

論文 段落し部を有する橋脚の曲げ損傷に関する解析的検討

黒田 雅裕*1・幸左 賢二*2・清水 英樹*3・西岡 勉*4

要旨：兵庫県南部地震により橋軸直角方向に曲げ損傷した実橋脚 46 基に対し、実損傷位置の耐力比を用いて損傷位置の評価を行った。その結果、耐力比 1.2 以上は全て基部損傷を主とした橋脚が分布し、耐力比 1.0 以下は全て段落し部損傷となったが、46 基のうち段落し部損傷した橋脚 4 基のみ耐力比が 1.0 を超え、評価と基部・断落し部での実損傷が逆転する結果となった。そこで、動的挙動が損傷位置に与える影響を確認するため、段落し部損傷の代表橋脚に対し、Pushover 解析、動的解析を行った。その結果、設計耐力比が 1.0~1.2 の遷移領域では、主に地震波入力の影響と減衰の影響を考慮する必要があり、地震動が作用することで耐力比が最大 0.05 低下すること、減衰の影響で橋脚に作用するモーメントが 10%程度減少することを確認した。

キーワード：耐力比、段落し、曲げ損傷、損傷位置、地震被害、動的解析、

1. はじめに

1995年に発生した兵庫県南部地震では、200基を超えるコンクリート橋脚の倒壊や破壊に至る損傷が発生し、その多くが段落し部の損傷に起因するものであった¹⁾。

段落し部を有する橋脚の損傷位置の判定には、一般には基部、段落し部の耐力比が用いられている。著者らは過去の研究において、曲げ損傷した23基の実験供試体について損傷位置の分析を行い、その結果から、実損傷位置の曲げ耐力を比較する損傷位置の判定式として、後述の式(1)を提案している²⁾。

本研究では図-1のフローに従い、まず、実橋脚の曲げ損傷位置について耐力比を用いて評価を行った。さらに、段落し部で曲げ損傷する代表橋脚に対し非線形動的解析、Pushover解析を行い、損傷状況について減衰、及び加速度の影響に着目して考察を行なった。

2. 分析概要

筆者らは、既往の実験供試体の損傷分析を行い、その結果から、段落し部と基部の耐力比を用いた曲げ損傷位置の判定式(1)を提案している²⁾。

$$k = \frac{P_y'}{P_{y0.35D}} = \frac{M_y'/a}{M_y/(h-0.35D)} \quad (1)$$

$k < 1.0$ 段落し部損傷, $k \geq 1.0$ 基部損傷

P_y' : 段落し部降伏耐力[kN]

$P_{y0.35D}$: 基部より0.35D上方における降伏耐力[kN]

M_y' : 段落し部の初降伏モーメント[kN・m]

M_y : 基部の初降伏モーメント[kN・m]

a : 慣性力作用位置から段落し部までの高さ[m]

h : 慣性力作用位置から基部までの高さ[m]

D : 橋脚の断面幅[m]

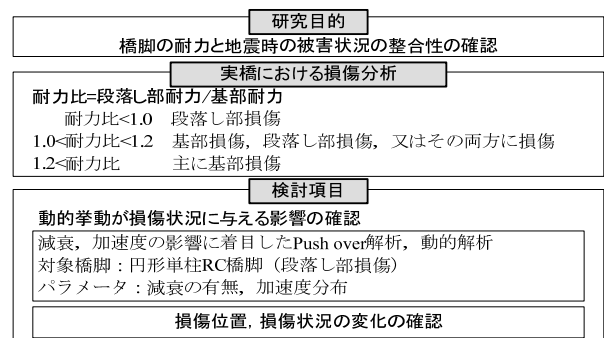


図-1 研究フロー

式(1)は既往の23基に対する実験結果から提案したものであり、実橋での適用性を評価するため、1995年兵庫県南部地震で橋脚の倒壊、落橋などの大規模な被害を受けた阪神高速道路3号神戸線の橋脚に対し、同様の分析を行った。損傷の形態や位置の把握には震災直後に撮影された写真、地中部のひび割れや座屈範囲が記載されている損傷図を用いた。耐力比は配筋図の鉄筋量から道路橋示方書V・耐震設計編を用いて算定した。

対象橋脚の基数とその分類について表-1に示す。RC橋脚全943基の内、段落しを有する橋脚は163基であり、柱部が損傷している橋脚が156基であった。本研究で着目する、水平ひび割れが生じる、または、被りが水平に剥離し軸方向鉄筋が座屈する特徴を有する曲げ損傷タイプは55基であった。そのうち橋軸方向に損傷した橋脚は上部工形式などにより耐力評価が複雑となるため、主として橋軸直角方向に損傷した46基を検討対象とした。

