

鉄筋コンクリートラーメン橋脚柱・梁接合部の設計法に関する研究

林 昌弘¹・運上茂樹²

¹正会員 建設省土木研究所 耐震研究室研究員（〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地）

²正会員 工博 建設省土木研究所 耐震研究室室長（〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地）

1. まえがき

平成7年の兵庫県南部地震では被災を生じた不静定な橋脚があったことから、道路橋示方書Ⅴ耐震設計編（平成8年12月）¹⁾では、不静定構造物においてもRC一層ラーメン橋脚についての地震時保有水平耐力の照査が規定され、塑性ヒンジの発生可能箇所が柱部材の上端部および下端部そしてはり部材の端部に限られるとし、ぜい性的な破壊を引き起こす柱・梁接合部には塑性ヒンジを発生させてはならないとされた。

しかし、繰返し荷重を受けたときの柱・梁接合部の挙動に関しては未解明の部分が多く、土木構造物として柱・梁接合部の諸元や配筋から直接動的耐力や変形性能を算出できる設計手法はないのが現状である。

このような背景のもとで、本文では、RCラーメン橋脚のT型の柱・梁接合部の動的耐力と変形性能を把握することを目的として、柱・梁接合部を対象として行った繰返し載荷実験結果について示すとともに、柱・梁接合部の設計法について検討した結果について報告するものである。

2. 柱・梁接合部の繰返し載荷実験

(1) 実験方法

図-1に示すように、柱・梁接合部の模型供試体を横に寝かせた形で加振装置による繰返し載荷を行った。梁の端部は反力フレームにピンを介して固定し、柱の端部をピンを介して加振した。柱および梁ともに接合部中心からピンまでは2900mmである。載荷は変位制御で行い、梁と柱のどちらかの軸方向鉄筋が降伏したときの変位 δ_y を基準として、その整数倍で3回ずつ加振し順次変位を増大させた。

表-1は実験ケースを示したものである。各供試体は柱および梁ともに断面を600mm×600mmとし、接合部の付け根から2100mmの高さとした。CASE1供試体は平成8年道路橋示方書に基づく標準配筋の橋脚を想定したもので、梁の主鉄筋としてD13×17本、帯鉄筋としてD6を使用し、断面内に2本の間間帯鉄筋を配筋した。柱には軸方向鉄筋としてD13×16本、帯鉄筋としてD6を使用し、断面内に2本の間間帯鉄筋を配筋した。

CASE2供試体は既設橋脚をモデル化する意味でCASE1供試体の配筋を平成2年道路橋示方書に基づいて配筋したものであり、CASE1供試体との違いは帯鉄筋の定着方法と柱に中間帯鉄筋を配置していない点である。また、CASE1およびCASE2供試体の柱にはPC鋼棒により529kNの軸力を導入した。これは応力度として1.5N/mm²に相当する。

表-1 実験供試体

供試体	CASE1	CASE2	CASE3	CASE4	CASE5	CASE6
梁 軸方向鉄筋	17-D13	17-D13	16-D19	16-D25	16-D16	16-D19
梁 帯鉄筋	D6etc250	D6etc250	D6etc150	D10etc150	D6etc150	D6etc150
軸方向鉄筋比	0.60%	0.60%	1.27%	2.25%	0.88%	1.27%
柱 軸方向鉄筋	16-D13	16-D13	20-D19	20-D25	20-D16	20-D19
柱 帯鉄筋	D6etc125	D6etc125	D6etc125	D10etc125	D6etc125	D6etc125
軸方向鉄筋比	0.56%	0.56%	1.59%	2.82%	1.10%	1.59%
柱への軸力導入	有	有	無	無	無	無
配筋方法	H8道示	H2道示	H8道示	H8道示	H8道示	H8道示
梁上側鉄筋折曲	無	無	無	無	無	有

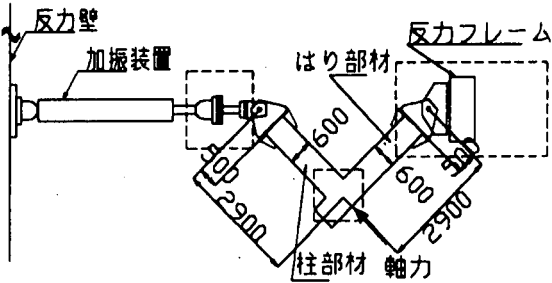


図-1 載荷実験状況

CASE2供試体は既設橋脚をモデル化する意味でCASE1供試体の配筋を平成2年道路橋示方書に基づいて配筋したものであり、CASE1供試体との違いは帯鉄筋の定着方法と柱に中間帯鉄筋を配置していない点である。また、CASE1およびCASE2供試体の柱にはPC鋼棒により529kNの軸力を導入した。これは応力度として 1.5N/mm^2 に相当する。

