

段落し部の脆弱性に関する分析

黒田雅裕¹・幸左賢二²・二井伸一³・西岡勉⁴

¹学生会員 九州工業大学 建設社会工学科（〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1）
²正会員 Ph.D. 九州工業大学教授 工学部建設社会工学科（〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1）
³正会員 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）
⁴正会員 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）

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)で判定されうることが明らかとなっている²⁾。

$$S = \frac{M_{Ty0} / h_t}{M_{By0} / h_B} \tag{1}$$

$S < 1.2$ 段落し部損傷

$S \geq 1.2$ 基部損傷

M_{Ty0} : 段落し部の初降伏モーメント(tf・m)

M_{By0} : 基部の初降伏モーメント(tf・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。

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はずであるが、多くの実験によると後述の図-7に示すように段落し中心点で発生しているものが多く、判定断面や安全係数1.2の物理的位置づけについてはやや不明瞭な点も存在する。

そこで、本研究では、過去実施された損傷形態に着目した実験結果を基に段落しおよび基部の損傷位

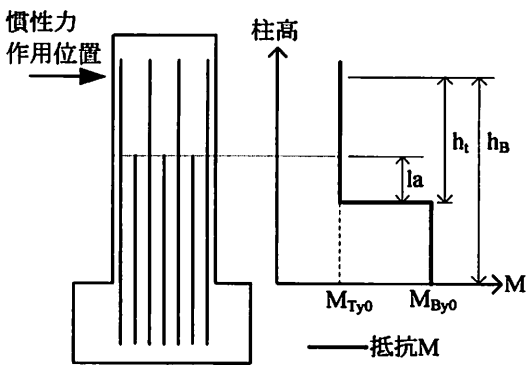


図-1 式(1)の模式図

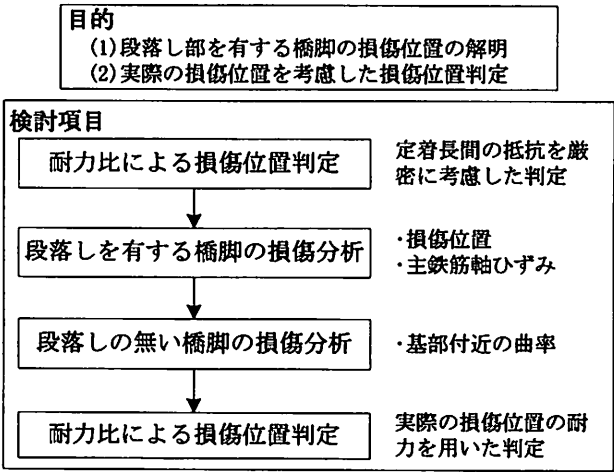


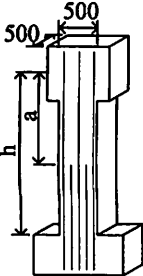
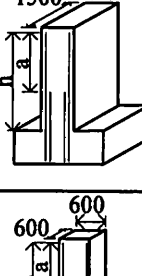
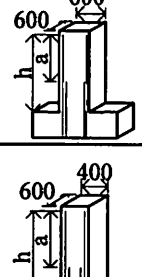
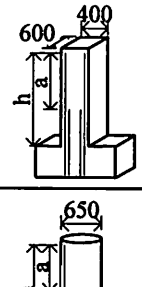
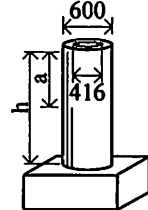
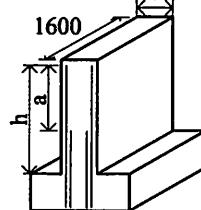
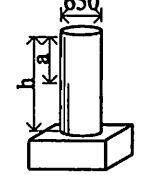
図-2 研究フロー

