# 段落しを有する橋脚の損傷形態に関する研究

黒田　雅裕[1]・幸左　賢二[2]・二井　伸一[3]・西岡　勉[4]

[1]九州工業大学建設社会工学科（〒804-8550 福岡県北九州市戸畑区仙水町1-1）
E-mail:e105026m@tobata.isc.kyutech.ac.jp
[2]九州工業大学建設社会工学科教授　（〒804-8550 福岡県北九州市戸畑区仙水町1-1）
E-mail: kosa@civil.kyutech.ac.jp
[3]株式会社ウエスコ岡山支社設計部構造設計課　（〒700-0033 岡山市島田本町2-5-35）
E-mail:s-nii@civil.kyutech.ac.jp
[4]阪神高速道路株式会社技術部技術管理室　（〒541-0056 大阪市中央区久太郎町4-1-3）

段落し部を有する曲げ損傷タイプの実験供試体を対象に，損傷位置，耐力の評価を行った．詳細な損傷位置分析の結果，段落し部損傷ではカットオフ点で，基部損傷では基部から0.4D上方が損傷中心点となることが明らかとなった．また，実際の損傷位置の耐力を用いた判定式により，供試体では耐力比1.0で損傷位置を判定できることが確認された．ついで，地震被害を受けた実橋脚では，基部損傷は曲げ耐力比1.0以上に全て分布していた．一方，耐力比1.0から1.2は3つの損傷形態が存在しており，複数の損傷形態が混在する領域であると考えられる．

***Key Words :*** *Cut-off point, Bending failure, Failure location, Earthquake damage*

## 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たが，その多くが段落し部の損傷に起因するものであった[1)]．

段落し部損傷に対する研究は，従来より土木研究所を中心に進められ，基部あるいは段落し部の損傷位置については以下の式(1)で判定され耐震補強に利用されている[2)]．

$$S = \frac{M_{Ty0} / h_t}{M_{By0} / h_B} \qquad (1)$$

S＜1.2　段落し部損傷
S≧1.2　基部損傷
$M_{Ty0}$：段落し部の初降伏モーメント(kN･m)
$M_{By0}$：基部の初降伏モーメント(kN･m)
$h_t$　：慣性力作用位置から段落し部までの高さ(m)
$h_B$　：慣性力作用位置から基部までの高さ(m)

式(1)で用いられている$h_t$は**図-1**に示すように，慣性力作用位置と段落し部から定着長分(la)下げた位置までの距離である．

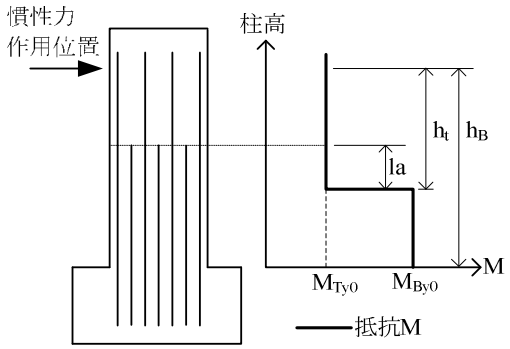



**図-1**　式(1)の模式図

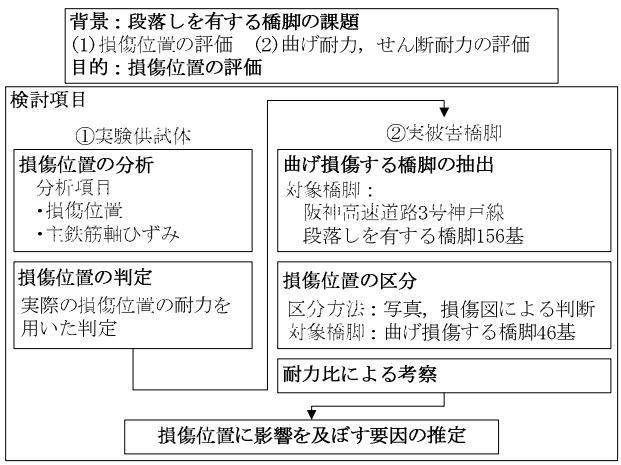
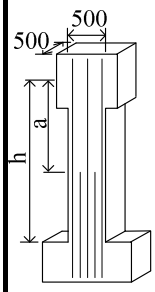
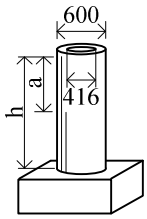
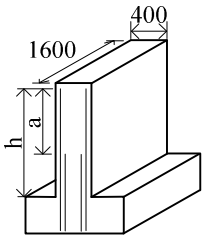


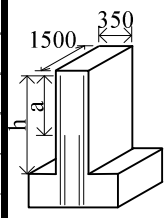
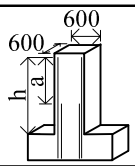
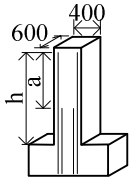
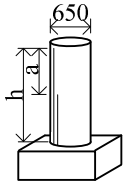