次に、損傷位置を基部損傷、段落し部損傷、複合損傷の3種に分別し、対応する橋脚の諸元を図-2に示す。基部で曲げ損傷が確認できる橋脚を基部損傷、カットオフ点で曲げ損傷が確認できる橋脚を段落し部損傷と定義した。また、実橋脚の場合、例えば基部では被りが剥離

*1 九州工業大学 工学部建設社会工学科 (正会員)

*2 九州工業大学 工学部建設社会工学科教授 Ph.D. (正会員)

*3 大日本コンサルタント株式会社 九州支社 技術部 (正会員)

*4 阪神高速道路株式会社 技術部技術管理室 (正会員)

し、段落し部では水平ひび割れが発生している橋脚があり、基部と段落し部の両方が曲げ損傷する橋脚が存在することから、これを複合損傷と定義し分別した。定義にしたがって損傷位置を判断した結果、基部損傷と判断される橋脚は26基、段落し部損傷と判断される橋脚は8基、複合損傷と判断される橋脚は12基であった。

対象橋脚46基の降伏耐力比と損傷位置の基数の分布を図-3に示す。基部損傷する橋脚26基は全て耐力比1.0以上に分布する。段落し部損傷する橋脚8基のうち、4基は耐力比1.0以下、4基は耐力比1.0から1.2の範囲に分布する。また、複合損傷する橋脚12基は、全て耐力比1.0以上に分布する。12基中11基の主たる損傷は基部に生じていたため基部損傷タイプ的一种とも考えられる。

以上から、耐力比1.2以上は主として基部損傷タイプとなる。耐力比が1.0から1.2の範囲では基部損傷と段落し部損傷の両方が分布しているため、損傷の遷移領域と考えられる。また、耐力比1.0以下は段落し部損傷のみが分布している。ここで、検討を要するのは、46基中評価結果と実損傷が一致しない段落し部曲げ損傷タイプが4基あり、いずれも耐力比が1.0以上になるにも関わらず、段落し部損傷が発生している点である。本分析方法である耐力比の判定では地震動が作用した時に生じる減衰や加速度の影響が考慮されていない。そこで、耐力比と損傷位置の評価が一致しており、損傷が明確である代表的な段落し部曲げ損傷の橋脚に着目し、動的解析、Pushover解析を行い、減衰、加速度により損傷状況がどの程度変化するかを確認した。

3. 解析概要

3.1 代表橋脚の形状、解析モデル

図-4に対象橋脚の形状と解析モデルを示す。本橋脚は、図-3の○で示すように耐力比が最も低く0.90の段落し部損傷の橋脚である。脚高は約12.4m、柱断面は直径2.5mの円形である。軸方向鉄筋(D32)は、3段配筋で、基部から2.0mの位置と4.0mの位置の2箇所で段落しされている。図-4の解析モデルは、梁、フーチングには剛梁要素を用い、柱部には弾塑性梁要素を用いた。柱部のM-φ関係は、0~2.0mは基部、2.0~4.0mは第1段落し部、4.0m以上は第2段落し部の断面配筋を用いて算定している。柱部の非線形性はトリリニア型としている。履歴法則は武田モデルを採用した。基部、段落し部の挙動を詳細に分析するため、基部から4.0mの区間を0.1mのピッチで40分割し、全体では50分割とした。上部工は単純鋼桁であり、死荷重反力は7200kNである。上部工の影響は質量に置き換え各質点に作用させている。また、柱の重量は単位体積重量を24.5kN/m³として算定している。基礎は杭基礎であり、フーチング底面における地盤のN値を7とし

