

巻立て補強された鉄筋コンクリート橋脚の 限界状態に関する調査分析

石崎 寛史¹・宮田 秀太¹・澤田 守²・大住 道生³

¹正会員 修(工) (国研)土木研究所 構造物メンテナンス研究センター 交流研究員
(〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

²正会員 修(工) (国研)土木研究所 構造物メンテナンス研究センター 主任研究員(同上)

³正会員 修(工) (国研)土木研究所 構造物メンテナンス研究センター 上席研究員(同上)

1. はじめに

橋の設計基準である道路橋示方書V耐震設計編¹⁾（以下、道示V）では、曲げ破壊型の鉄筋コンクリート橋脚（以下、RC橋脚）に対する塑性変形能の評価として、正負交番繰返し載荷実験に基づき限界状態を設定したうえで、損傷の進展メカニズムのうち軸方向鉄筋のはらみ出し現象に着目した塑性ヒンジ長を推定^{2),3)}し、軸方向鉄筋の引張ひずみを指標の一つとして算出する限界状態に相当する変位の推定する手法⁴⁾が用いられている。これらは、実験との重回帰分析により得られた回帰式を用いることで、より合理的な設計を可能とし、従来の方法と比較して推定手法の精度向上が図られている⁴⁾。

この推定手法は、配筋条件及び構造細目、軸力等に対して、実験で確認された範囲を前提とした、適用の範囲が設けられており、適用範囲を満たしたうえで設計が可能な、新設RC橋脚を対象に用いられている。また、前提となる構造が異なる巻立て補強されたRC橋脚（以下、補強橋脚）では、新設RC橋脚と同様の推定手法を、そのまま用いることはできない⁵⁾。そこで、補強橋脚に対しても、損傷の進展メカニズムを考慮した限界状態を適切に評価し、限界状態に相当する変位の推定手法を提案することで、推定精度の高い合理的な設計法を構築していく必要がある。

RC橋脚では、正負交番繰返し載荷実験に基づく限界状態を、エネルギー吸収が安定して期待できる状態や水平耐力を保持できる状態等の観点に基づき、それを分析するための具体的な指標を示したうえで設定されている⁴⁾。一方、補強橋脚に対して同様

の観点にて限界状態を整理した事例はない。そのため、補強橋脚に対する限界状態設計法を構築するためには、実験結果の分析整理を行うことで、限界状態に相当する変位を抽出する必要がある。

そこで本稿では、補強橋脚に対する限界状態評価に向けた検討⁶⁾の基礎資料とすることを目的として、過去に行われた補強橋脚の実験^{7)~11)}を調査整理し、新設RC橋脚と同様の観点で限界状態の整理分析を行った結果と、それらの各限界状態に相当する変位の抽出結果を報告する。

2. RC橋脚の限界状態と補強橋脚への適用

図-1は、曲げ破壊型のRC橋脚における水平力－水平変位関係と限界状態の定義を示したものであり、図には、文献⁴⁾で提案された設定方法と、従来の設定方法を比較して示している。なお、文献⁴⁾では、「耐震性能2又は耐震性能3の限界状態」として記載されているが、道示V¹⁾より、橋の性能の観点や部材の限界状態が再整理されたことから、本稿では「限界状態2又は限界状態3」と統一した標記として読み替えて記載している。

図-1 (a) に示す限界状態は、RC橋脚が地震の影響により繰返し作用を受けたとき、ある段階で軸方向鉄筋が降伏し、さらに水平変位が大きくなると、かぶりコンクリートの剥落や軸方向鉄筋のはらみ出しが進展して、その後、水平耐力が低下するといった損傷の進展メカニズムを考慮して決定されたものである。

限界状態1とは、RC橋脚の挙動が可逆性を有する限界の状態である。限界状態2は、水平耐力の低下

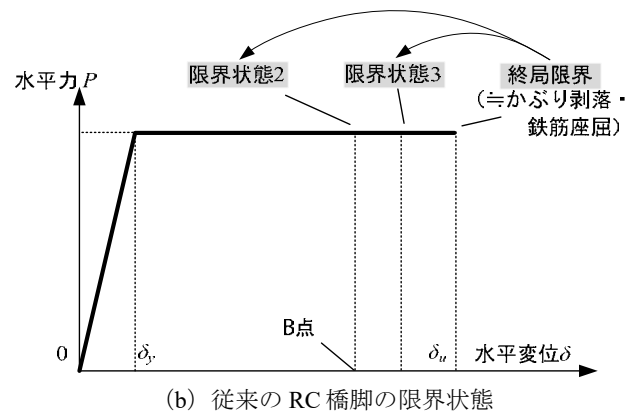
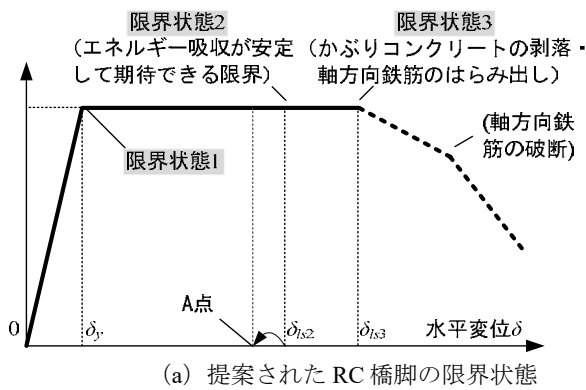


図-1 RC橋脚の限界状態の定義（文献⁴⁾を基に一部加筆）

表-1 正負交番載荷実験に基づく限界状態とみなす点

限界状態 2	3回目の載荷における水平耐力が1回目の載荷における水平耐力の85%程度を下回らず、かつ、3回目の載荷における吸収エネルギーが2回目の載荷における吸収エネルギーの90%程度以内となる状態
限界状態 3	実験から得られる水平力-水平変位関係において、水平力が地震時保有耐力を保持できなくなった状態