**図-2**　研究フロー

**表-1**　供試体諸元

**川島らの実験**[3)]

| 供試体形状 | 供試体No | 橋脚高 h mm | アーム長 a mm | 主鉄筋径 | 損傷位置※1 | 損傷形態※2 | 基数 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
|  | P | 2500 | 1400 | D13 | 段 | 曲 | 1 |
| | | | 1150 | D13 | 基 | 曲 | 1 |
| | | | 900 | D13 | 基 | 曲 | 1 |
| | R | 4600 | 2800 | D13 | 段 | 曲せ | 1 |
| | | | 2550 | D13 | 基 | 曲 | 1 |
| | | | 2300 | D13 | 基 | 曲 | 1 |
| | | 2600 | 1700 | D10 | 段 | せ | 1 |
| | | | | | | 曲せ | 1 |
| | | | 1600 | D10 | 段 | 曲せ | 1 |
| | | | | D10 | 段 | 曲せ | 1 |
| ① | | 2600 | 1570 | D13 | 段 | 曲せ | 1 |
| ② | | 2600 | 1800 | D10 | 段 | 曲せ | 1 |
| ①R-4  | | | | | | | |
| ②R-15  | | | | | | | |

**山本らの実験**[4)]

| 供試体形状 | 供試体No | 橋脚高 h mm | アーム長 a mm | 主鉄筋径 | 損傷位置 | 損傷形態 | 基数 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
|  | I | 2000 | 1500 | D13 | 段 | 曲 | 2 |
| | | | 1130 | D13 | 段 | 曲 | 3 |
| | | 1000 | 500 | D13 | 段 | 曲 | 2 |
| | | 1500 | 1000 | D13 | 段 | 曲 | 1 |
| | | | 1130 | D13 | 段 | 曲 | 2 |
| | | | 750 | D13 | 段 | 曲 | 2 |
|  | II | 1300 | 800 | D16 | 段 | 曲 | 1 |
| | | | | | | せ | 1 |
| | | | | D13 | 段 | 曲 | 1 |
| | | | | | | せ | 1 |
|  | II | 950 | 530 | D16 | 段 | 曲 | 1 |
| | | 1550 | 880 | D22 | 段 | 割裂 | 1 |
| | | | | D19 | 段 | 曲 | 1 |
| | | | | D13 | 段 | 曲 | 1 |
| | | | | | 基 | 曲 | 1 |
|  | III | 1550 | 880 | D13 | 段 | 曲せ | 1 |
| | | | | D22 | 段 | 曲せ | 1 |
| | | | | D19 | 段 | 曲せ | 1 |
| | | 2300 | 1625 | D22 | 段 | 曲せ | 1 |
| | | | | D16 | 段 | 曲せ | 2 |

※1　基：基部損傷　　段：段落し部損傷

※2　曲：曲げ損傷　　せ：せん断損傷　　曲せ：曲げせん断損傷　　割裂：付着割裂損傷

式(1)によると，段落し部の損傷位置は，段落し部からlaだけ下がった位置となるが，多くの曲げ損傷タイプの実験によると後述の**図-4**に示すようにカットオフ点で発生しているものが多いことから，照査断面としてはカットオフ点が適切とも考えられる．また，1.2を境界とする意図は川島らの実験結果では耐力比1.0により損傷位置を判定できたものの，実橋に適応した場合に耐力比1.08でも段落し部損傷となる橋脚が確認されたため耐力比1.1による提案を行っている．この耐力比1.1に安全率を見込んだ値が1.2であると考えられる．しかし，耐力比1.0以上で段落し部が損傷する要因は未だ明確となっていない．

そこで，本研究では，曲げ損傷した橋脚を対象に**図-2**に示すフローに従い研究を進めた．実験供試体では損傷位置の詳細な分析を行い，実損傷位置の耐力比により損傷位置の区分判定を行った．また，実被害橋脚では被災写真，損傷図などから損傷位置を区分し，耐力比による考察を行った．以上の結果から損傷位置に影響を及ぼす項目の推定を行った．