置、損傷形態に着目した分析を実施した。

2. 分析橋脚の抽出

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

表-1 供試体諸元

川島らの実験 ³⁾								山本らの実験 ⁴⁾															
供試体形状	供試体 No	橋脚高	アーム長	主鉄筋径	損傷位置※1	損傷形態※2	基数	供試体形状	供試体 No	橋脚高	アーム長	主鉄筋径	損傷位置	損傷形態	基数								
		h	a							h	a												
		mm	mm							mm	mm												
	P	2500	1400	D13	段	曲	1		I	2000	1500	D13	段	曲	2								
			1150	D13	基	曲	1				1130	D13	段	曲	3								
			900	D13	基	曲	1			1000	500	D13	段	曲	2								
	R	4600	2800	D13	段	曲せ	1			1500	1000	D13	段	曲	1								
			2550	D13	基	曲	1				1130	D13	段	曲	2								
			2300	D13	基	曲	1				750	D13	段	曲	2								
		2600	1700	D10	段	せ	1			1300	800	D16	段	曲	1								
					曲せ	1						せ	1										
		1600		D10	段	曲せ	1					D13	段	曲	1								
				D10	段	曲せ	1						せ	1									
①		2600	1570	D13	段	曲せ	1		II	950	530	D16	段	曲	1								
②		2600	1800	D10	段	曲せ	1			1550	880	D22	段	割裂	1								
①R-4				②R-15														D19	段	曲	1		
																		D13	段	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

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。载荷方法はいずれも正負交番载荷である。

川島らの実験では、耐力比による損傷位置の変化を調べるため段落し高さをパラメータとした 6 基、段落し部の強度の変化を調べるため軸力、主鉄筋比をパラメータとした 4 基、損傷形態の変化を調べるため供試体形状をパラメータとした 2 基の全 12 基の载荷を行っている。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、耐力比による損傷位置の変化を調べるため段落し高さをパラメータとした 12 基、段落し部の強度の変化を調べるため主鉄筋比をパラメータとした 9 基、損傷形態の変化と段落し部の強度を調べるため供試体形状と軸力をパラメータ

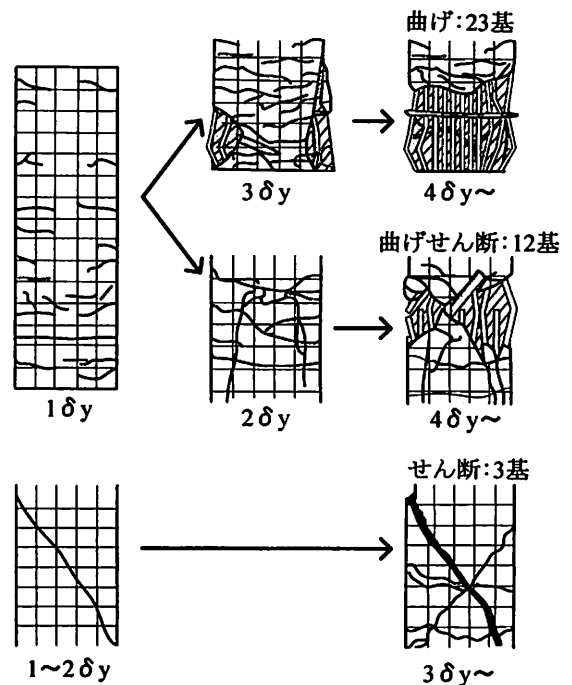


図-3 損傷形態の定義

とした 6 基の全 27 基の載荷を行っている。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。

ここでは、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。区分内容を図-3 を用いて説明する。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する。同様に $1\delta_y$ で水平ひび割れが生じ $2\delta_y$ 以降で斜めひび割れが生じ、それが進展して被りが×型に剥離するものを曲げせん断損傷と定義する。

また $1\sim 2\delta_y$ で斜めひび割れのみが生じそのまま破壊に至るものをせん断損傷と定義する。

このうち、本研究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。次章以降の損傷位置判定は、この 23 基を対象としている。