がほとんどなくエネルギー吸収が安定して期待できる限界の状態であり、残留変位が大きくなければ、地震発生後に速やかな機能回復が可能である。限界状態3は、橋脚の水平耐力を保持できる限界の状態であり、余震に対しても耐力を喪失する可能性がある。表-1には、正負交番載荷実験に基づく限界状態とみなす点を示す。限界状態2では、エネルギー吸収が安定した状態を定量的な指標により判定できるように示されている⁴⁾。

図-1 (b) に示す限界状態は、限界状態2は損傷の修復を容易に行い得る限界の状態、限界状態3は橋脚の水平耐力が大きく低下し始める状態として、前述の図-1 (a) における限界状態の観点と大きな差は生じていない。一方、限界状態2における水平変位の制限値の具体的な評価手法としては、図-1 (a) では、限界状態2に対して、安全係数を考慮して決定された点（A点）であるのに対して、図-1 (b) では終局限界に相当する点から安全係数1.5によって割り戻された点（B点）として与えられているため、限界状態変位とRC橋脚の損傷の状態又は抵抗特性の関係が明確ではない⁴⁾とされている。

補強橋脚に対しては、図-1 (b) の方法により限界状態の評価が行われている⁵⁾ことから、新設RC橋脚と同様の方法にて限界状態を評価することで、普遍的な性能評価手法とする必要がある。

3. 対象実験の概要及び供試体の諸元

本研究では、図-2に示すような正負交番載荷実験を調査の対象とした。正負交番載荷実験は、かぶりコンクリートのひびわれや軸方向鉄筋の降伏の状態を観測するための予備載荷と、降伏変位 δ_y を基準とし、その整数倍した値を載荷ステップ ($n \times \delta_y$) として、変位制御により載荷する本載荷が行われている。その中で、図-3に示す各載荷ステップにお

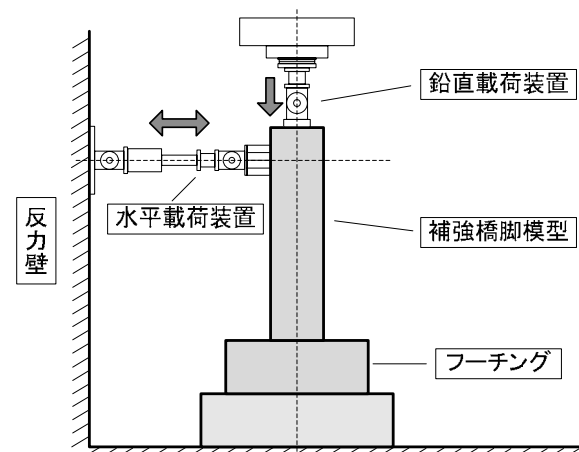


図-2 対象とした実験の概念図

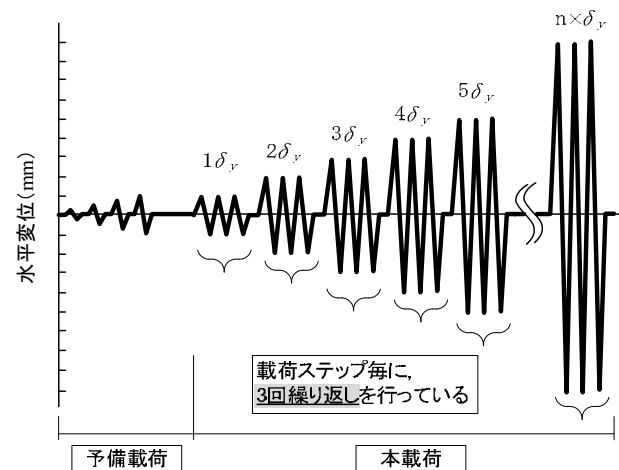


図-3 載荷ステップ・繰り返し回数の概念図

表-2 対象供試体の諸元

補強 工法 分類	供試 体 No.	断面 形状	断面 寸法 (mm)	載荷 高さ (mm)	軸方向 鉄筋比 (%)	帯鉄筋 体積比 (%)	軸方向鉄筋			帯鉄筋				補強鉄筋			参考 文献
							径	かぶり (mm)	降伏点 (N/mm ²)	径	間隔 (mm)	降伏点 (N/mm ²)	有効長 (mm)	径	かぶり (mm)	降伏点 (N/mm ²)	
鋼板 巻立	1	円形	560	2550	1.44	0.20	D13	50	354.0	D6	141	361.5	460	M12	---	335.9	7)
	2	矩形	600×600	3010	1.59	0.13	D10	40	377.6	D6	200	361.5	480	M12	---	335.9	7)
	3	矩形	2400×2400	9600	1.20	0.17	D35	102	424.0	D19	300	344.0	2196	D32	---	383.0	8)
	4	矩形	600×600	2400	1.20	0.23	D10	30	395.0	D6	100	389.0	540	M12	---	388.0	8)
RC 巻立	5	矩形	2140×660	2270	0.65	0.63	D13	40	380.5	D13	200	380.5	400	D13	80	380.5	9)
	6	矩形	1950×750	2400	0.37	0.14	D10	40	398.6	D6	50	439.9	1870	D13	40	533.9	10)
炭素 繊維 巻立	7	矩形	700×700	2100	1.95	0.17	D16	40	362.9	D6	120	331.4	620	---	---	---	11)
	8	円形	700	2100	1.19	0.17	D13	40	367.4	D6	120	331.4	620	---	---	---	11)

る繰り返し回数が3回のものを対象とした。これは、RC橋脚の検討において、吸収エネルギーの比較から、繰り返し回数を3回とする載荷パターンは、繰り返し回数の多いタイプⅠ地震動に対する応答に概ね相当しているため⁴⁾とされており、本研究もこれに準じた。