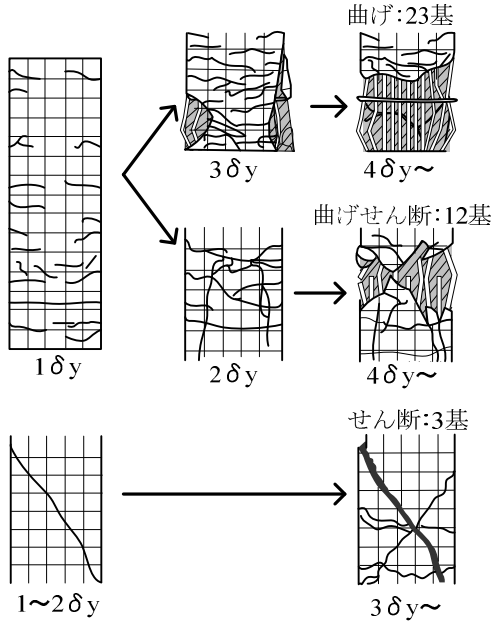



**図-3**　損傷形態の定義

## ２．分析橋脚の抽出（供試体）

川島ら[3]，山本ら[4]，池田ら[5]をはじめとして，合計100体を超える段落とし部を対象とした実験が実施されている．その中で，川島および山本らの実験は段落し部を有する橋脚の耐力比と損傷位置に着目した実験となっており，供試体数も多いことから，ここでは，これらの川島，山本らの実験を対象にまず曲げ耐力比が基部と段落し部の損傷形態に与える影響を分析した．**表-1**に分析対象の供試体諸元を示す．

川島らの実験では，全 12 基の載荷を行っており，損傷位置は 4 基が基部損傷で，8 基が段落し部損傷と判定されている．

山本らの実験では，全 27 基の載荷を行っており，損傷位置は 1 基が基部損傷で，26 基が段落し部損傷と判定されている．

**図-3** に示すように，これらの実験結果を統一的に評価するために曲げ，曲げせん断，せん断に損傷形態を区分する．主として $1\delta_y$ で水平ひび割れが生じ，$3\delta_y$ 以降もひび割れが進展して破壊に至るものを曲げ損傷と定義し，以降では曲げ損傷する供試体に着目した分析を行う．

定義にしたがって曲げ損傷と判定される供試体は，川島らの実験で5基，山本らの実験で18基となっている．次章の損傷位置判定は，この23基を対象としている．

## ３．損傷状態を考慮した損傷位置の判定

### (1) 損傷位置の整理

実損傷位置の耐力を用いた損傷位置の判定を行うため，損傷位置の整理を行う．

川島，山本らの実験においては，18 個の曲げタイプの段落し損傷のうち，2 供試体に対しては詳細な損傷状況が明らかとなっている．

上記2基に加え，池田らの実験[5]から1基と別途行われた川島らの実験[6, 7]から2基，さらに実橋の事例として新潟県中越地震で被害を受けた橋脚2基を加えた計7基とし，段落し部損傷する橋脚の損傷位置を整理する．**図-4**にその結果を示す．結果から，剥離の中心位置はカットオフ点の位置に合致していることが分かる．

次に，川島らの実験において基部損傷する実験供試体について，同様の手法を用いて損傷位置を整理する．**図-5**はその結果である．コンクリートの剥離範囲は部材断面幅程度のものが多いが，その中心点を抽出すると，D/3からD/2間に分布し，平均値は0.4Dとなる．段落し部を有する橋脚において基部損傷位置は平均的に0.4D柱と底部の接合部より上方であることが分かる．