表-1 対象橋脚の基数

分類	基数
RC橋脚	943
段落しを有する橋脚	163
損傷が確認可能な橋脚	156
曲げ損傷する橋脚	55
橋軸直角方向に損傷する橋脚	46

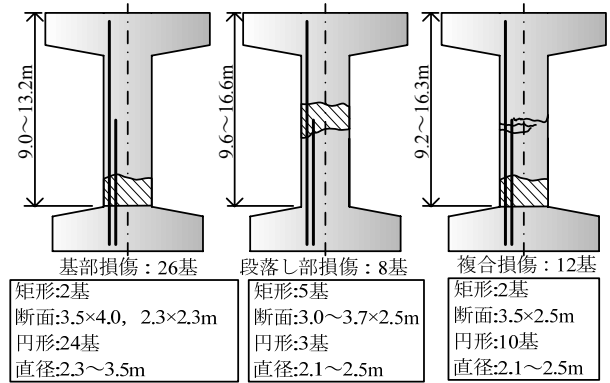


図-2 対象橋脚の諸元

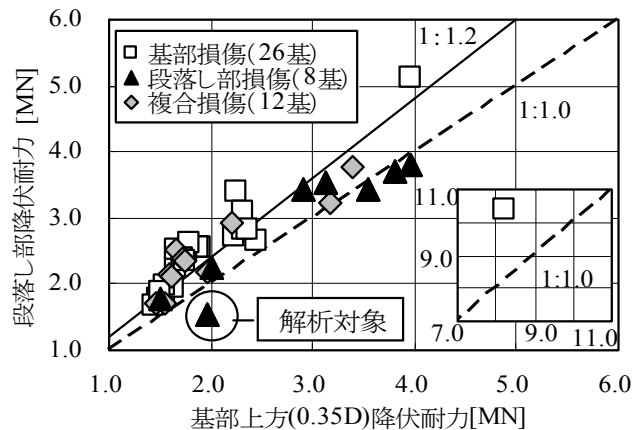
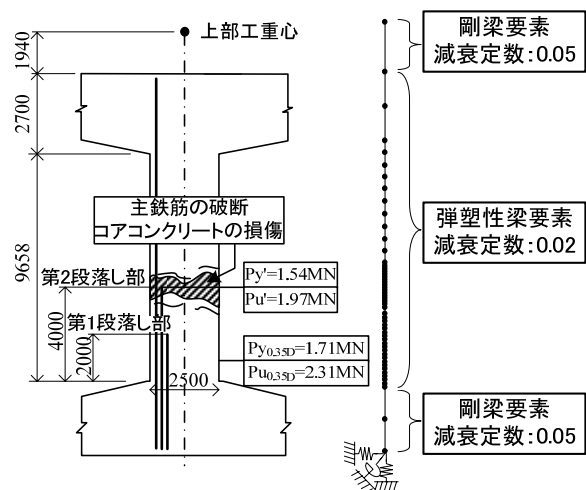


図-3 段落し部損傷判定結果



	レーリー減衰	地盤バネ
	採用モード	
Case1	1, 20次	N=7
Case2	減衰無し	N=7
Case3	Pushover	N=7

図-4 対象橋脚の形状と解析モデル

て地盤バネを算定した。また、解析モデルを単純化するため、集約バネモデルとしている。水平バネは 3.26×10^6 kN/m、鉛直バネは 3.64×10^6 kN/m、回転バネは 2.70×10^7 kN・m/rad である。材料モデルは、コンクリートは土木学会コンクリート標準示方書に準拠し、鉄筋は降伏後応力一定のバイリニアモデルを用いている。

本論文では、減衰、加速度が損傷状況に与える影響を分析するため、以下のように解析パラメータを設定した。

(1) Case1

Case1は減衰を考慮した動的解析を行う。橋脚全体の減衰特性はRayleigh減衰を用いている。固有値解析の結果より、今回の場合減衰の影響を安全側に評価するために1次モード(1.3518秒)と20次モード(0.0007秒)を採用し $\alpha=0.487670$ 、 $\beta=0.000005$ としている。入力地震波は、JR鷹取波³⁾を用いている。このうち主要動を含む0~40秒を橋軸直角方向に入力した。数値積分にはNewmarkの β 法($\beta=1/4$)を用い、積分時間間隔は $\Delta t=1/100$ 秒とした。

(2) Case2

Case2は減衰を考慮しない解析であり、Rayleigh減衰の $\alpha=\beta=0.000005$ とし減衰マトリクスを0に近づけた。それ以外の条件はCase1と同様である。

(3) Case3

Case3は加速度分布をパラメータとしたPushover解析であり、解析モデルに作用する加速度を一定としている。

3.2 減衰の有無に着目した解析結果

ここでは、減衰の有無に着目した動的解析の結果として、Case1, 2の段落し部作用Mの時刻歴図を示す。

図-5にCase1の結果を示す。Case1では、1.98sに段落し部が降伏に至り、5.52sに終局に至る。また、地震波作用時から20s間は作用Mが大きく増減を繰り返し、降伏耐力を5回、終局耐力を3回超えるという結果が得られた。

図-6にCase2の結果を示す。Case2では、1.24sに段落し部が降伏に至り、5.55sに終局に至る。地震波作用時から20s間は作用Mが大きく増減を繰り返し、降伏耐力を9回、終局耐力を4回超えるという結果が得られた。

図-5, 6を比較すると、降伏耐力、終局耐力に至る回数や時刻に差異が生じることが分かるため、作用Mの大きさや解析上の実耐力比について分析を加える。ここで、分析点の選定方法と比較基準について図-7を用いて説明する。