表-2に、対象とした供試体諸元を示す。対象供試体は、過去に行われた実験^{7)~11)}を調査整理したものである。図-4に、補強橋脚の概要図を示す。対象供試体は、鋼板巻立て、鉄筋コンクリート巻立て（以下、RC巻立て）、炭素繊維巻立てとして、代表的な補強橋脚に対する検討を行えるようにした。また、断面形状は、円形断面及び壁式橋脚を含む矩形断面として、形状による違いを検討を行えるようにした。鋼板巻立ては、曲げ耐力制御式鋼板巻立てとした。これは、鋼板巻立ての効果に加えて、柱基部にH形鋼等を設置し、これにアンカー筋を設置することで、橋脚柱部からの荷重をフーチングに伝達する構造である。No.3供試体は、実物大供試体として、寸法効果による影響が確認できる供試体を選定した。No.6供試体は、既設部材への影響低減を目的として、フーチングへの鉄筋定着量を減らすために、補強鉄筋に高強度鉄筋（SD490）が用いられている。

4. 実験結果の分析整理

(1) 結果の整理方法

対象供試体の実験結果を表-1に示す限界状態とみなす点に従い整理した。限界状態2は、繰り返し載荷回数3回のうち、1回目の水平耐力に対する3回目の水平耐力の比率（以下、耐力比）が85%を下回らず、かつ、2回目の吸収エネルギーに対する3回目の

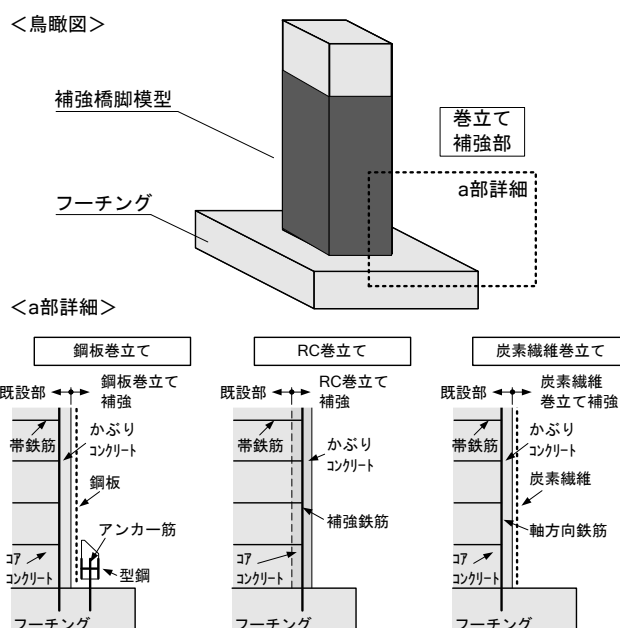


図-4 対象供試体の概要

吸収エネルギーの比率（以下、吸収エネルギー比）が90%以内となる、これら2つの指標を満たす最大の載荷ステップとみなした。限界状態3は、実験における水平力-水平変位関係において水平力が地震時保有水平耐力を保持している状態とした。これは、着目する一つ後の載荷ステップにおいて、耐力の低下が見られた場合、その着目する載荷ステップを限界状態3とみなした。なお、文献⁴⁾に倣い、耐力比及び吸収エネルギー比の指標を満足している場合でも、最大水平耐力の低下により限界状態3となる場合は、その載荷ステップを限界状態3、 $1\delta_y$ 前を限界状態2とみなした。

図-9及び図-14、図-15に、前述した観点をを用いて実験の分析整理を行った結果を示す。結果は、対象供試体の水平力-水平変位関係、耐力比、吸収エネ

ルギー比を示している．なお，実験結果はフーチングからの軸方向鉄筋の伸び出しに伴う回転変位を含んでいる．

水平力-水平変位関係は，横軸を供試体の天端変位として，縦軸を水平荷重としている．なお，変位の目盛間隔は，降伏変位の整数倍 ($n \times \delta_y$) として作図している．図中には，整理を行った各限界状態，鉄筋破断等の点をプロットしている．耐力比又は吸収エネルギー比は，横軸に载荷ステップ，縦軸に耐力比又は吸収エネルギー比としている．あわせて，前述の限界状態2の設定指標を灰色ハッチングで示している．つまり，灰色ハッチング内に耐力比及び吸収エネルギー比が位置している場合は，指標を満足していることとなる．ただし，吸収エネルギー比については，降伏直後では履歴ループが安定しないことから，図中では「○」として表示し，限界状態の判定から除外した．

(2) 鋼板巻立て

図-5から図-8に損傷図及び損傷写真を示す．

No.1供試体は， $6\delta_y$ にて耐力低下が確認できるため， $5\delta_y$ を限界状態3とみなした(図-9(a))．耐力比及び吸収エネルギー比は，限界状態3とみなした $5\delta_y$ においても指標を満たしていることから， $1\delta_y$ 前の $4\delta_y$ を限界状態2とみなした．なお，水平耐力の低下は，図-5より，アンカー筋の破断に起因したものである．

No.2供試体は， $7\delta_y$ にて耐力低下が確認できるため， $6\delta_y$ を限界状態3とみなした(図-9(b))．耐力比及び吸収エネルギー比は，限界状態3とみなした $6\delta_y$ においても指標を満たしていることから， $1\delta_y$ 前の $5\delta_y$ を限界状態2とみなした．水平耐力の低下は，No.1供試体と同様に，図-6より，アンカー筋の破断に起因したものである．

No.3供試体は， $7\delta_y$ にて耐力低下が確認できるため， $6\delta_y$ を限界状態3とみなした(図-9(c))． $6\delta_y$ において吸収エネルギー比が指標を満たさないことから，指標を満たす最大の载荷ステップである $5\delta_y$ を限界状態2とみなした．図-7より，水平耐力が低下した $7\delta_y$ において，アンカー筋の破断が確認できる．

No.4供試体は， $10\delta_y$ にて耐力低下が確認されたため， $9\delta_y$ を限界状態3とみなした(図-9(d))． $9\delta_y$ において吸収エネルギー比が指標を満たさないことから，指標を満たす最大の载荷ステップである $8\delta_y$ を限界状態2とみなした．なお，図-8より， $9\delta_y$ 時にはらみ出しが顕著に見られている．これは， $8\delta_y$ から生じたものである⁸⁾．