3. 実挙動を考慮した損傷位置判定

図-3 に作用、抵抗力モーメント図を示す。式(1)によると段落し部の耐力は l_a だけ下げた点 C でのモーメントで算定している。これは、BC 間でその付着抵抗を考慮しないことに対応している。しかしながら、点 B で付着力が 0 となり点 C で 100% の付着抵抗を発揮することから付着応力を考慮したモーメントは BD を結ぶ曲線あるいは直線形状になると考えられる。図に示すように BD 曲線と AE 直線は、例えば BD 間を直線とすると一般の柱高では交わる可能性が極めて低いことから、段落し部の耐力算定にあたっては定着長を考慮する必要がないと、ここでは仮定する。

また、モーメント算出では、コンクリートの応力-ひずみ関係はコンクリート標準示方書に準拠し、鉄筋の材料構成則は降伏後に弾性係数を初期の $1/100$ の二次勾配として有するバイリニアの曲線を用いた。なお、材料物性値は試験体の材料試験結果を用いている。このように損傷位置を実挙動に則した状態で考えた場合、耐力比(段落し部耐力/基部耐力)が $1:1.0$ 未満の場合は段落し部で損傷、耐力比が $1:1.0$ 以上の場合は基部での損傷となる。

図-4 に以上の条件で算定した基部と段落し部の降伏耐力関係を示す。プロットの結果、想定通り基部損傷は耐力比 $1:1.0$ 以上に分布している。一方段落し部損傷は耐力比 $1:1.0$ 以上にも分布し、10 基については 1.0 を超えるにも関わらず段落し部損傷となっている。

