

R C 柱・梁接合部の 2 方向入力に関わる研究の現状 正会員 ○ 北山 和宏

1. はじめに

立体柱・梁接合部試験体に二方向加力する実験は1990年までに日本、アメリカ、ニュージーランドおよび中国で行なわれている。これは、青山博之東京大学教授および J. O. Jirsa テキサス大学教授の呼びかけによって1984年から5年間にわたって開かれた「鉄筋コンクリート柱・梁接合部の耐震設計に関するアメリカ、ニュージーランド、日本および中国の4国セミナー」[1]によるところが大きい。

日本では、鈴木、小谷ら[2]、Halim、今村ら[3]、草刈、後藤ら[4]、北山、浅海ら[5]、藤井、森田[6]、藤原、西村ら[7]によって二方向載荷する実験が行なわれた。このうち、藤原らの研究は二方向加力時の内柱・梁接合部のせん断強度を検討したものであり、 $0.2 \sigma_B$ (σ_B : コンクリート圧縮強度) の軸力を作用させ 45 度方向に加力したスラブなし立体試験体のせん断耐力は、平面柱・梁接合部のそれとほぼ同じであったことを示した。このほかの研究はいずれも接合部に入力されるせん断力が小さく、単位架構全体の挙動、スラブ有効幅の検討、柱の二軸曲げ挙動、梁主筋の付着性状、などを調べたものである。

外国では Kurose ら[8]、Leon、Jirsa[9]、Cheung、Paulay ら[10]による研究がある。Kurose らは、スラブ付き平面内柱・梁接合部に繰り返し載荷する実験およびスラブ付き立体柱・梁接合部に二方向載荷する実験を行ない、梁降伏後の層間部材角 $1/25 \text{ rad}$ で接合部のせん断破壊が生じたこと、立体になることにより接合部せん断耐力が上昇したこと、などを示した。Leon らは、立体内柱および外柱・梁接合部に一方あるいは二方向繰り返し載荷する実験を行なった。柱および梁の曲げ耐力が接近していたために、二方向加力時に柱の損傷が顕著になったこと、柱軸力が接合部の挙動にあたえる影響はほとんど無かったこと、梁幅が小さいと柱隅部のコンクリートの剥落が早期に生じ、柱端部にヒンジが発生したこと、などを指摘した。また、直交梁とスラブは接合部内の斜め圧縮ストラットの維持に貢献するが、スラブが拘束するのは接合部の上部だけであるので、接合部の耐力増大に寄与するとは考え難いと述べた。Cheung らの試験体は接合部入力せん断力レベルが小さく、接合部はほぼ健全に維持された。

以上のように二方向加力時の接合部のせん断強度についての研究は不足している。そこでここでは既往の研究をもとに、柱・梁接合部のせん断強度に対する直交梁とスラブの影響および二方向同時載荷の影響について検討する。また、二方向加力時の梁主筋の接合部内付着性状を検討する。

2. 一方加力時の直交梁およびスラブの影響

二方向加力時の接合部せん断強度を論じるためには直交部材の影響を除外することはできない。ここではじめに、一方加力時に直交部材が接合部せん断強度に与える影響を検討する。

付け根にひびわれのない直交梁(直交スタップ)は接合部パネルの体積増加に直接寄与するため、接合部せん断強度を増大させることが実験により示されている[例えば11]。

筆者らは付け根にひびわれのある直交梁およびスラブが接合部のせん断強度の増大に与える影響を検討するため、接合部入力せん断力を十分に大きくした平面および立体内柱・梁接合部試験体に繰り返し載荷する実験(Aシリーズ)を行なった[12]。接合部入力せん断応力度をコンクリート圧縮強度で基準化したもの (v_j/σ_B) と層間変位との関係を図1に示す。本論では接合部のせん断抵抗断面積を柱幅と梁幅との平均値と柱せい(外柱・梁接合部では90度折り曲げ梁主筋の水平投影長さ)との積とする。立体試験体 A2、A3 は梁付け根コンクリートの圧壊によって耐力が決まり接合部のせん断破壊は生じなかったが、加力されてひびわれの生じた直交梁が付くことにより接合部のせん断強度は 1.2 倍以上増大し、さらにスラブが付加されると合計で 1.3 倍以上増大した。

主方向加力時における直交梁主筋の測定ひずみより（直交梁には曲げ・せん断力は作用していない）、直交梁付け根にひびわれが生じていても主方向加力により接合部パネル・コンクリートが膨張してこのひびわれを閉じさせ、さらに膨らもうとするコンクリートを両面に付く直交梁が抑制した（図2）と考えられる。試験体 A2（スラブなし立体）の直交梁による拘束力は層間部材角 $1/25$ rad 時には $10.6 \sim 34.1$ tonf（直交梁断面積で除した拘束応力度は $17.7 \sim 56.8$ kgf/cm²）であった。

直交方向には層間部材角 $1/75$ rad での繰り返し載荷を2回行ない直交梁の降伏が生じており、実際の地震時に生じる梁付け根ひびわれは本実験程度（ひびわれ幅は平均で約 0.4 mm であった）と思われる。それゆえ、直交梁のコア・コンクリート拘束効果による接合部せん断強度の増大を期待してよいと判断する。

梁主筋付着劣化後の接合部横補強筋の機能はコア・コンクリート拘束が主である[13]。この

ため、横補強筋を多量に配筋することにより接合部のせん断強度は増大すると予想されるが、横補強筋量にはほとんど依存しないことが既往の実験により多く示されている。このことから、付け根のひびわれの閉じた直交梁が付くことによる接合部体積の増大が接合部せん断強度を上昇させたと考えられる。