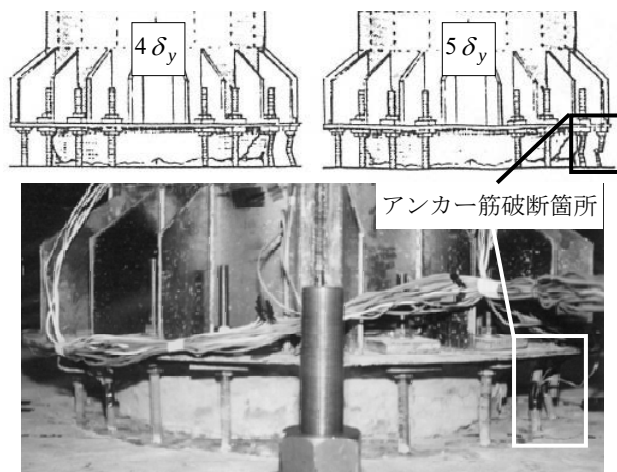


図-5 No.1 供試体の損傷図，損傷写真 ($5\delta_y$)

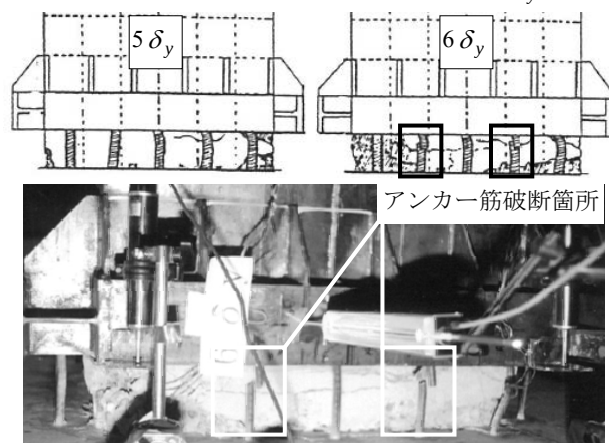


図-6 No.2 供試体の損傷図，損傷写真 ($6\delta_y$)

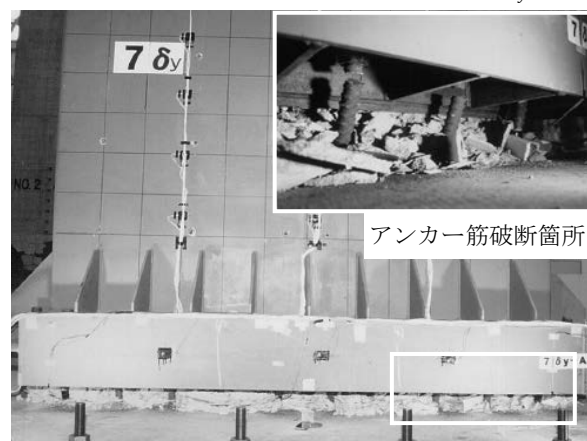


図-7 No.3 供試体の損傷写真 ($7\delta_y$)

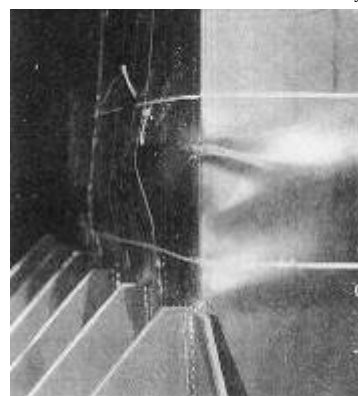
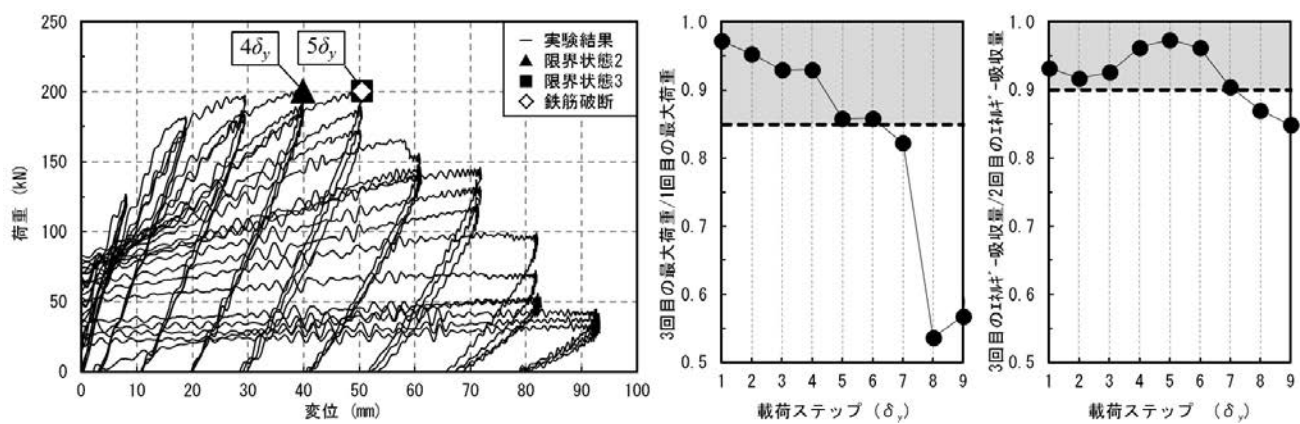
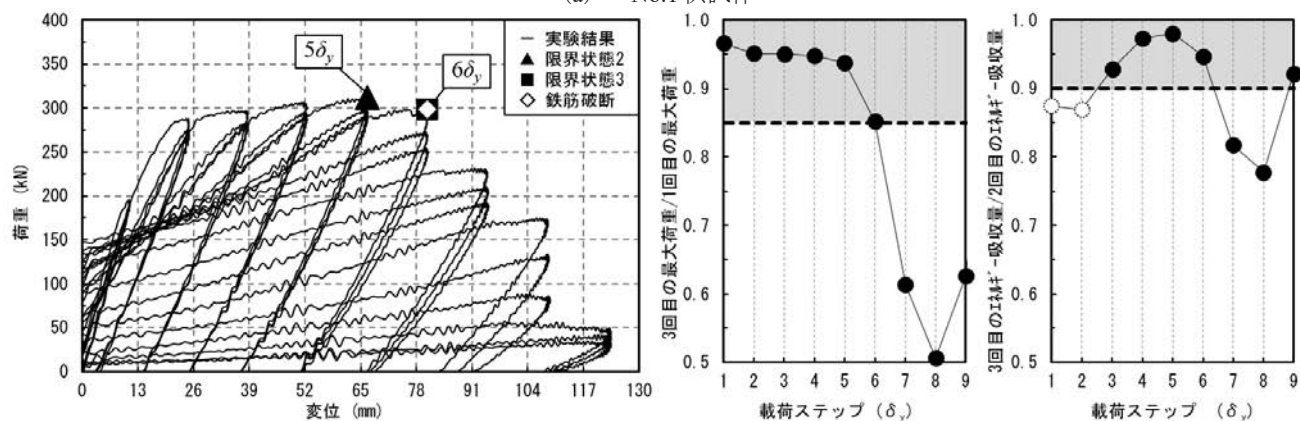