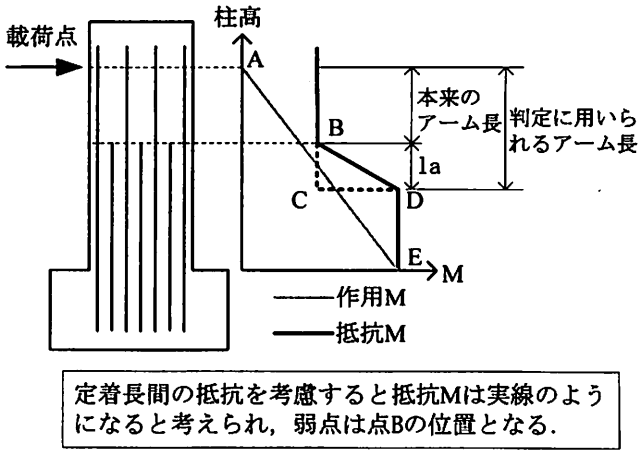


図-4 作用、抵抗力モーメント図

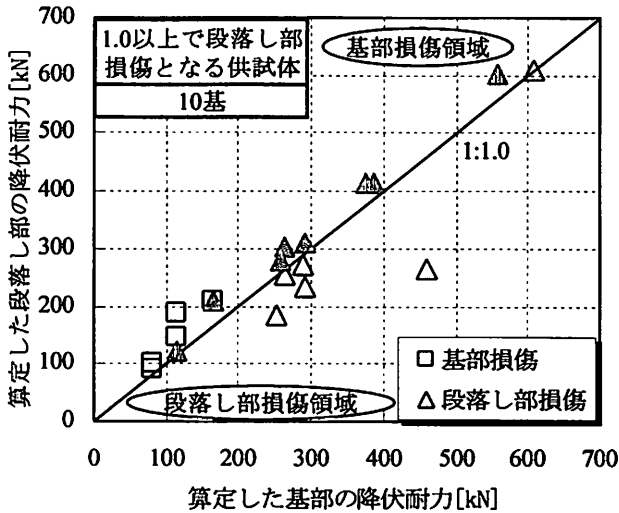


図-5 実挙動を考慮した各降伏曲げ耐力

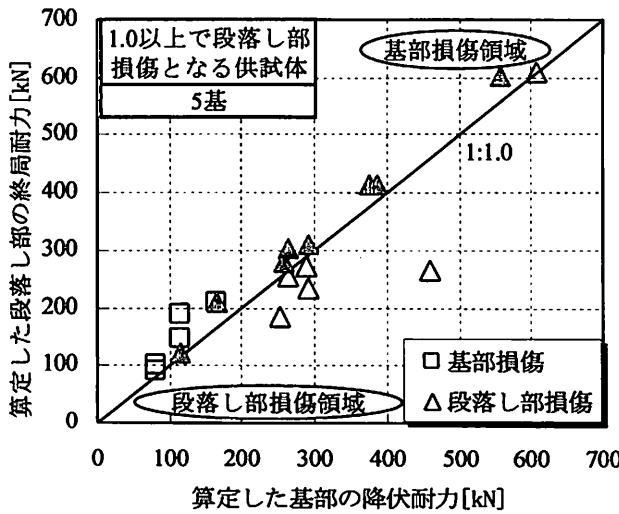


図-6 基部終局耐力と段落し部終局耐力

ここで、前章で定義した損傷形態のうち曲げ損傷は、 $4\delta_y$ 以降の損傷状況で判断している。そこで、大変形状態に対応する終局耐力による判定を行う。図-6 に基部と段落し部の終局耐力を示す。耐力の算定方法は降伏耐力の場合と同様である。プロットの結果、段落し部損傷は、耐力比 1:1.0 以上で 5 基確認されている。

以上、段落しおよび基部損傷に着目し、算定した曲げ耐力比に基づいて損傷位置を分析した結果、1.0 以下では全て段落し部損傷となったが、1.0 を超えるものは全てが基部損傷とはならず、5 基については段落し部損傷となるものが認められることから、以下により詳細な分析を実施する。

4. 損傷位置の分析

(1) 段落しを有する橋脚

本章では、損傷位置に着目した分析を行う。具体的には、基部および段落し部損傷では、同一作用力に対して、段落し部の耐力は载荷点からカットオフ点の距離をアーム長とし、基部の耐力は载荷点から柱と底版の接合部の距離をアーム長として評価している。そこで、ここでは、実損傷の位置を検証し、アーム長の設定方法の妥当性を検証する。

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。

図-7 に、川島の P シリーズ (アーム長 1400mm) 試験体における終局時の損傷状況と $1\delta_y$ 、 $2\delta_y$ 载荷時の主鉄筋軸方向ひずみ値の結果を示す。本橋脚の場合、カットオフ点は橋脚基部より 1.1m の位置にある。コンクリートの剥離部分の中心位置は、橋脚基部より 1.05m の位置であり、損傷中心位置はカットオフ点の位置にほぼ合致する。また、主鉄筋軸ひずみ値においても、カットオフ点の位置が最大となっており、段落し部はカットオフ点を中心に損傷すると判断できる。同様に図-8 に山本らの II シリーズ試験体の終局状態を示す。コンクリートの剥離部分の中心位置は、橋脚基部より 46cm の位置であり、損傷中心位置はカットオフ点の位置 (50cm) にほぼ合致する。以上のことから、損傷中心位置は、曲げ損傷タイプにおいては定着長 l_a だけ下がった位置ではなく、カットオフ位置であると考えられる。

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-9 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

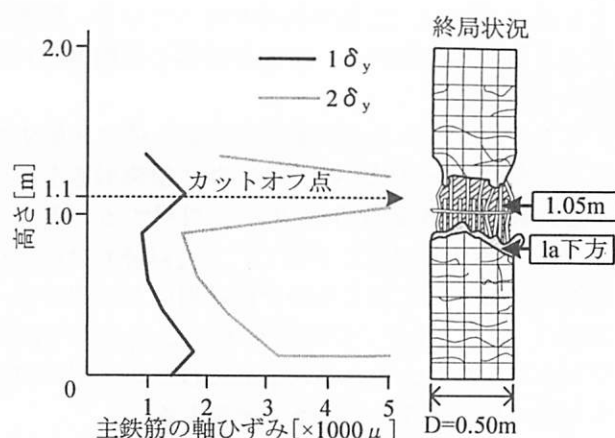


図-7 段落しを有する橋脚の主鉄筋ひずみ分布 (一例)