CASE3～CASE5供試体では、柱・梁の曲げ耐力を変化させるために軸方向鉄筋量を変化させた。すなわち、梁および柱の軸方向鉄筋としてそれぞれD19、D25、D16を、帯鉄筋としてD6ないしD10を使用し、断面内に2本の中間帯鉄筋を配筋した。

CASE6供試体は、CASE3供試体と同じ配筋としたが、梁上面側の軸方向鉄筋を下方に折り曲げて定着を確保させる形とした。図-2に一例としてCASE1供試体の配筋を、図-3にCASE6供試体の梁軸方向鉄筋の加工図を示す。

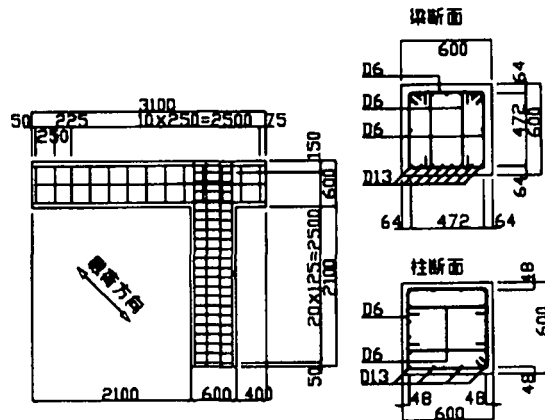


図-2 CASE1供試体配筋図

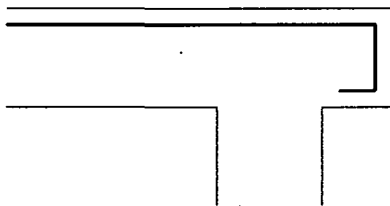


図-3 CASE6供試体梁上面側軸方向鉄筋加工図

(2) 損傷モード

図-4に各供試体の荷重-変位関係および最終破壊状況を示す。

CASE1供試体では、加振する変位の増加とともに梁の付け根部分に塑性ヒンジに相当する損傷が生じたが、柱・梁接合部にはひび割れは生じず、最終的には $9\delta y$ 載荷時に、梁付け根部のかぶりコンクリートが剥落しその部分の軸方向鉄筋が座屈することにより耐力の低下が見られたが、軸方向鉄筋の破断に

は至らなかった。

CASE2供試体もCASE1供試体と同様に、柱・梁接合部にひび割れは発生せず、 $9\delta y$ 載荷時に梁付け根部のかぶりコンクリートが剥落し軸方向鉄筋の座屈が生じて耐力の低下が見られたが、破断には至らなかった。

CASE3供試体では、 $4\delta y$ 載荷時に柱・梁接合部に斜めひび割れが発生し、さらにかぶりコンクリートのはらみ出しが始まった。 $5\delta y$ 載荷時にさらにひび割れが進展するとともに梁上面側のコンクリートが剥落、梁軸方向鉄筋の付着が切れたために正側の耐力が大きく低下した。

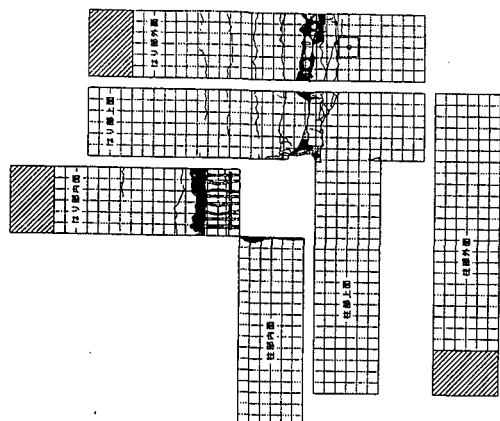
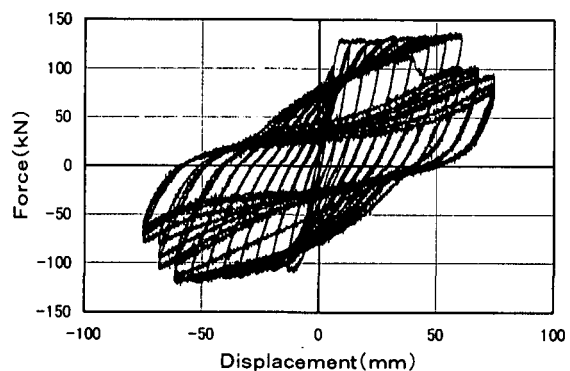
CASE4供試体では、CASE3供試体と同様に $2\delta y$ 載荷時に柱・梁接合部に斜めひび割れが発生した。そして $3\delta y$ 載荷時でこのひび割れが大きく進展し、梁上面側のコンクリートが剥落、梁軸方向鉄筋の付着が切れたために正側の耐力が大きく低下した。