### (2) 損傷位置の耐力を用いた判定

前項の結果より，基部の損傷中心は，柱と底版の

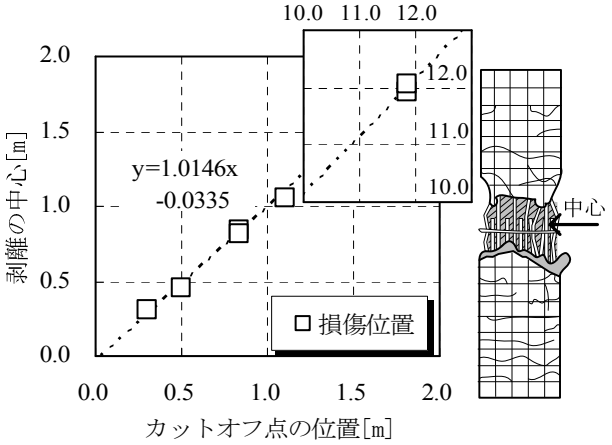



**図-4**　段落しを有する橋脚の段落し部損傷位置

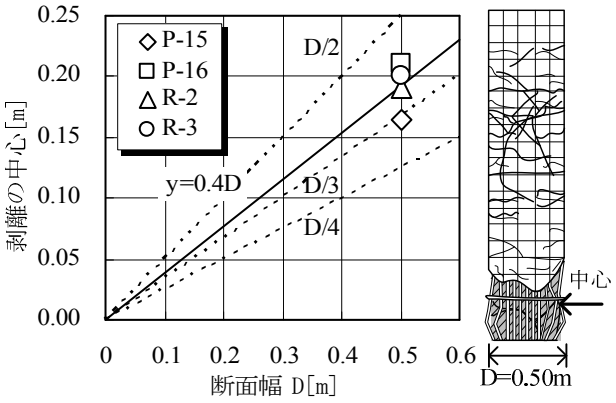



**図-5**　段落しを有する橋脚の基部損傷位置

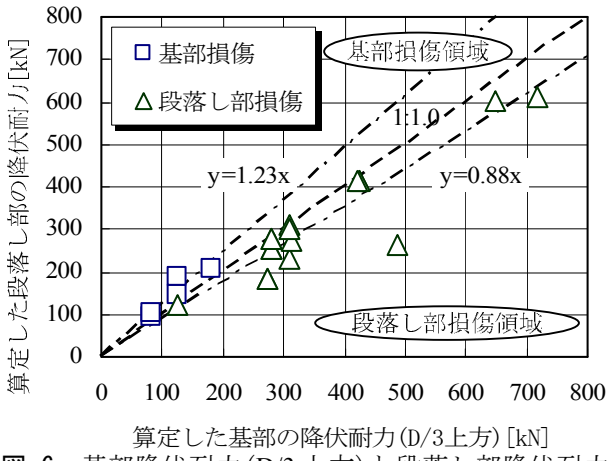



**図-6**　基部降伏耐力(D/3 上方)と段落し部降伏耐力

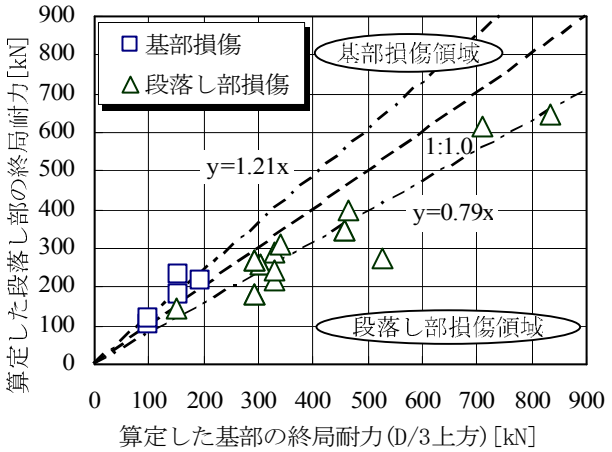



**図-7**　基部終局耐力(D/3 上方)と段落し部終局耐力

接合部ではなく，基部より0.4D程度上方であることが明らかとなった．そこで，本章では損傷位置に即したアーム長を定義し，耐力比による損傷形態の判定を行う．判定対象とする橋脚は，段落しを有する橋脚であることから，基部の耐力算定位置は基部よりD/3上方とする．また，段落し部の耐力算定位置はカットオフ点とする．判定式を(2)式に示す．

$$k = \frac{My'/a}{My/(H-D/3)} \qquad (2)$$

k＜1.0　段落し部損傷
k≧1.0　基部損傷
$M_y$`：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カットオフ点までの高さ(m)
H ：慣性力作用位置から基部までの高さ(m)
D ：橋脚断面幅(m)

降伏耐力における判定結果を**図-6** に示す．1:1.0を境界に損傷位置が分かれ，基部損傷と段落し損傷を明確に区分できることが分かる．耐力比の平均は基部損傷で 1.23，段落し部で 0.88 となりその差は 0.35 である．ついで，終局耐力についても同様の判定を行う．結果を**図-7** に示す．降伏耐力と同様に 1:1.0 を境界に基部損傷，段落し部損傷が判定できている．耐力比の平均は基部損傷で 1.21，段落し部で 0.79 となりその差は 0.42 である．耐力比の差は降伏耐力より広がっており，終局耐力を用いたほうが判定結果がより明確となる．

## ４．実橋脚の損傷分析

### (1) 対象橋脚

前章での実験供試体の分析結果を踏まえ実橋脚を分析する．ここでは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(以下，3号神戸線)の橋脚を対象に分析を行う．また，橋軸方向は上部工の形式などにより耐力評価が複雑となるため，本研究では橋軸直角方向に損傷した橋脚に着目する．

3 号神戸線の RC 橋脚の内，段落しを有する橋脚は 156 基である．供試体の分析と同様に曲げ損傷する橋脚を抽出する．**図-3** に示す定義にしたがって曲げ損傷と判断された橋脚は 46 基である．これらの橋脚について，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から損傷位置の区分を行う．以降はこの 46 基を対象に耐力比による考察を進める．