図-7は、図-5, 6の(1)に着目し、14.0~18.0s間を比較した図である。図-7に示すように、Case1, 2は減衰の影響により作用Mに差異が生じている。本論文ではこの作用Mの差異を正確に評価するため、段落し部の作用Mの頂点(図中(1))に着目した分析を行う。これは、作用Mの頂点は作用Mの差異が明確であり、地震波の影

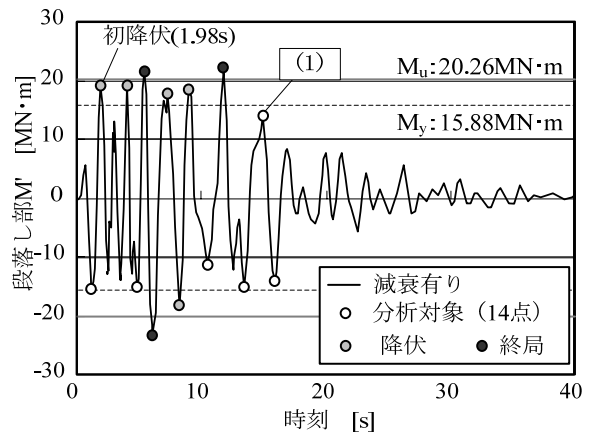


図-5 段落し部時刻歴作用

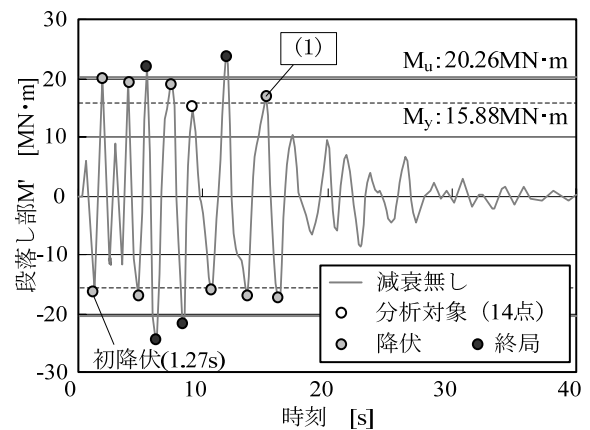
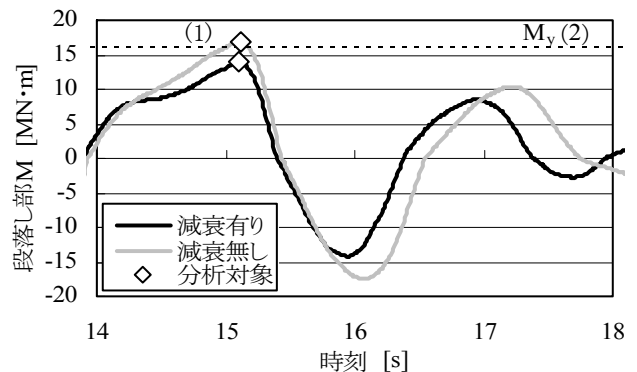


図-6 段落し部時刻歴作用 M 図 (Case2)



-分析対象と基準-
(1)波の頂点に着目($\geq 0.9M_y$)
(2)作用Mと近い耐力(M_u, M_y)を基準に分析

図-7 分析対象と基準

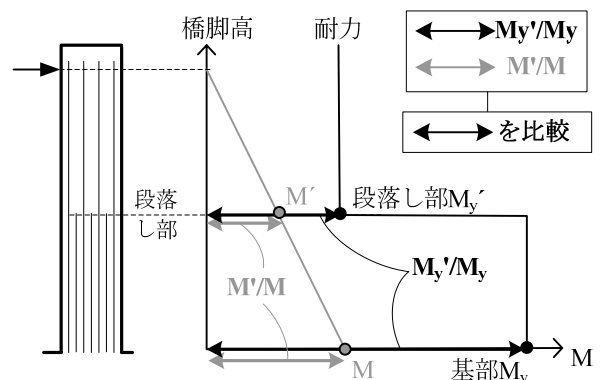


図-8 実耐力比による損傷度の評価方法 (模式図)

響が最も現れている点と考えられるためである。また、作用Mの頂点は、降伏モーメントの0.9倍以上を対象とする。これは、降伏 M_y 未満でも減衰による作用Mの増減により損傷する可能性があるためである。以上の方法を用い、図-5、6中の○プロットに示す14点を選定した。