CASE5供試体では、加振する変位の増加とともに梁の付け根部分に損傷が生じたが、柱・梁接合部には若干のひび割れが生じただけで、最終的に $8\delta y$ 載荷時に梁付け根部のかぶりコンクリートが大きく剥落し大きく耐力が低下した。

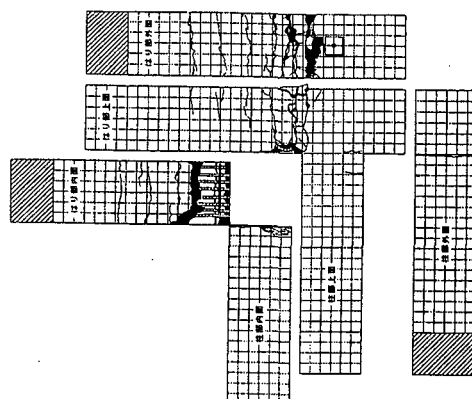
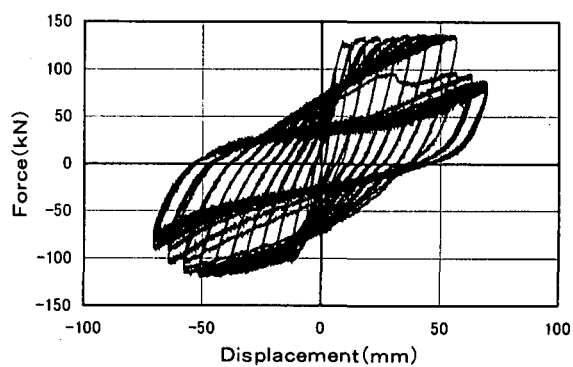
CASE6供試体は、CASE3供試体と同様に $3\delta y$ で接合部にせん断破壊に伴う斜めひび割れが発生したが、CASE3の場合と異なり梁の軸方向鉄筋の付着力が確保され続けたためひび割れ発生後も急激な耐力低下は見られなかった。

(3) 荷重-変位関係

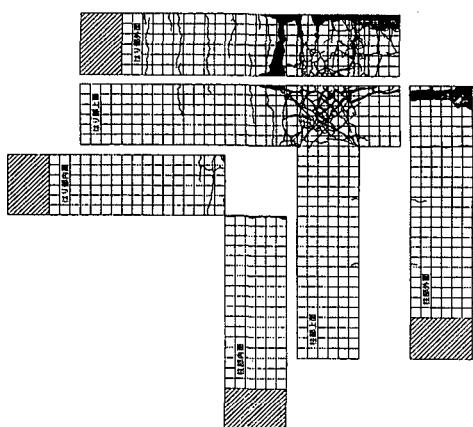
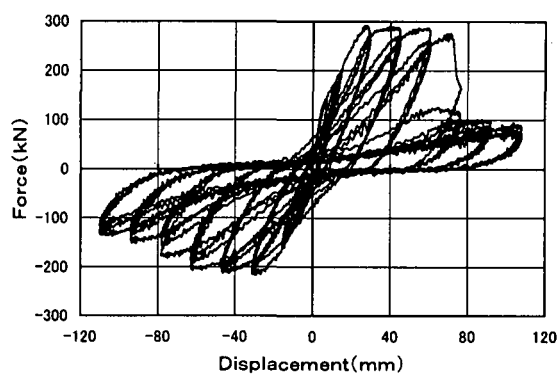
図-4に各供試体の荷重-変位関係および最終破壊状況を示したが、ここで示す荷重と変位はそれぞれ図-1に示した加振装置が加振する方向の荷重と変位である。図-4によると、CASE1, 2, 5供試体が大きい変位まで安定した履歴曲線を有しているのに対し、CASE3供試体では $5\delta y$ で、CASE4供試体は $3\delta y$ で大きく耐力が低下している。またCASE6供試体はCASE3供試体と異なり梁の軸方向鉄筋の定着を確保する配筋としたため、 $3\delta y$ でせん断破壊に伴う斜めひび割れが発生した後でも耐力が確保され続けておりCASE3供試体で見られたような急激な耐力低下は見られない。また、各供試体で履歴曲線が正側と負側で異なるが、これは正側では加振により軸力が加わるのに対し、負側では軸力が抜けることと、正側載荷を先行して正負交番載荷を繰り返したためであると考えられる。