### (2) 損傷位置及び損傷度の区分

実橋脚の損傷状況を確認したところ，基部，段落し部の両方にひび割れが集中していたり，両方で被

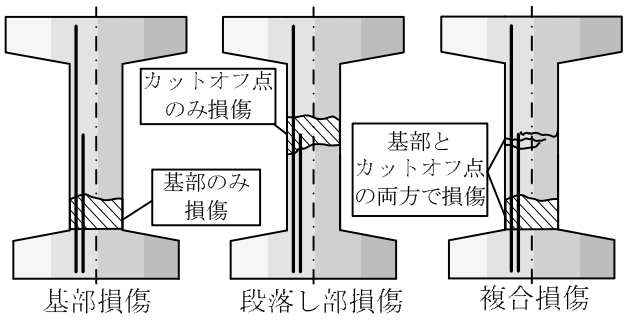



**図-8**　損傷位置の定義

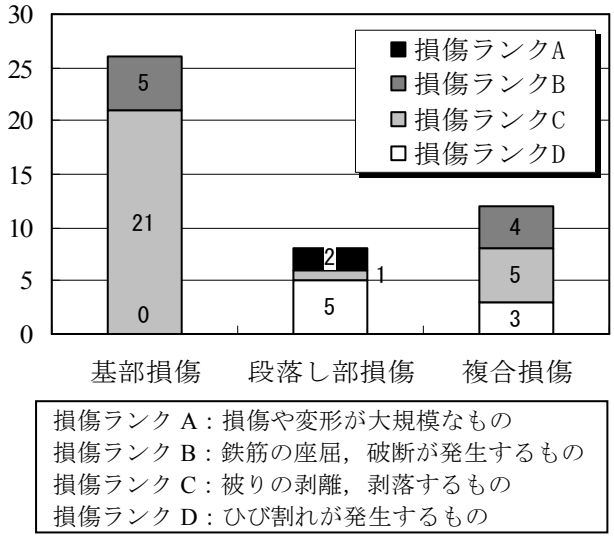



**図-9**　損傷位置で区分した橋脚基数

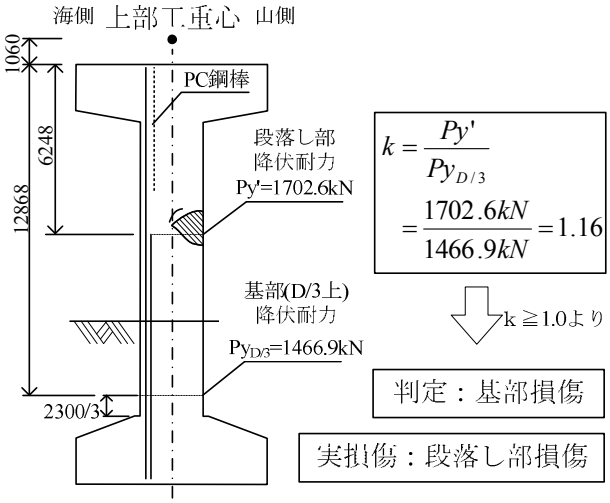



**図-10**　損傷状況と損傷位置判定例(神 P-660)

りが剥離している損傷が新たに確認された．

そこで，損傷位置の定義を**図-8**に示すように基部，段落し部，ともに損傷したものを複合損傷として3つに区分する．

**図-9**に損傷位置で区分した橋脚の基数を示す．損傷ランクAは損傷や変形が大規模なもの，損傷ランクBは主鉄筋が座屈，破断しているもの，損傷ラン

クCは被りが剥離，剥落しているもの，損傷ランクDはひび割れが発生するものとする．損傷位置の定義にしたがって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基となる．

基部損傷の橋脚は，8割が損傷ランクCであり被りの剥離，剥落を主とした損傷であることがわかる．段落し部損傷は損傷ランクDが半数を占めている．また基部損傷では確認されていない損傷ランクAが2基あり，段落し部で損傷する場合は軽微な損傷あるいは，大規模な損傷の両極端な結果となった．一方，複合損傷の橋脚は，損傷ランクB～Dまでがほぼ同じ基数が確認されている．

## ５．耐力比による考察

本章で分析した実橋脚に対して判定式(2)を用いて考察を行う．考察に用いる耐力比のアーム長は道路橋示方書に準拠し，橋軸直角方向は上部工重心からの距離とした．また，実橋脚の多くは終局に至る以前の損傷であることから降伏耐力を用いた．

**図-10**に判定例を示す．神P-660は，基部までのアーム長が13928mm，段落し部までのアーム長が7308mmである．基部からD/3上方の降伏耐力は1466.9kNであり，段落し部の降伏耐力は1702.6kNとなる．耐力比は1.16となり基部損傷の判定となるが，実損傷は段落し部で発生しており判定と一致していないことが分かる．

**図-11**に基部が損傷した橋脚26基の段落し部の降伏耐力，基部からD/3上方の位置での降伏耐力の関係を示す．供試体の判定と同様に全て耐力比1.0以上に分布しており，耐力比1.0により損傷位置が判定できている．なお，損傷ランクCで段落し部の降伏耐力が10000kNを超える橋脚が1基存在する．この橋梁は交差点部に位置する3径間連続橋の中央径間の橋脚である．他の橋脚は橋長20～30mの単純桁を支えているのに対し，中央径間長75mと側径間長45mの連続桁を支えている．その結果，橋脚断面が大きくなり，耐力も大きくなっている．**図-12**に降伏耐力比と段落し部の降伏耐力の関係を示す．耐力比は最小値が1.09，最大値が1.53である．また，平均耐力比は1.31であり，段落し部の耐力は基部の耐力に比べ0.3程度余裕があることがわかる．

次に橋脚の基部又は段落し部がどの程度の地震力に対して損傷するかを評価するため，等価水平震度を算定して考察を行う．**図-12**の凡例に損傷ランク毎の基部の等価水平震度の平均値を示す．損傷ランクBの平均値は0.26，損傷ランクCは0.27とほとんど差が生じていない．また，後述の損傷ランクA橋脚に比べると，等価水平震度は比較的大きい．