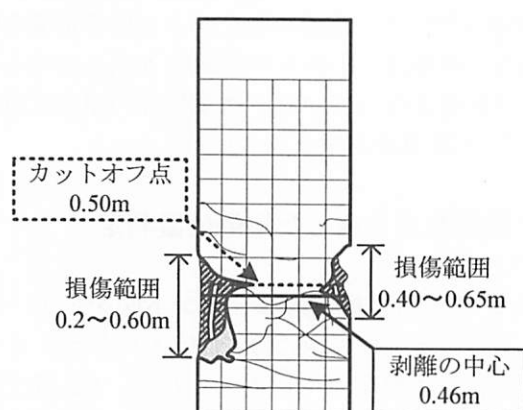


図-8 段落しを有する橋脚のカットオフ点と剥離の中心

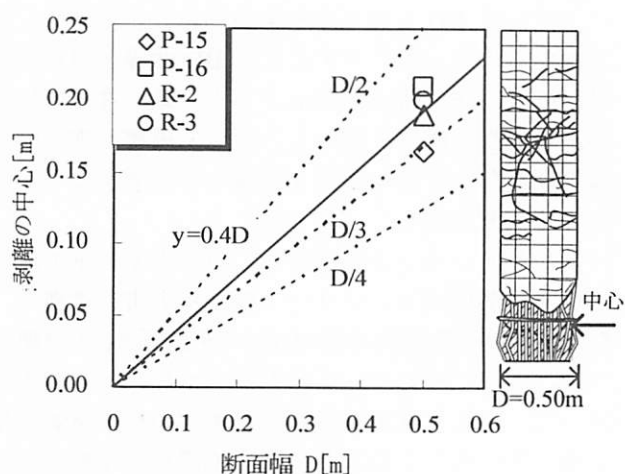


図-9 段落しを有する橋脚の基部損傷位置

0.4D となる。

(2) 段落しの無い橋脚

ここでは、基部損傷で、曲率が計測されている運上らの実験結果を元に、基部損傷タイプの段落し無

し橋脚の損傷中心位置を検証する^{6),7)}。検証方法は先にも述べた通り曲率が最大となる位置に着目する。

結果を図-10に示す。結果によれば1橋脚を除き、曲率の最大位置はD/5からD/2に分布するが、平均値は0.2Dとなる。段落しを有する橋脚に比べ、損傷中心位置に大きな差異が認められるが、基部損傷では、曲率分布からも柱と底版の接合部を中心とするのではなく、0.2D程度上方部分を中心に損傷することが分かる。

5. 損傷状態を考慮した損傷位置の判定

前章の分析結果より、基部の損傷中心は、柱と底版の接合部ではなく、基部より0.2から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、再度、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。

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

$k < 1.0$ 段落し部損傷

$k \geq 1.0$ 基部損傷

My' : 段落し部の初降伏モーメント(kN・m)

My : 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)

基部の耐力については、アーム長がD/3分小さくなるため、図-5、図-6で算定した耐力に比べ値が大きくなる。一方、段落し部の耐力は値の変化は無い。

降伏耐力における判定結果を図-11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。ついで、終局耐力についても同様の判定を行う。結果を図-12に示す。両図を比べると、値の移動が多少見られるが、1:1.0の境界に対する損傷形態では明確な違いがみられず、耐力値は変わるものの、耐力比の差異は小さいことが分かる。