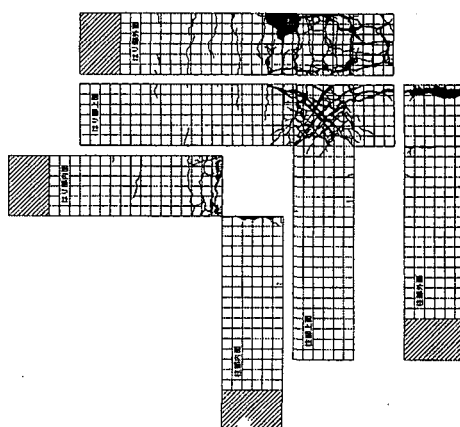
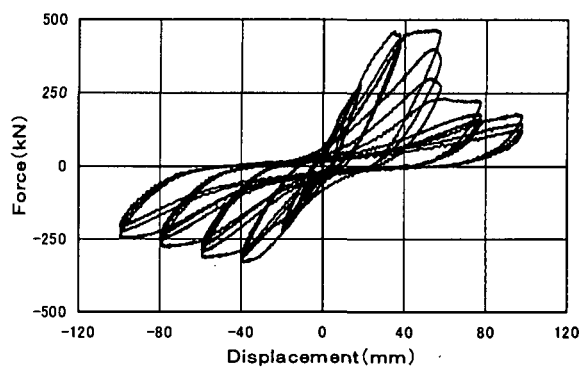
CASE 1 供試体



CASE 2 供試体

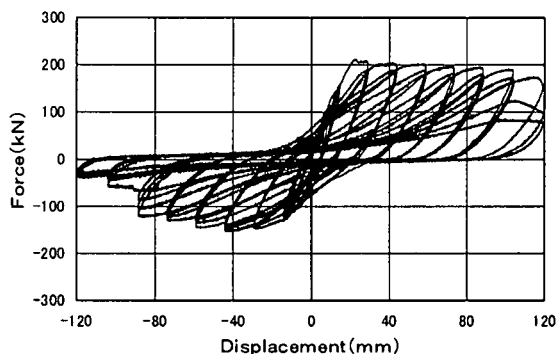


CASE 3 供試体

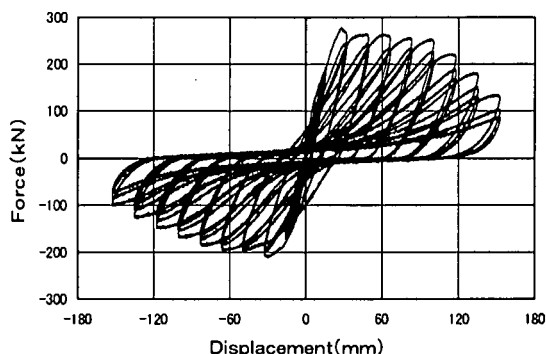


CASE 4 供試体

図-4 各供試体の荷重-変位関係と最終変状図 (CASE 1~CASE 4)



CASE 5 供試体



CASE 6 供試体

図-4 各供試体の荷重-変位関係と最終変状図 (CASE 5~CASE 6)