**図-13**に段落し部が損傷した橋脚8基の各降伏耐力を示す．段落し部で曲げ損傷する橋脚は，3基が耐力比1.0未満に分布し，5基が耐力比1.0以上に分布する．耐力比1.0では損傷位置は明確に区分ができて

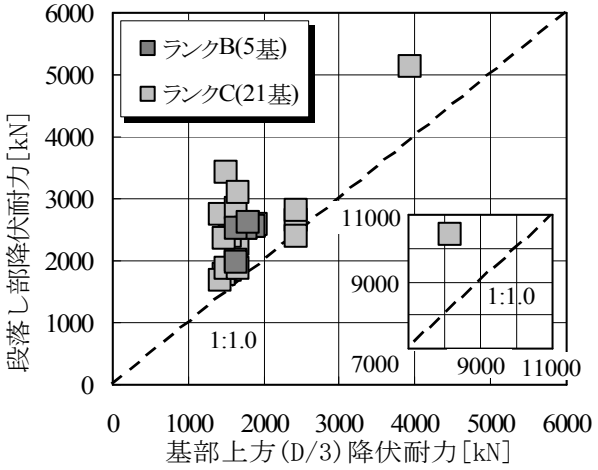



**図-11**　D/3 を用いた損傷位置判定(基部損傷)

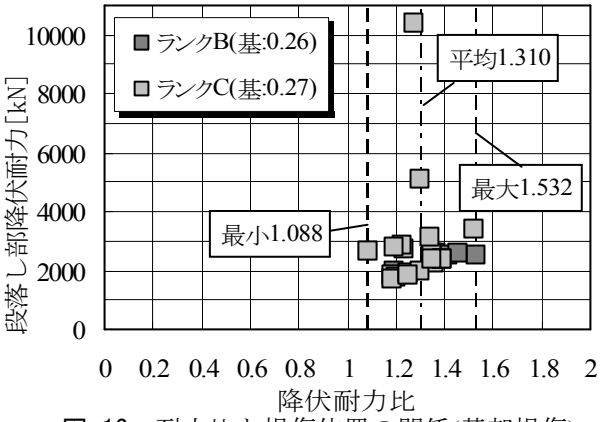



**図-12**　耐力比と損傷位置の関係(基部損傷)

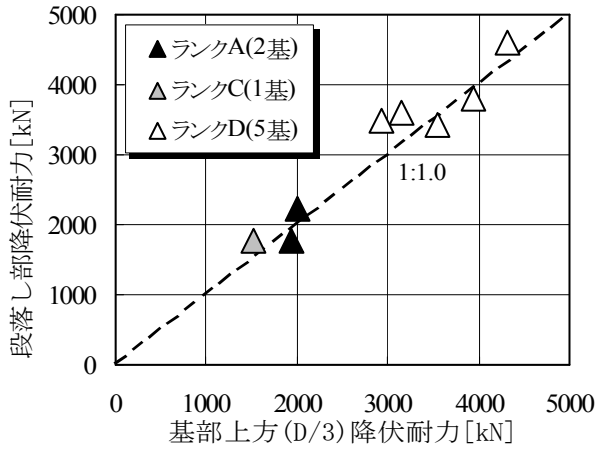



**図-13**　D/3 を用いた損傷位置判定(段落し部損傷)

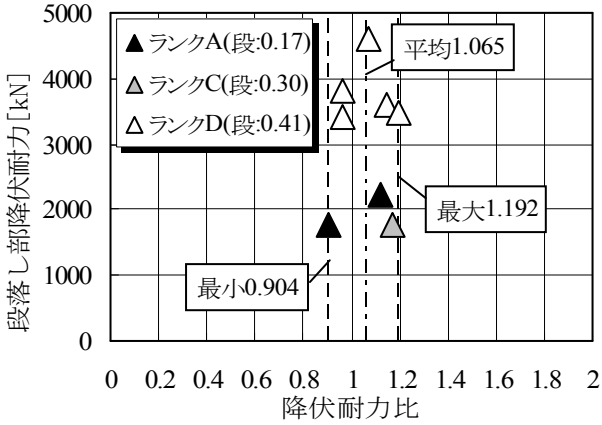



**図-14**　耐力比と損傷位置の関係(段落し部損傷)

いない．また，基部損傷に比べ段落し部の曲げ損傷する橋脚は全8基と少なく，そのうちの5基が損傷ランクDである．損傷ランクDは損傷の初期段階であり，終局時には曲げせん断損傷や複合損傷に発展する可能性がある．以上から，段落し部が曲げ損傷タイプで終局に至るケースは少ないことが分かる．