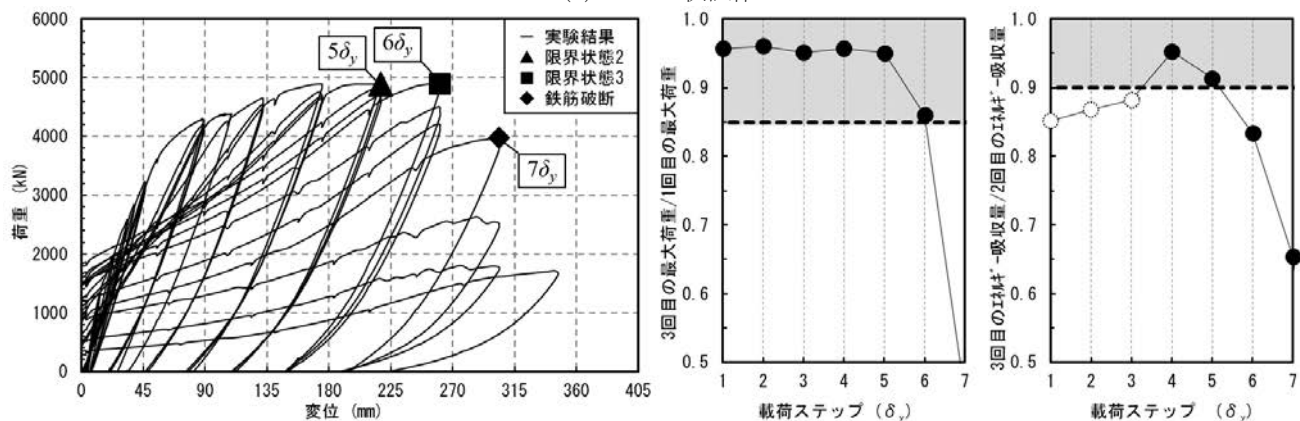
図-8 No.4 供試体の損傷写真 ($9\delta_y$)



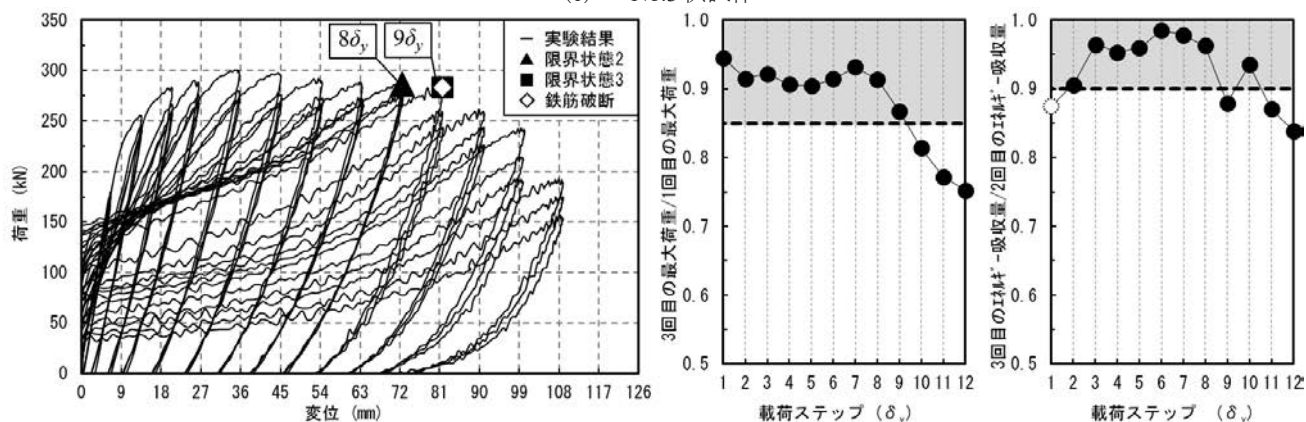
(a) No.1 供試体



(b) No.2 供試体



(c) No.3 供試体



(d) No.4 供試体

図-9 鋼板巻立てに対する実験結果の整理

(3) RC巻立て

図-10、図-11に損傷図及び損傷写真を示す。

No.5供試体は、 $9\delta_y$ にて耐力低下が確認できるため、 $8\delta_y$ を限界状態3とみなした(図-14(a))。 $8\delta_y$ にて、耐力比及び吸収エネルギー比が指標を満たさないことから、指標を満たす最大の荷重ステップである $7\delta_y$ を限界状態2とみなした。なお、本供試体は、 $2\delta_y$ から $4\delta_y$ までは、履歴が安定しないことから、耐力比が85%を下回っている。これは、補強工法がRC巻立てであり、かぶりが80mmと厚くなっているため、かぶりに曲げひび割れや剥落が生じるまでは、耐力が安定しなかったためと考えられる(図-10)。そのため、本研究では、 $5\delta_y$ より後に着目して分析を行った。また、 $9\delta_y$ 荷重時には、鉄筋破断が生じている⁹⁾。

