往の研究結果^{13, 5)}とも一致する。

図 24 は、最大塑性回転角増分 $\Delta\theta_{p\text{-max}}$ が、地震応答中のどのような時期に生じるかを検討したもので、 $\Delta\theta_{p\text{-max}}$ が生じる直前および直後までの累積塑性回転角 $\Sigma\Delta\theta_p$ と累積塑性回転角の総量 $\Sigma\Delta\theta_p$ との比率の累積度数分布を示している。また、図 25 には、最大塑性回転角 $\theta_{p\text{-max}}$ に至る半サイクルの間の塑性回転角増分 $\Delta\theta_{p\text{-pre}}$ が生じる直前および

直後までの累積塑性回転角 $\Sigma\Delta\theta_p$ と全累積塑性回転角 $\Sigma\Delta\theta_p$ との比率の累積度数分布を示している。すなわち、図 25 に直後として示した累積塑性回転角は、最大塑性回転角 $\theta_{p\text{-max}}$ に到達した時点での累積塑性回転角である。なお、図 24, 25 に示した結果は、累積塑性回転角 $\Sigma\Delta\theta_p$ が最大塑性回転角増分 $\Delta\theta_{p\text{-max}}$ の 3 倍以上のものに限定している。

前述したように、最大塑性回転角 $\theta_{p\text{-max}}$ に至る半サイクルの間の塑性回転角増分 $\Delta\theta_{p\text{-pre}}$ は $\Delta\theta_{p\text{-max}}$ と一致することが多いので当然でもあるが、図 24 と図 25 に示した結果は非常に似たものとなっている。

図 24, 25 によると、 $\Delta\theta_{p\text{-max}}$ および $\Delta\theta_{p\text{-pre}}$ の発生時期は、塑性変形の初期から最終段階までの広い範囲にほぼ一様に分布しており、特定は困難である。中央値的な値を図 24, 25 から読みとれば、 $\Delta\theta_{p\text{-max}}$ や $\Delta\theta_{p\text{-pre}}$ が生じる直前の累積塑性回転角は全累積塑性回転角の 3 割程度であり、 $\Delta\theta_{p\text{-max}}$ や $\Delta\theta_{p\text{-pre}}$ が生じた直後の累積塑性回転角は全累積塑性回転角の 5 割程度である。塑性回転角が累積する過程の内では後半よりも前半において、 $\Delta\theta_{p\text{-max}}$ および $\Delta\theta_{p\text{-pre}}$ が生じやすい傾向があることは認めら

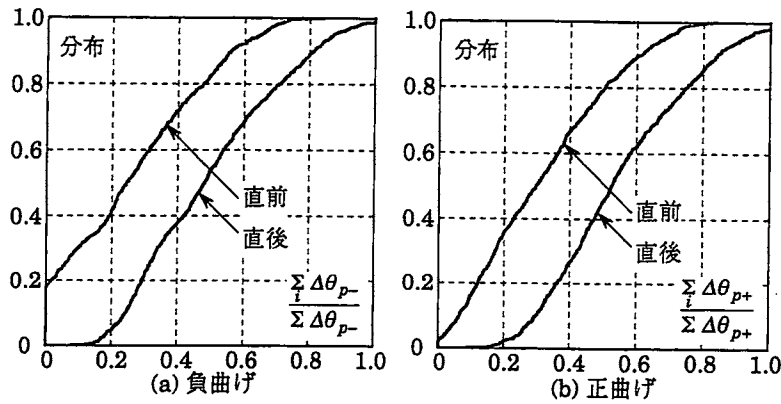


図 24 最大塑性回転角増分 $\Delta\theta_{p\max}$ の発生時期

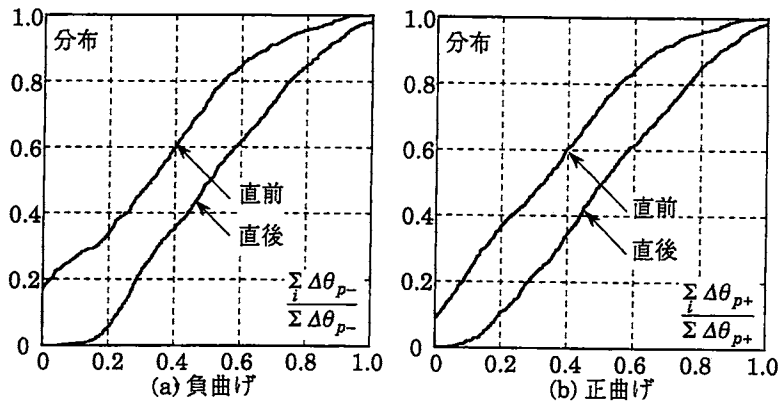


図 25 $\Delta\theta_{p\text{pre}}$ の発生時期

れる。

6. 結論

本研究は、設計の初期段階において地震時の最大層間変位角 R_{\max} が指定された時点で、梁端に要求される必要塑性変形性能を評価する方法を確立することを目的とするもので、標準的な鋼構造ラーメン骨組の地震応答解析結果に基づいて、梁端に生じる塑性変形と最大層間変位角 R_{\max} との関係を検討した。本論（その2）では、梁端の塑性履歴性状について検討したが、その結果を要約すると、以下ようになる。