**図-14**に降伏耐力比と段落し部の降伏耐力の関係を示す．耐力比は最小値が0.90，最大値が1.19である．平均は1.07となり，基部の降伏耐力と段落し部の降伏耐力にほとんど差が無いことが分かる．ひび割れ程度の損傷に留まった損傷ランクDでは，段落し部の等価水平震度は平均で0.41となっている．一方，損傷ランクAでは，平均で0.17となっており明確な差が生じている．

**図-15**に複合損傷した橋脚12基の各降伏耐力を示す．複合損傷する橋脚は全て耐力比1.0以上に分布している．次に，**図-16**に降伏耐力比と段落し部の降伏耐力の関係を示す．耐力比は最小値が1.03，最大値が1.53である．平均は1.27となり，基部が損傷する橋脚より若干小さい．また，等価水平震度を比較するとランクBでは基部が0.26，段落し部が0.32，ランクCではそれぞれ0.26，0.28，ランクDでは0.33，0.36となり，基部と段落し部の等価水平震度の差が小さいため，両方で損傷が進展したと考えられる．

**図-17**に降伏耐力比と損傷位置の基数分布を示す．段落し部損傷は耐力比1.2以下にのみ分布しており，また耐力比1.10～1.20程度では三つの損傷位置が混在しており，損傷位置の遷移領域であると考えられる．

次に，耐力比1.0以上でも段落し部が損傷する要因を推定するため，複合損傷の損傷状況を考察する．

**図-18**に複合損傷の代表例として神P-697の損傷状況を示す．神P-697は橋脚の半分程度まで地中に埋まっている．損傷状況として基部では被りコンクリートが剥離しており損傷ランクCに該当する．段落し部では，最大ひび割れ幅0.2mmの水平ひび割れが集中しており損傷ランクDに該当する．基部から地表面の間にも水平ひび割れが連続して発生しており，ひび割れ幅は0.15mm程度である．橋脚の降伏耐力比は1.11であり基部の方が損傷しやすい．また，終局耐力比は1.03であり降伏以降は1.0という境界値に近づく．この状況から考察すると，基部の終局耐力が2720.7kNで，段落し部の降伏耐力は2172.4kNであることから，基部が終局に至る過程で段落し部が降伏に至ることになる．また，どちらが先に損傷するかは，以下の要因も影響すると考えられる．