次に、計算上の終局耐力と実験の最大荷重に着目して分析する。まず、基部損傷する供試体について

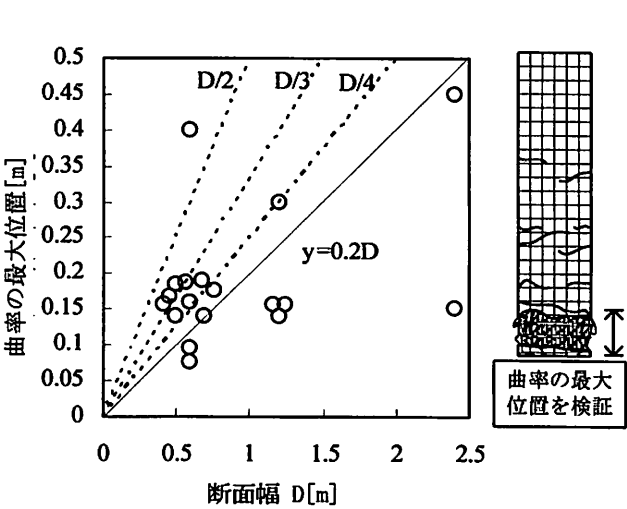


図-10 段落しの無い橋脚の曲率最大位置

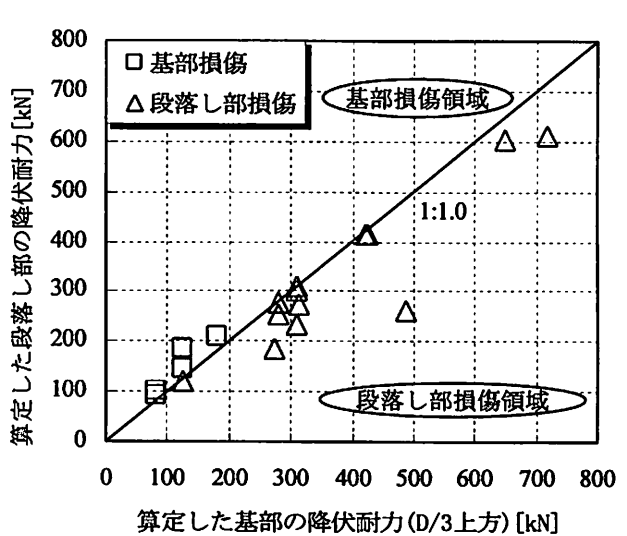


図-11 基部降伏耐力(D/3上方)と段落し部降伏耐力

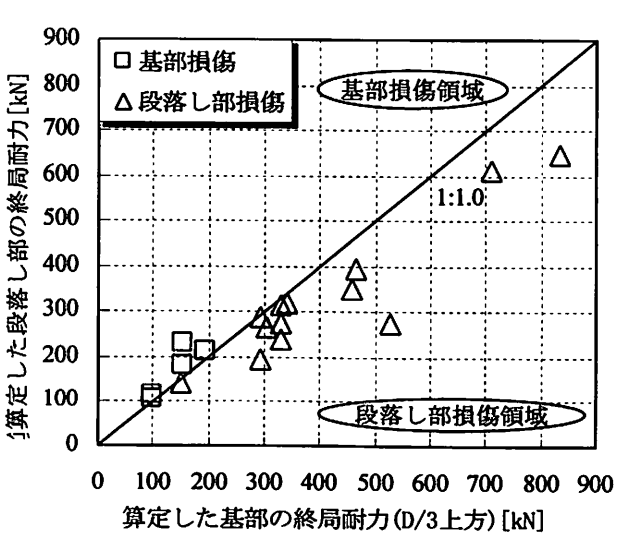


図-12 基部終局耐力(D/3上方)と段落し部終局耐力

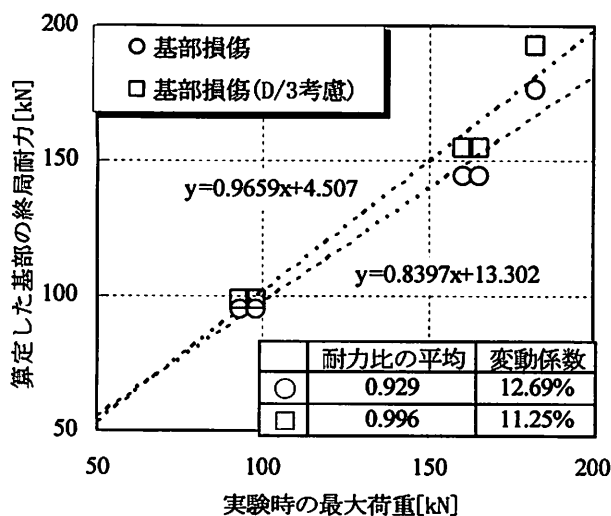


図-13 実験終局荷重と計算終局耐力

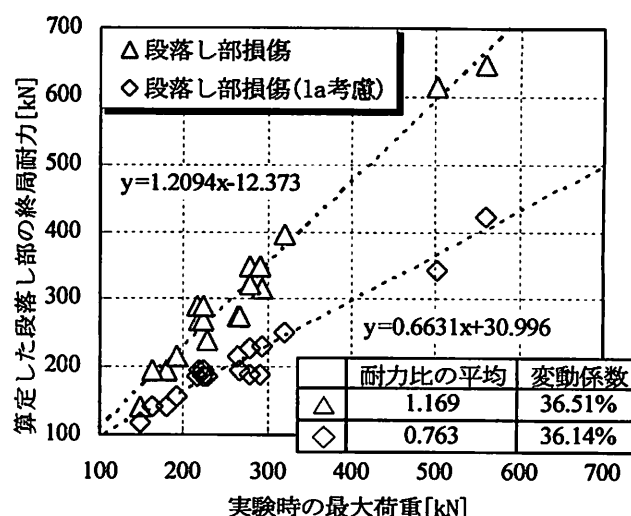


図-14 実験最大荷重と計算終局耐力

整理する。比較を行うため、算定する耐力は、柱と底版の接合点をアーム長とする耐力と D/3 上方の損傷位置と考慮した耐力をプロットする。結果を図-13 に示す。耐力比の平均及び変動係数は、前述のものが 0.929 及び 12.69%、後述のものが 0.996 及び 11.25%と、後述の D/3 上方を考慮した耐力の方は最大荷重と非常に相関性が高い結果となる。同様に、段落し部についても整理を行う。段落し部の耐力評価に用いるアーム長は、カットオフ点で考慮したものと、既往の損傷位置判定で使用する 1a を考慮したものの比較を行う。結果を図-14 に示す。耐力比の平均及び変動係数は、前者が 1.169 及び 36.51%で、後者が 0.763 及び 36.14%となり、カットオフ点をアーム長とする耐力の方が最大荷重との相関性が高いことが分かる。

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を行い、現行の損傷位置の判定式の提案を行った。以下に得られた知見を記す。