- (1) 各層の負曲げと正曲げの最大塑性回転角を生じる2つの梁端について、各回の塑性回転角増分やその累積過程には、顕著な差違は認められない。
- (2) 累積塑性回転角の上限は、最大塑性回転角増分の5倍で近似できる。
- (3) 各回の塑性回転角増分を大きい順に並べると等差級数になると考えることで、梁端に生じる損傷の上限が近似できる。
- (4) 最大塑性回転角増分が生じた直後に、最大塑

性回転角に到達することが多い。

- (5) 塑性回転角が累積される過程のどの時点で、最大塑性回転角増分が生じるかは特定しがたいが、後半よりも前半で生じやすい傾向が認められる。

以上述べたように、本論で検討した累積塑性回転角などの応答値は、(その1)で検討した塑性回転角の大きさに関する応答値と比べても非常にばらつきが大きい。これは、本研究が最大層間変位角 R_{\max} という変形の最大応答値だけに基づいて応答を評価していることにも起因しているものと考えている。

謝辞

本研究は科学研究費補助金(基盤研究(C))の助成を受けて行いました。また、本研究を進めるにあたっては、日本建築学会 鋼構造接合小委員会(主査:京都大学 中島正愛 教授)の皆様から貴重なご助言を頂きました。

参考文献

- 1) 小川厚治・中原寛章: 強震を受ける鋼構造ラーメン

- 骨組の梁に生じる塑性変形(その1:最大変形), 日本鋼構造協会鋼構造論文集, 投稿中
- 2) 小川厚治・井上一朗・中島正愛・澤泉紳一: 梁降伏型鋼構造ラーメン部材の必要塑性変形性能に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第537号, pp.121-128, 2000.11
 - 3) 井上一朗: 塑性歪履歴を受ける鋼構造部材の耐震性判定に関する一考察, 構造工学論文集, Vol. 41B, 1995.3
 - 4) 長谷川隆: 地震時における鉄骨構造骨組の柱, 梁, 接合部パネルの損傷予測, 日本建築学会技術報告集, 第10号, pp.105-110, 2000.6
 - 5) 小川厚治: 半サイクルの地震入力エネルギーとバイリニア系の最大変位応答, 日本建築学会構造系論文集, 第532号, pp.185-192, 2000.6
 - 6) 多田元英: 1層1スパン鋼骨組の層間変位速度応答に関する考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1 構造 III, pp.745-746, 1996.9
 - 7) 一戸康生・桑村仁: 鉄骨の脆性破壊に及ぼす繰返し変位振幅の影響(鉄骨破断に関する研究 その3), 日本建築学会構造系論文集, 第534号, pp.145-151, 2000.8
 - 8) 鈴木敏郎・玉松健一郎: 低層鉄骨造骨組柱材のエネルギー吸収能力に関する実験的研究(その1 単調載荷および定変位振幅載荷を受けるH形鋼柱材のエネルギー吸収能力), 日本建築学会論文報告集, 第279号, pp.65-76, 1979.5
 - 9) 藤本盛久・泉満: 欠陥を有する溶接部の変形能力に関する研究-T継手突合せ溶接部の低サイクル塑性疲労実験 その2-1, 日本建築学会論文報告集, 第303号, pp.21-30, 1981.5.
 - 10) 鈴木孝彦・桑村仁: 低YR高張力鋼はり端溶接継手の耐震性能(その1 低サイクル疲労実験), 日本建築学会大会学術講演梗概集, C 構造 II, pp.1597-1598, 1990.10
 - 11) 中込忠男・李建・佐々木康彰・原山浩・岩本剛: SN490B鋼を用いた梁端溶接接合部の疲労特性に関する研究, 日本鋼構造協会鋼構造年次論文報告集, pp.71-78, 1997.11
 - 12) 建設省総合技術開発プロジェクト/次世代鋼材による構造物安全性向上技術の開発/材料・溶接と破断分科会報告書, 7章 変位振幅と脆性破断の関係, 建設省建築研究所・(社)鋼材倶楽部, pp.7-1~7-21, 1999.3
 - 13) 中村孝也・堀則男・井上範夫: 地震動エネルギーの入力過程を考慮した鉄筋コンクリート造建物の応答最大変形推定法, 構造工学論文集, Vol.44B, pp.359-368, 1998.3