1）土被り，地表面のコンクリート舗装

地盤抵抗は安全側の設計のために，橋脚に対する地盤や表面舗装の影響は考慮されない．しかしながら，固い地盤の場合は抵抗が大きく，損傷形態に影響を与える可能性がある．

2）地震動による逐次の応答特性

地震動の特性に従い，基部と段落し部の応答は逐次変化する．このような影響により曲げ耐力比も時刻的に変化するため，損傷形態が変化することが考えられる．

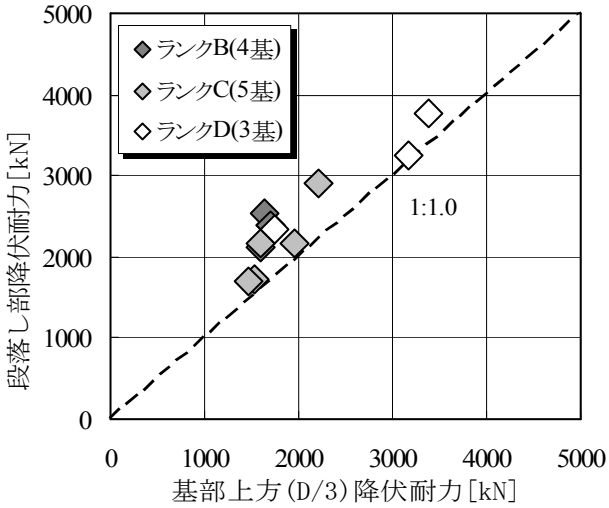



**図-15**　D/3 を用いた損傷位置判定(複合損傷)

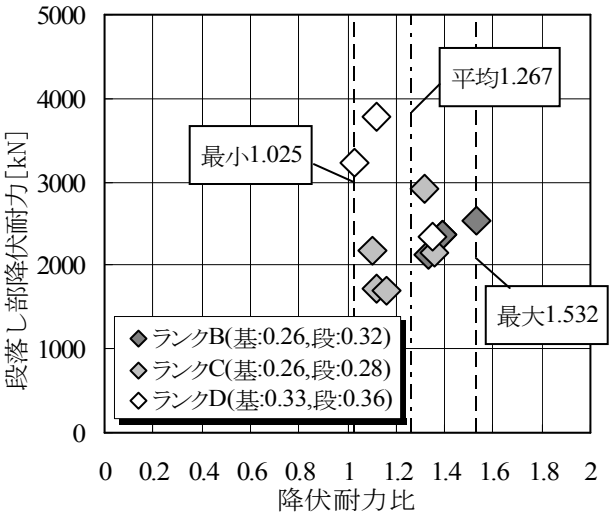



**図-16**　耐力比と損傷位置の関係(複合損傷)

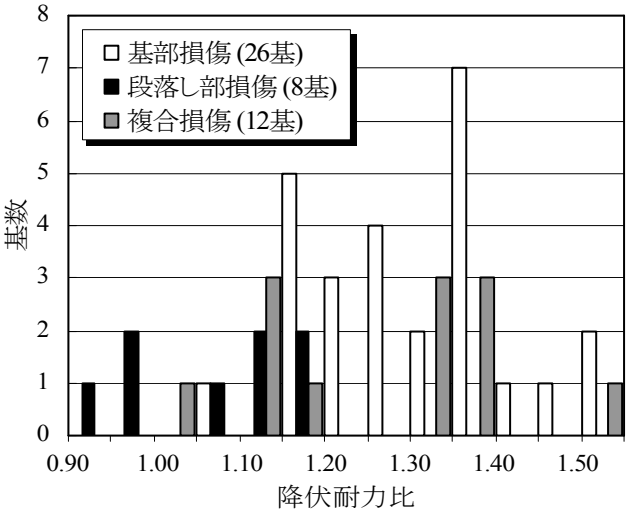



**図-17**　降伏耐力比と基数分布

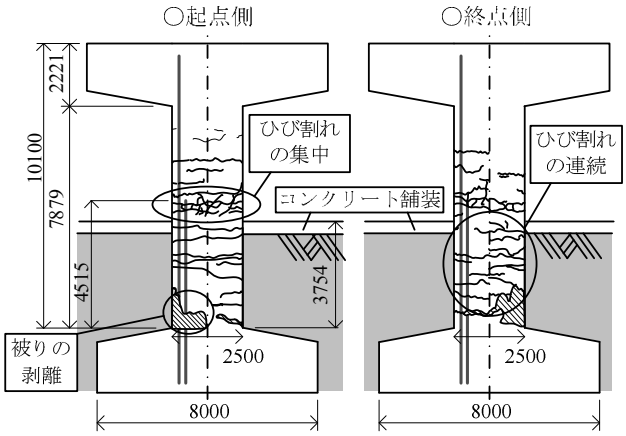
## ６．まとめ

本研究では，既往の段落し部実験結果を用いた分析と実橋脚の被害状況の分析を行い，耐力に着目した考察を行った．以下に得られた知見を記す．

1）実験供試体の損傷位置分析から段落しを有する橋脚で，段落し部損傷する場合は，カットオフ点を中心に損傷し，基部損傷する場合は，基部よりD/3上方で損傷することがわかった．次に，実損傷位置の耐力比により損傷位置を判定した結果，境界値1:1.0で明瞭に分別することができた．

2）供試体と同様に実橋脚の損傷位置を評価した．基部損傷は全て1.0以上に分布するが，段落し部損傷は最大1.19まで分布する結果となり，損傷位置は耐力比1.0では明確な区分とならなかった．

3）実橋で確認された，基部及び段落し部の両方で損傷する複合損傷橋脚は，耐力比1.0から1.5に分布し，また等価水平震度も損傷ランクAの0.17と比べても0.28～0.36と比較的高いことがわかった．また耐力比1.0から1.2は3つの損傷形態が存在しており，複数の損傷形態が混在する領域であると考えられる．




基部上方(D/3)耐力：1964.8kN(降伏)，2720.7kN(終局)
段落し部耐力：2172.4kN(降伏)，2803.6kN(終局)
耐　　力　　比：1.11(降伏)，1.03(終局)

**図−18**　神 P-697 の損傷状況(代表例)

### 参考文献


1) 幸左賢二，曽根英樹，中田恒和，田坂幹雄：詳細調査に基づく被災RC橋脚損傷度の定量的評価，土木学会論文集，No648/V-47，pp.179-190，2000.5
2) 既設道路橋の耐震補強に関する参考資料，日本道路協会，平成9年
3) 川島一彦，運上茂樹，飯田寛之：鉄筋コンクリート橋脚主鉄筋段落し部の耐震判定方法及び耐震補強に関する研究，土木研究所報告，第189号，pp.14-87，1993.9
4) 山本強，石橋忠良，大坪正行，小林晋爾：鉄筋を途中定着した橋脚の耐震性能に関する実験的研究，土木学会論文集，第348号/V-1，pp.61-70，1984.8
5) 大野晋也，坪井聡，山口隆裕，池田尚治：鉄筋コンクリート円断面橋脚の地震時挙動とその動的映像，コンクリート工学年次論文集，Vol.19，No.2，pp.447-452，1997.7
6) 佐々木智大，川島一彦，渡邊学歩，永田聖二：主鉄筋段落し部を有するRC橋脚の耐震性に関する模型載荷実験，第9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.415-422，2006.2
7) 佐々木智大，栗田裕樹，川島一彦，渡邊学歩，右近大道，梶原浩一：主鉄筋段落し部を有するRC橋脚の破壊モードに与える載荷地震動特性の影響，第10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.35-42，2007.2