3.3 解析上の実耐力比の評価

前述の基準を用いて、選定した分析点について、作用Mの比較を行い、さらに実耐力比を求め降伏耐力比、終局耐力比と比較を行う。実耐力比の算定方法を図-8に示す。解析上の実耐力比は、基部と段落し部の作用Mの比と橋脚の基部と段落し部の耐力(M_y , M_u)の比を比較することで算定する。式(2)に実耐力比の算定式を示す。

$$\text{実耐力比} = (M_y' / M_y) / (M' / M) \quad (2)$$

M_y' : 段落し部降伏モーメント

M_y : 基部降伏モーメント

M' : 段落し部作用モーメント

M : 基部作用モーメント

図-9に実耐力比の評価例を示す。対象点は、Case2が初降伏に至る時刻であり、Case1は1.24s、Case2では1.27s時である。段落し部の作用Mは、Case1で-15.6MN・m、Case2で-16.5MN・mとなり、Case2の作用Mを100%とすると、減衰を考慮したCase1では94.5%に減少している。また、基部の作用Mは、Case1で-21.4MN・m、Case2で-23.3MN・mであり、段落し部と同様に評価するとCase1の作用Mは91.8%に減少していることが分かる。以上から、減衰の影響により作用Mが5~7%程度減少することが分かる。

また、式(2)を用いて降伏実耐力比を求めた結果、Case1は0.89、Case2は0.91という結果が得られた。対象橋脚の降伏耐力比は0.90であり、初降伏時付近では実耐力比に大きな変化は確認されなかった。

3.4 作用M、実耐力比の評価結果

図-10に基部作用Mの比較結果を示す。基部作用MはCase1の方が小さく、Case2の基部作用Mが大きくなる場合は1点しか確認されない。Case2を基準にCase1の作用Mを評価すると、平均で10.6%作用Mが減少している。最も作用Mが減少する11s付近では、Case1の作用MがCase2の75%程度まで低下している。

図-11に段落し部作用Mの比較結果を示す。段落し部の作用Mも基部と同様に、Case1の方が小さく、作用Mが逆転する場合は、1点しか確認されない。Case2を基準にCase1の作用Mを評価すると、平均で8.0%作用Mが減少している。最も作用Mが減少する11s付近では、Case1の作用MがCase2の70%程度まで低下している。

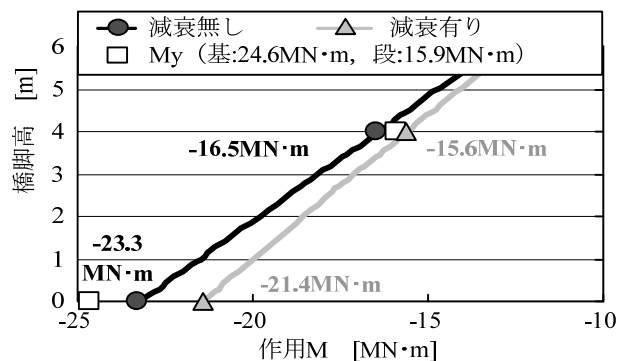


図-9 モーメントM図 (Case1分布の比較)

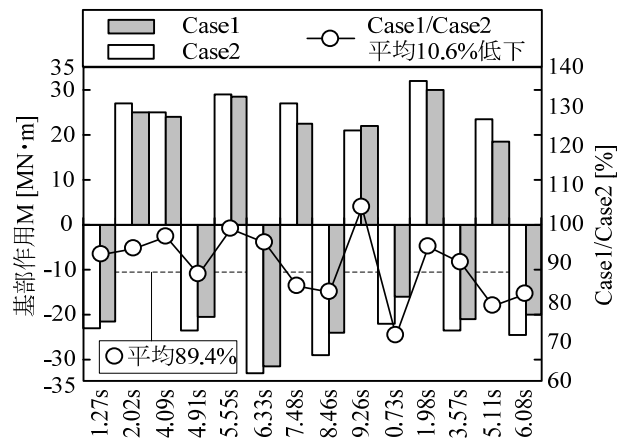


図-10 作用Mの比較 (基部)

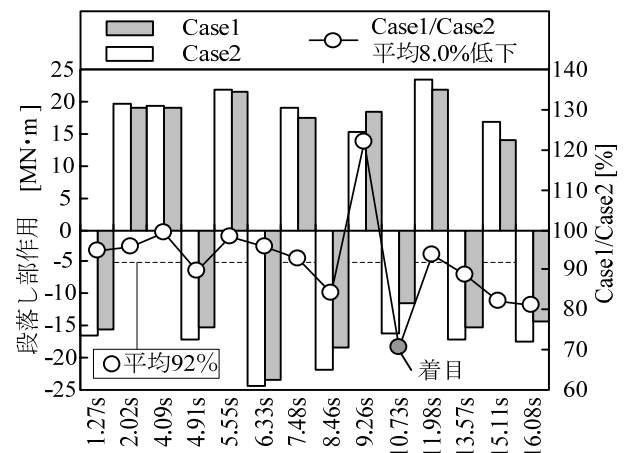


図-11 作用Mの比較 (段落し部)