No.6供試体は、 $6\delta_y$ にて耐力低下が確認されたため、 $5\delta_y$ を限界状態3とみなした(図-14(b))。耐力比及び吸収エネルギー比は、限界状態3とみなした $5\delta_y$ においても指標を満たしていることから、 $1\delta_y$ 前の $4\delta_y$ を限界状態2とみなした。なお、本供試体もNo.5供試体同様のRC巻立て補強であるため、かぶりの影響により、初期の荷重履歴において耐力が安定していない。また、 $7\delta_y$ 荷重時に生じた鉄筋破断をはつり調査により確認している(図-11)。

(4) 炭素繊維巻立て

図-12、図-13に損傷写真を示す。

No.7供試体は、 $5\delta_y$ にて耐力低下が確認できるため、 $4\delta_y$ を限界状態3とみなした(図-15(a))。 $4\delta_y$ にて、吸収エネルギー比が指標を満たさないことから、指標を満たす最大の荷重ステップである $3\delta_y$ を限界状態2とみなした。なお、本供試体における荷重試験では、鉄筋破断は生じていない。

No.8供試体は、 $12\delta_y$ にて図-13に示す基部の炭素繊維に破断が生じ、急激に水平耐力が低下した(図-13)。ここで、本研究にて設定している限界状態は、軸方向鉄筋のはらみ出しに着目しており、炭素繊維の破断には言及していない。そのため、炭素繊維の破断による耐力低下は見込まず、 $1\delta_y$ 前である $11\delta_y$ を限界状態3とみなした(図-15(b))。耐力比及び吸収エネルギー比は、限界状態3とした $11\delta_y$ においても指標を満たしていることから、 $1\delta_y$ 前の $10\delta_y$ を限界状態2とみなした。

(5) 整理結果のまとめ

図-16は、結果の整理方法に基づき、補強橋脚における限界状態を文献⁴⁾と同様の方法で整理したも

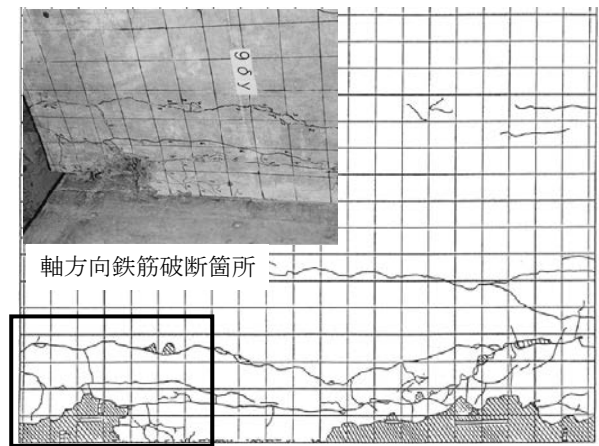


図-10 No.5 供試体の損傷図，損傷写真 ($9\delta_y$)

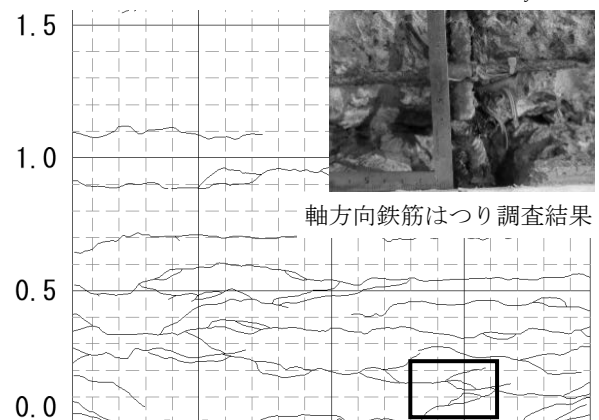


図-11 No.6 供試体の損傷図 ($7\delta_y$)，はつり調査結果

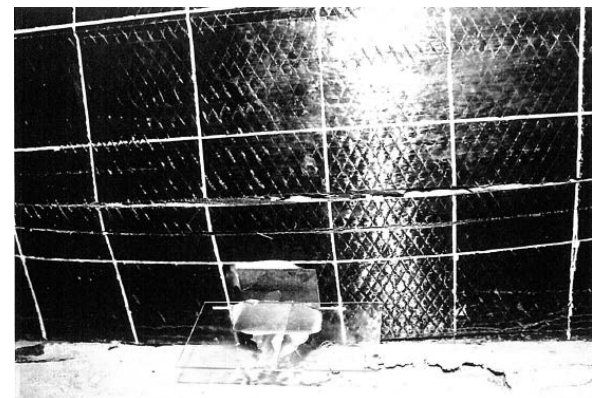


図-12 No.7 供試体の損傷写真 ($4\delta_y$)