3. 柱・梁接合部の損傷判定

(1) せん断損傷の発生の判定

柱・梁接合部を対象に、ここにせん断的な損傷を生じさせないようにすることにより剛域として評価することができるかどうかの判定方法について検討を行った。解析は、柱・梁接合部に生じる引張主応力度をコンクリートの引張強度と比較する方法により行った^{2) 3) 4) 5)}。すなわち、引張主応力度 P_t がコンクリートの引張強度 σ_t より大きければ接合部にせん断的な損傷は生じず、小さければせん断的な損傷が生じると判断した。せん断的な損傷が生じるかどうかの判定結果を表-2に示す。この判定方法によるとCASE3, 4, 6供試体は接合部に生じる引張主応力度 P_t がコンクリートの引張強度 σ_t より大きいいため接合部に損傷が生じると判定されるのに対し、CASE1, 2, 5供試体は引張主応力度 P_t がコンクリートの引張強度 σ_t より小さいため接合部にせん断的な損傷は生じないと判定される。実験結果は、CASE1, 2, 5供試体は接合部でせん断的な損傷は生じず、CASE3, 4, 6供試体は接合部でせん断的な損傷が生じた。したがって、概ね P_t/σ_t が1を超えるかどうかで

せん断損傷が生じるかどうかの判定が可能であると考えられる。

(2) せん断破壊の判定

柱・梁接合部に損傷が生じた場合でも、最終的に柱・梁接合部のせん断破壊に至る場合と、せん断破壊に至る前に柱または梁の損傷により破壊する場合が考えられる。そこで、柱・梁接合部のせん断耐力 P_s を道路橋示方書V耐震設計編¹⁾のせん断耐力算定式に基づいて算出し、柱・梁接合部に生じるせん断力 V_{j0} と比較することにより最終的な破壊形態を判定することとした。算定結果を表-3に示す。これによると、柱・梁接合部に損傷が生じたCASE3, 4, 6を含めた全ケースとも、せん断耐力が柱・梁接合部に生じるせん断力を上回り、柱・梁接合部でのぜい性的なせん断破壊には至らないと判定された。

実験結果はCASE3, 4, 6ともに、柱・梁接合部に斜めひび割れは発生したものの、最終的には梁の付け根部の破壊あるいは梁軸方向鉄筋の定着が切れたことによる定着部の破壊による損傷が支配的であった。判定結果と実験結果はよく一致しており、この

表－２ 引張応力度と引張強度の検討

供試体	CASE1	CASE2	CASE3	CASE4	CASE5	CASE6
せん断応力度 V_j (N/mm ²)	1.30	1.31	2.80	4.55	2.08	2.74
鉛直方向応力度 f_v (N/mm ²)	1.72	1.82	0.57	0.92	0.43	0.56
引張主応力度 P_t (N/mm ²)	0.70	0.69	2.53	4.11	1.88	2.48
コンクリート引張強度 σ (N/mm ²)	2.06	2.06	2.25	2.26	2.11	2.09
P_t/σ_t	0.34	0.33	1.12	1.82	0.89	1.19
柱・梁接合部の損傷	無	無	有	有	無	有

表－３ 損傷形態の検討結果

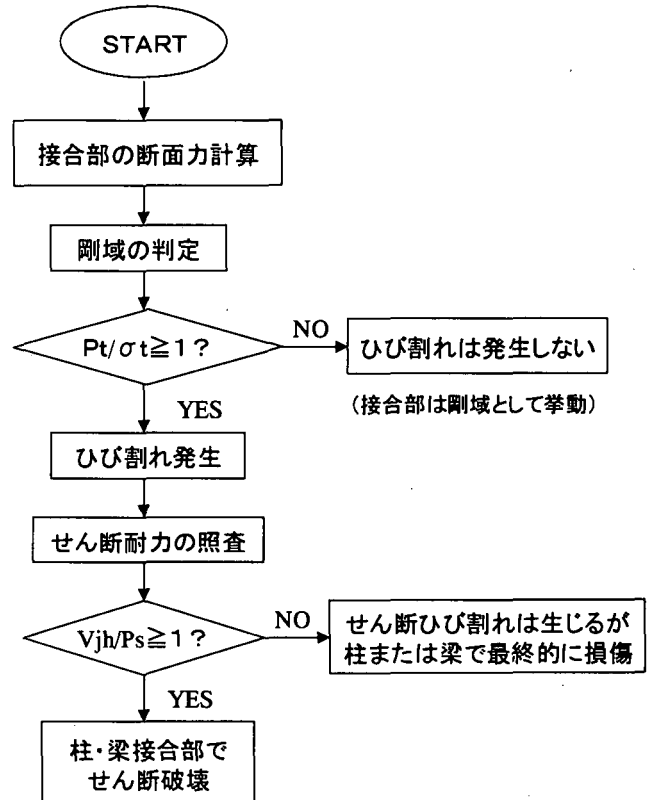
供試体	CASE1	CASE2	CASE3	CASE4	CASE5	CASE6
せん断力 V_{jh} (kN)	490.3	496.1	1051.8	1682.5	782.6	1030.7
コンクリートせん断耐力 S (kN)	120.2	117.3	172.8	182.7	148.3	166.5
鉄筋のせん断耐力 S_s (kN)	448.5	448.5	940.8	1806.9	680.0	955.9
せん断耐力 $P_s=S+S_s$ (kN)	568.7	565.8	1113.6	1989.6	828.3	1122.4
V_{jh}/P_s	0.86	0.88	0.94	0.85	0.94	0.92
せん断破壊	しない	しない	しない	しない	しない	しない
最終損傷部位	梁部	梁部	梁定着部	梁定着部	梁部	梁部