以上より、減衰を考慮することで、作用Mが基部で10.6%、段落し部で8.0%減少することが分かる。この要因については4章で詳細を述べる。

図-12に式(2)より求めた実耐力比を示す。図-12から分かるように降伏実耐力比は0.90の上下に、終局実耐力比は0.80の上下に分布している。また、実耐力比を平均すると、Case1の降伏実耐力比は0.87であり、終局実耐力比は0.79となる。一方、Case2の降伏実耐力比は0.90、終局耐力比は0.80となる。橋脚の耐力比と実耐力比を比較すると、降伏耐力比は、解析上で0.01減少し、終局耐力比は、解析上で0.05減少している。

以上の分析より、減衰を考慮することで橋脚に作用するモーメントが10%程度減少すること、地震波が作用す

る場合、耐力比は0.01~0.05減少することが分かった。

ここで、Case2は減衰が作用しないが、橋脚の耐力比と実耐力比に差異が生じることから、橋脚に作用する加速度分布により作用Mの形状が変化したことが考えられる。また、Case1, 2を比較しても実耐力比の減少程度は異なっている。この要因として、橋脚に減衰モーメントが作用していること、減衰の影響により加速度分布が変化していることが挙げられる。次章では、加速度分布が損傷状況に与える影響を分析するために、Case2とCase3の比較、また、減衰の影響を分析するために、Case1とCase2の比較を行う。

4. 動的挙動に関する考察

4.1 加速度分布に関する考察

ここでは、加速度分布が作用M分布に与える影響を分析するため、Case2, 3の解析結果について比較を行う。比較対象とする点は、図-12の解析上の実耐力比が最も低下した4.08s時である。

図-13にCase2, 3の加速度分布を示す。Pushover解析の加速度分布は、Case2の上部工に作用する加速度を橋脚全体に作用させている。Case2は、上部工に 2.67m/s^2 の加速度が作用しているが、12m以下は加速度が負方向に作用しており、基部に近づくにつれPushover解析との加速度の差が広がる。図-13の加速度分布から求めた作用M分布を図-14に示す。作用M分布は、Pushoverの方が基部に向かって増加していくのに対し、Case2は基部のモーメントがあまり増加していない。Pushover解析の作用Mは、基部で $35.8\text{MN}\cdot\text{m}$ 、段落し部で $24.9\text{MN}\cdot\text{m}$ となっている。Case2では、基部で $25.2\text{MN}\cdot\text{m}$ 、段落し部で $19.4\text{MN}\cdot\text{m}$ となっている。Case2を基準とすると、Pushover解析では基部で42.1%、段落し部で28.4%増加している。これは、Pushover解析の加速度が柱部で正方向に作用しているためであり、基部に向けてモーメントが増加し続けることで段落し部と基部のモーメントの増加に差異が生じたと考えられる。

4.2 減衰に関する考察

ここでは、減衰が損傷状況に与える影響を分析するため、Case1, 2の解析結果について比較する。比較対象とする点は作用Mの減少率が最も大きな10.73s時である。図-15にCase1, 2の加速度分布を示す。上部工に作用する加速度は、Case1で -1.48m/s^2 、Case2で -2.01m/s^2 となっており、減衰の無いCase2の方が1.3倍程度大きな値が生じている。分布形状に着目すると、Case1, 2共に橋脚高9m付近で加速度の正負が入れ替わり、基部では 1.0m/s^2 程度の加速度が作用しており、ほぼ同様の形状を示す。図-16にCase1, 2の速度分布を示す。上部工に作用する速度は、Case1で 0.052m/s 、Case2で -0.061m/s と絶対値が