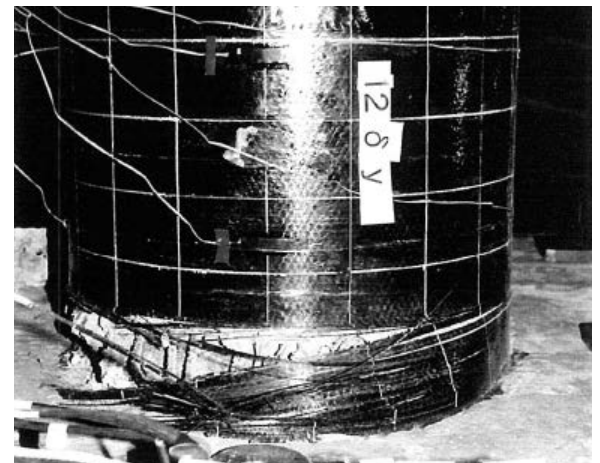
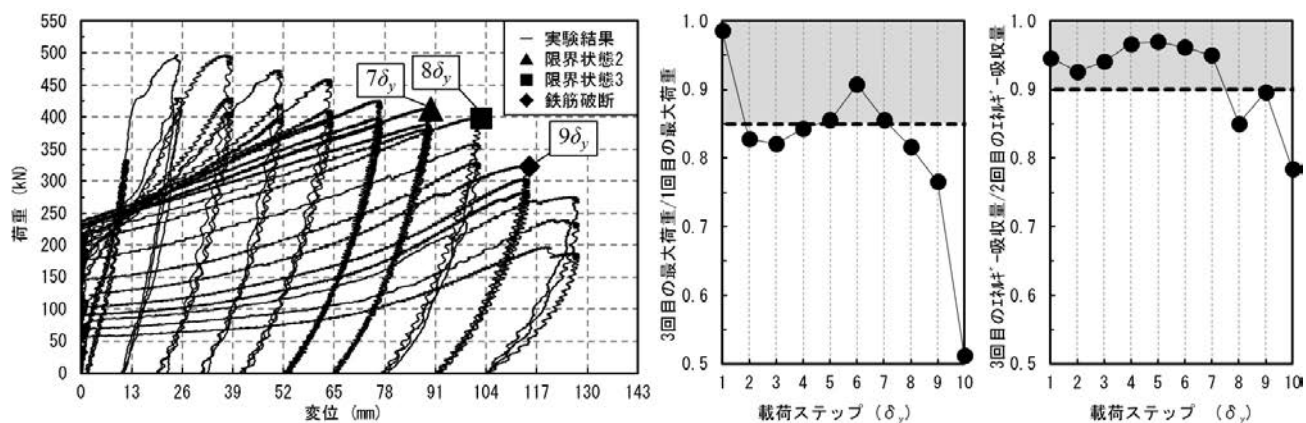
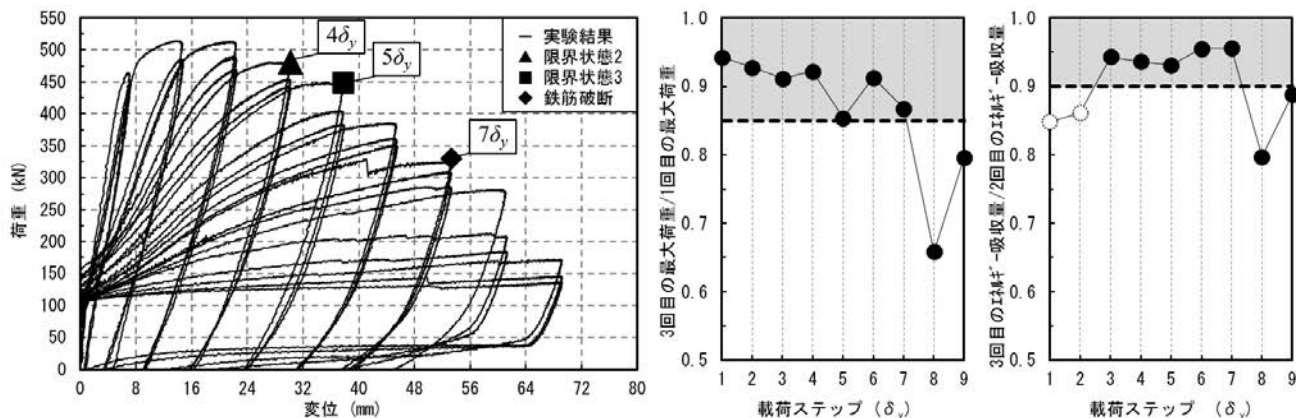


図-13 No.8 供試体の損傷写真 ($12\delta_y$)