ことから、柱・梁接合部に損傷が生じた場合に、せん断破壊に至るかどうかの最終的な破壊形態を判定することができると考えられる。

４．柱・梁接合部の設計法の検討

以上の検討結果をもとに、柱・梁接合部の設計方法について検討した。柱・梁接合部の破壊特性および剛域としての評価方法は、図－７のフローに示すように照査することができると考えられる。すなわち、柱・梁接合部に発生するせん断力により求められる引張主応力度 P_t とコンクリートの引張強度 σ_t の関係から、引張主応力度の方が大きければ柱・梁接合部にせん断的なひび割れの発生が予想される。一方、引張強度の方が大きければせん断的なひび割れは発生しないと考えられるので、柱・梁接合部は剛域として評価できる。

次に、柱・梁接合部にせん断的なひび割れが発生する場合であるが、柱・梁接合部に生じるせん断力と柱・梁接合部のせん断耐力を比較することにより、柱・梁接合部でぜい性的なせん断破壊が生じるか、あるいは、柱・梁接合部にひび割れは生じるが最終的に柱または梁に損傷が生じるかを判定することができる。修復等を考慮した場合には、剛域として評価できるようにコンクリートの引張強度に余裕があることが望ましいが、構造物の安全性の観点では、柱・梁接合部にひび割れは生じて、最終的に



図－７ 柱・梁接合部の設計フロー

ぜい性的なせん断破壊を生じないことを照査することができる。

また、CASE3およびCASE6の実験結果からわかるように、梁外面側の軸方向鉄筋の付着が切れることにより、軸方向鉄筋が有効に機能しなくなり、所要の水平耐力を確保できなくなることから、T型の柱・梁接合部においては、梁の軸方向鉄筋の定着が失われることのないように、十分な定着長を確保するか、定着構造を考慮する必要がある。

6. まとめ

RCラーメン橋脚の柱・梁接合部について、繰返し載荷実験を行うとともに、柱・梁接合部の設計法について検討を行った。その結果は以下の通りである。

(1) 柱・梁接合部にせん断的な損傷が発生するかどうかは、柱・梁接合部に生じる引張応力度とコンクリートの引張強度を比較することにより判定可能である。この場合、コンクリートの引張強度が柱・梁接合部に生じる引張応力度よりも大きければ、柱・梁接合部にせん断的な損傷は生じず、剛域として評価できる。

(2) 柱・梁接合部にせん断的な損傷が発生すると判定された場合でも、十分なせん断耐力が確保されておれば、柱または梁に発生する損傷が支配的となり、柱・梁接合部にぜい性的なせん断破壊は生じない。

(3) 上記結果を踏まえて、柱・梁接合部の設計法を提案した。

参考文献

- 1) (社) 日本道路協会：道路橋示方書Ⅴ耐震設計編，平成8年12月
- 2) 運上茂樹、寺山 徹、林 昌弘：柱・梁接合部の動的耐力・変形性能に関する繰返し載荷実験、土木学会第2回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集PP.197～200、平成10年12月
- 3) 林 昌弘、運上茂樹：鉄筋コンクリートラーメン橋脚の柱・梁接合部の変形性能に関する検討、土木学会第54回年次学術講演会講演概要集、1999年9月
- 4) 林 昌弘、運上茂樹：RCラーメン橋脚の柱・梁接合部の耐震性能、日本道路協会第23回日本道路会議、1999年10月
- 5) (社) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説、1990制定