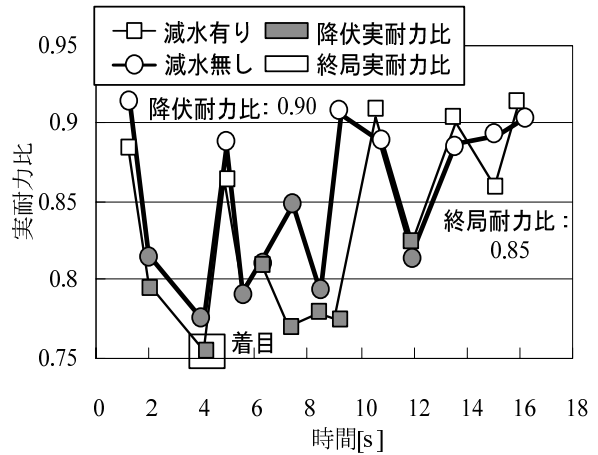


図-12 解析上の実耐力比

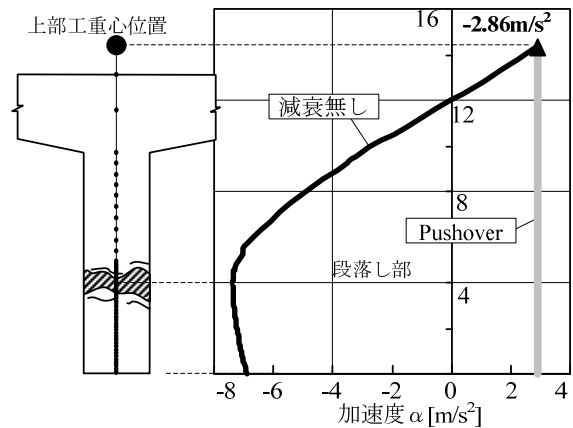


図-13 加速度分布の比較 (Pushover, 減衰無し)

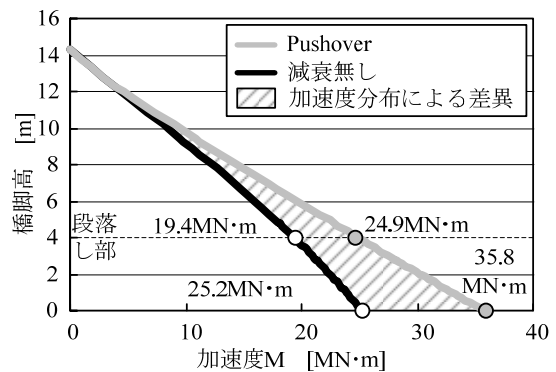


図-14 作用M分布の比較 (4.08s, 降伏時)

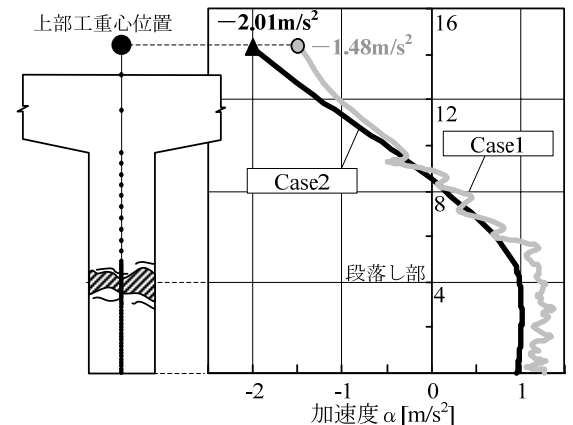


図-15 加速度分布の比較 (減水無し, 減水有り)

小さく、上部工の速度だけでなく形状も正負が入れ替わっている。以上より、速度分布から得られる減衰モーメントは絶対値が小さくなると予想される。

以上の加速度分布、速度分布から求めたモーメント分布を図-17に示す。Case1の速度によるモーメントは絶対値が小さく、基部で $0.34\text{MN}\cdot\text{m}$ が生じる程度である。また、加速度によるM分布を比較すると、Case1では、段落し部で $-11.9\text{MN}\cdot\text{m}$ 、基部で $-16.4\text{MN}\cdot\text{m}$ が作用している。Case2では、段落し部で $-16.0\text{MN}\cdot\text{m}$ 、基部で $-22.2\text{MN}\cdot\text{m}$ が生じている。Case2を基準とすると、段落し部で27%、基部で28%程度モーメントが減少している。Case1の作用MとCase2の加速度Mを比較すると、減少率は基部、段落し部ともに27%であり、速度によるモーメントの影響をほとんど受けていない。

ここで、減衰が加速度に与える影響を分析する。図-18に9.5~12.5s時の上部工に作用する加速度を示す。上部工の加速度は基本的にCase2の方が大きく、加速度の頂点を比較すると、10.5s付近分布のではCase1の1.36倍、12.0s付近では1.15倍の加速度が作用している。これは、減衰の影響で上部工の変位が小さくなることで、加速度の値も小さくなったことが要因と考えられる。以上から、作用Mの頂点では速度によるモーメントの影響は小さいが、減衰により加速度が小さくなるため作用Mの値が小さくなる事が分かる。