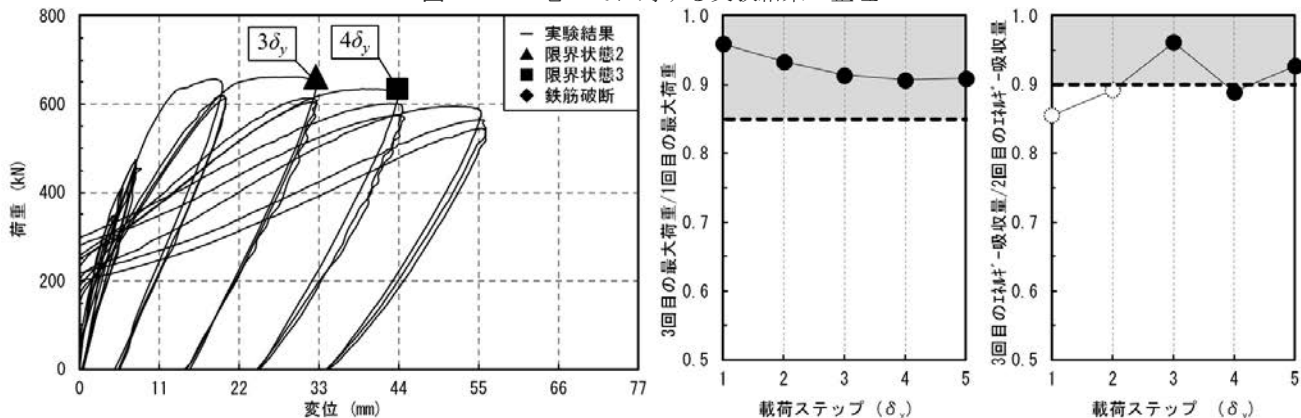


(a) No.5 供試体

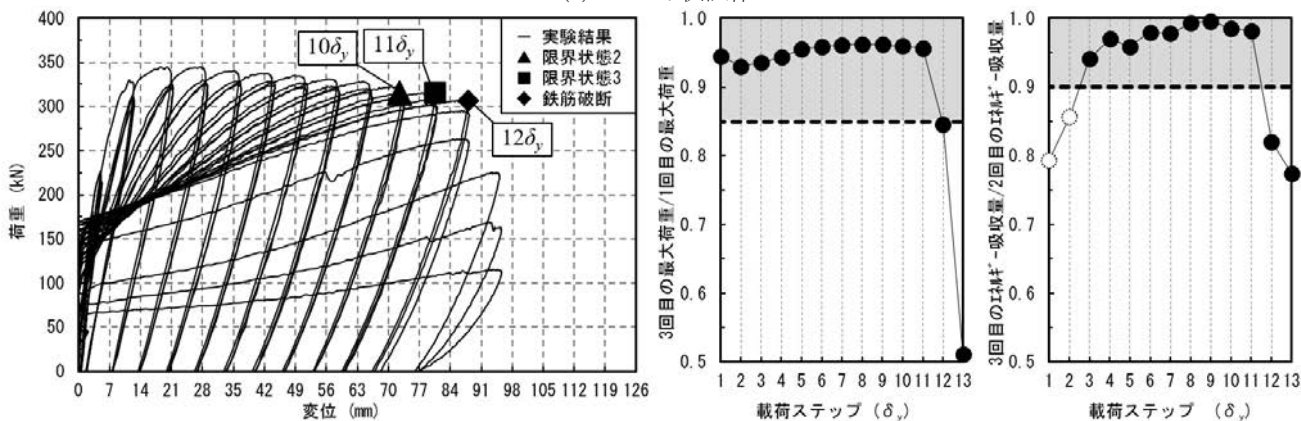


(b) No.6 供試体

図-14 RC 巻立てに対する実験結果の整理



(a) No.7 供試体



(b) No.8 供試体

図-15 炭素繊維巻立てに対する実験結果の整理

※ $12\delta_y$ に示す鉄筋破断は、補強材の破断を示す。

のである。

表-3に、これまでに示した8供試体の実験結果を図-16に基づいて限界状態2、3とみなせる変位を整理した結果一覧を示す。なお、表に示す変位は、降伏変位 δ_y を整数倍した値により示している。

5. まとめ

本研究では、曲げ破壊型の補強橋脚に対する限界状態の評価手法の構築に向けた基礎資料とすることを目的に、過去に行われた実験を対象に、限界状態の整理を行った。本研究で得られた知見は次のとおりである。

- (1) エネルギー吸収の安定や、水平耐力保持の観点で、補強橋脚の限界状態を整理した結果、RC橋脚と同様に限界状態2及び限界状態3を整理することができた。
- (2) 限界状態2の整理は、RC橋脚と同様に、耐力比や、吸収エネルギー比の指標を用いて整理を行うことができた。
- (3) 限界状態3の整理は、実験における荷重－変位関係より、水平耐力を保持できる状態として整理を行うことができた。

今後、本稿で整理した限界状態について、解析的検討を行い、その評価手法を構築を行う予定である。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編，2017。
- 2) 星隈順一，堺淳一，小森暢行：軸方向鉄筋のはらみ出し現象に着目した鉄筋コンクリート橋脚の塑性ヒンジ長の推定手法に関する研究，土木研究所資料No.4257, 2013。
- 3) 堺淳一，星隈順一：軸方向鉄筋のはらみ出し現象に着目した鉄筋コンクリート橋脚の塑性ヒンジ長の評価，構造工学論文集，Vol.60A, pp.782-795, 2014。
- 4) 星隈順一，堺淳一，小森暢行，坂柳皓文：鉄筋コンクリート橋脚の地震時限界状態の評価手法に関する研究，土木研究所資料No.4262, 2013。
- 5) 玉越隆史，白戸真大，星隈順一，堺淳一：既設橋の耐震補強設計に関する技術資料，国土技術政策総合研究所資料No.700/土木研究所資料No.4244, 2012。

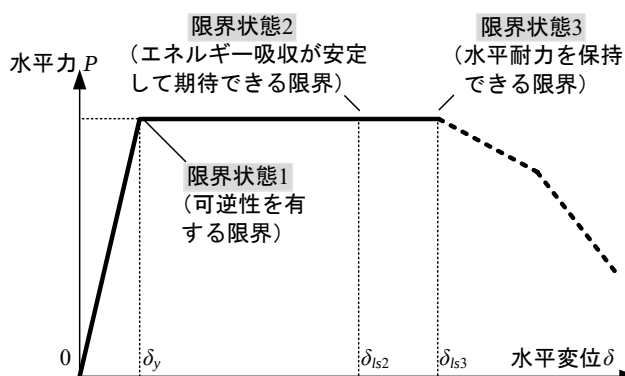


図-16 補強橋脚の限界状態

表-3 限界状態の整理結果

補強工法	鋼板				RC		炭素繊維	
供試体No.	1	2	3	4	5	6	7	8
降伏変位 (mm)	10	13	45	9	13	8	11	7
限界状態2 変位 (mm)	4 δ_y	5 δ_y	5 δ_y	8 δ_y	7 δ_y	4 δ_y	3 δ_y	10 δ_y
限界状態3 変位 (mm)	5 δ_y	6 δ_y	6 δ_y	9 δ_y	8 δ_y	5 δ_y	4 δ_y	11 δ_y

- 6) 宮田秀太，石崎覚史，澤田守，大住道生：巻立て補強された鉄筋コンクリート橋脚の限界状態評価に関わる解析的検討，第22回橋梁等の耐震設計シンポジウム講演論文集，2019。
- 7) 川島一彦，大塚久哲，中野正則，星隈順一，長屋和宏：曲げ耐力制御式鋼板巻き立て工法による鉄筋コンクリート橋脚の耐震補強，土木研究所資料No.3444, 1996。
- 8) 建設省土木研究所，日本道路公団，首都高速道路公団，阪神高速道路公団：鉄筋コンクリート橋脚の耐震性に及ぼす寸法効果の影響に関する共同研究報告書，共同研究報告書No.234, 1999。
- 9) 長屋和宏，大塚久哲，星隈順一：壁式橋脚の鉄筋コンクリート巻立て補強とその効果，土木学会第51回年次学術講演会，pp.552-553, 1996。
- 10) 鬼木浩二，井上崇雅，中尾尚史，篠原聖二，岡田太賀雄，星隈順一：橋脚のRC巻立て補強における高強度鉄筋の適用がアンカー定着特性と補強効果に及ぼす影響，構造工学論文集，Vol.63A, pp.289-300, 2017。
- 11) 佐々木協一，袴田文雄，前川順道，星隈順一：炭素繊維シートを用いたRC橋脚補強の実験的検討，第24回地震工学研究発表会講演論文集，pp.777-780, 1997。