- 1) 定着長の抵抗を考慮して、段落し部はカットオフ点、基部は柱と底版の接合点の耐力を求め、その耐力比により損傷位置を判定した結果、境界値 1:1.0 では十分には損傷形態を分別することができなかった。
- 2) 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すること、また基部損傷する場合は、基部より D/3 上方で損傷することを明らかにした。また、実損傷位置による耐力比による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。

- 3) 最大荷重と実損傷位置の耐力を比較検証した結果、基部損傷の場合はD/3上方を考慮した耐力との相関性が高く、段落し部損傷の場合はカットオフ点での耐力の方が相関性が高く、提案した判定式は実際の作用する最大荷重を比較的精度よく評価できた。

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，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) 池端信哉，足立幸朗，山口隆裕，池田尚治：準動的載荷によるRC橋脚の地震被災挙動に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.3，pp.1255-1260，2001.7
- 6) 星隈順一，長屋和宏，運上茂樹：鉄筋コンクリート橋脚の塑性曲率分布と塑性ヒンジ長，構造工学論集 Vol.46A，pp.1461-1468，2000.3
- 7) 星隈順一，運上茂樹，長屋和宏：鉄筋コンクリート橋脚の変形性能に及ぼす断面寸法の影響に関する研究，土木学会論文集No.669/V-50，pp.215-232，2001.2