本章では、動的挙動について加速度分布、速度分布を分析した。その結果、加速度分布が作用Mの形状に影響を与えることが分かった。また、耐力比が1.0以上の橋脚であっても、地震波が作用する場合には耐力比が5%程度増減する可能性があることに留意する必要がある。

5. まとめ

本研究では、曲げ損傷する実橋脚 46 基に対し実損傷位置の耐力比を用い損傷位置を評価した。また、耐力比による評価と実損傷が一致する代表橋脚について動的解析、Pushover 解析を行い、減衰、加速度が損傷状況に与える影響を評価した。以下に得られた知見を示す。

- (1)曲げ損傷する実橋脚 46 基に対し耐力比を用いて損傷位置を評価した。その結果、耐力比 1.2 以上は全て基部損傷を主とする橋脚が分布し、耐力比 1.0 以下は全て段落し部損傷の橋脚が分布した。損傷位置と評価結果は概ね一致するが、段落し部損傷は耐力比 1.2 まで分布するため、46 基中段落し部損傷の 4 基のみ一致していないという結果が得られた。
- (2)減衰、加速度が損傷状況に与える影響を確認するため、損傷位置と耐力比による評価が一致する段落し部損傷の橋脚を対象に動的解析、Pushover 解析を実施した。その結果、地震波が作用する場合、耐力比が最大

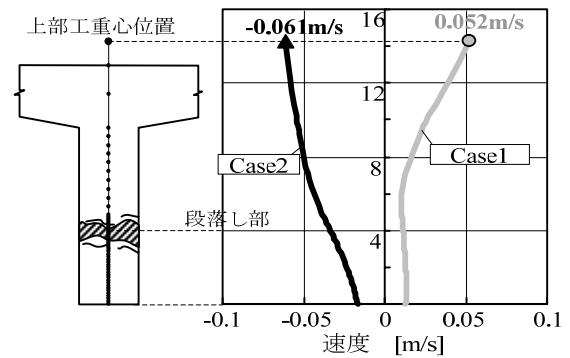


図-16 速度分布の比較 (減衰無し, 減衰有り)

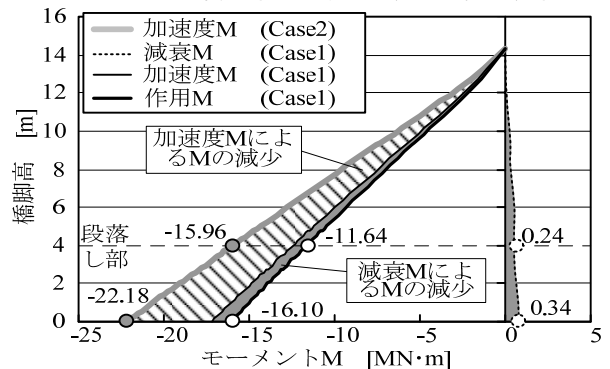


図-17 M 比較 (減衰無し, 減衰有り)

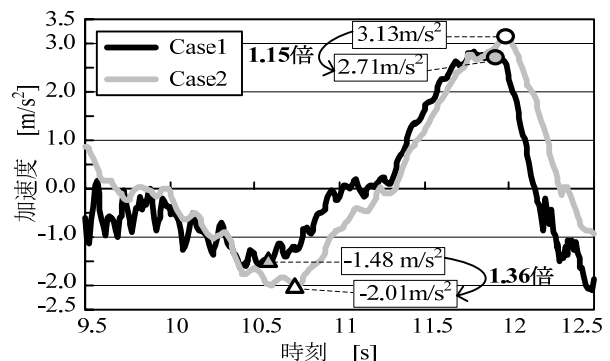


図-18 上部工の加速度時刻歴図

で0.05低下すること、減衰を考慮することで橋脚に作用するモーメントが10%減少することが確認された。以上から、橋脚の耐力比が1.0以上の場合であっても地震波が作用した場合には段落し部で損傷する可能性があることに留意する必要がある。

参考文献

- 1) 幸左賢二, 曾根英樹, 中田恒和, 田坂幹雄: 詳細調査に基づく被災RC橋脚損傷程度の定量的評価, 土木学会論文集, No.648/V-47, pp.179-190, 2000.5
- 2) 黒田雅裕, 幸左賢二, 二井伸一, 西岡勉: 段落しを有する橋脚の損傷形態に関する研究, 第30回土木学会地震工学研究発表会論文集, Vol.30, 2009.5
- 3) 松崎裕, 川島一彦: 上下方向地震動が橋脚の地震応答に及ぼす影響, 第12回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.339-340, 2009.1