接合部のせん断圧縮破壊を生じた試験体 A1（平面）、試験体 A4（平面にスラブ付加）の実験結果より、スラブが付くことにより接合部のせん断強度は 1.1 倍増大した。これは、スラブ筋引張り力がスラブと柱の境界面でのせん断摩擦によって接合部内に伝達されたために、斜め圧縮ストラットへの応力集中が緩和されたためと思われる。また、ひびわれた直交梁を持つ試験体 A3（スラブ付き立体）では、スラブ筋引張り力の一部が直交梁のねじれモーメントとして接合部パネル内に均等に伝達され、圧縮ストラットへの応力集中を緩和したため接合部せん断強度が上昇したと考えられる。

3. 二方向同時加力時の接合部入力せん断応力度

二方向加力時の接合部せん断強度を検討するために、上述の試験体 A1 と同じ梁配筋を二方向の梁に使用した

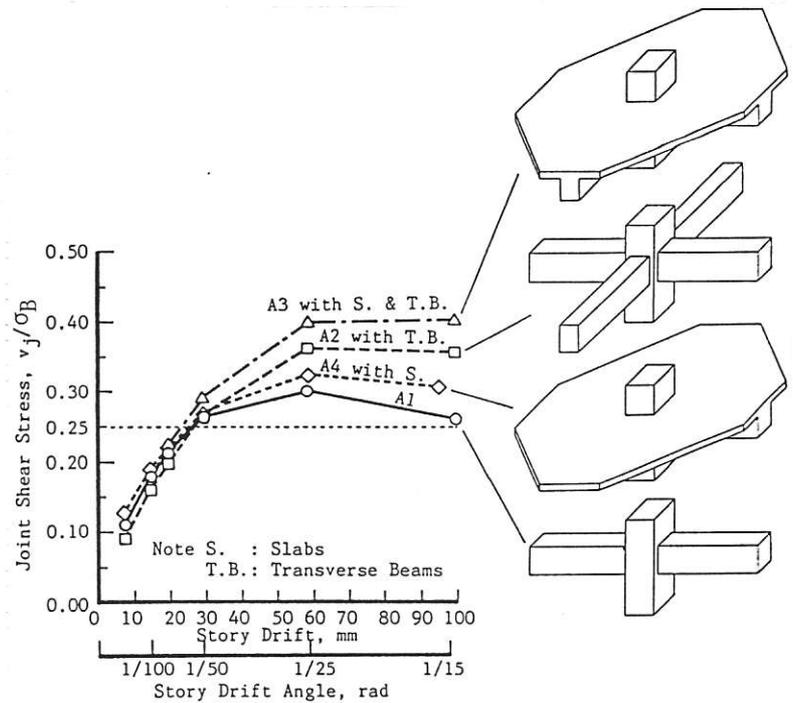


図1 基準化接合部せん断応力度-層間変位関係（直交部材の影響）

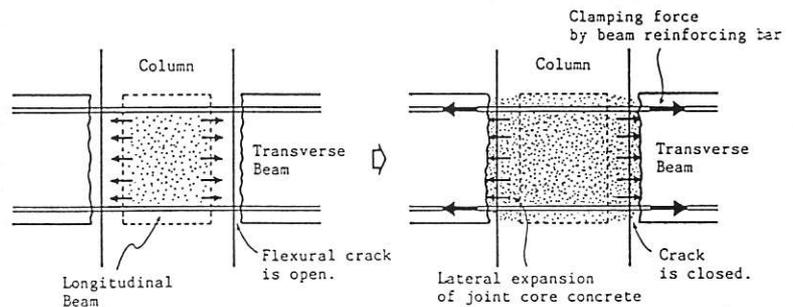


図2 ひびわれた直交梁が接合部コンクリートを拘束する機構

スラブなし立体試験体 A5 に 8 の字形の二方向载荷する実験を行なった[14]。試験体 A5 は層間部材角 1/50 rad で梁主筋の降伏を生じ、1/25 rad で梁付け根コンクリートの圧壊によって最大耐力に達したため、接合部のせん断強度を求めることはできなかった。 v_j/σ_B - 層間変位関係を二方向加力した試験体 A5 と一方向加力の試験体 A1 について図 3 に示す。二方向加力時の接合部入力せん断力および層間変位として二方向のベクトル和を用いた。

二方向加力時の接合部入力せん断応力度は一方向加力時より大きいが接合部のせん断破壊は起こらなかった。これより接合部の四辺に梁が取りつく内柱・梁接合部では二方向加力を受けるときにもせん断強度が増大する。

「柱・梁接合部の耐震設計に関する 4 国セミナー」での合意に基づき実験した試験体の一部[5, 6, 8, 14]を用い、二方向加力時の各方向せん断応力度を図 4 に示す。試験体の縮尺は日本のものが実物の約 1/2、アメリカのものが実大であった。接合部のせん断破壊が先行した試験体はなく、梁降伏後に接合部がせん断破壊した試験体が内柱・梁接合部で 1 体、外柱・梁接合部で 3 体あった。

内柱・梁接合部では、日本建築学会の「鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針(案)・同解説」[15](以下、指針(案)と略記)による入力せん断応力度の制限値 $0.30\sigma_B$ によって各方向独立に設計しても安全であることを

示している。これに対して外柱・梁接合部では、接合部の破壊曲面を $0.18\sigma_B$ (Exterior 方向) と $0.30\sigma_B$ (Interior 方向) との矩形と仮定(すなわち二軸相関はないと仮定)すると危険となる。ただし、指針(案)では接合部のせん断破壊が先行するのを防止するために $0.30\sigma_B$ や $0.18\sigma_B$ という値を提案しており、梁降伏後の接合部せん断破壊をも防止するためにこの値を適用するのは厳密には正しくない、という点に注意が必要である。

内柱・梁接合部のせん断設計に対して、北山らは梁降伏後の接合部せん断破壊を防止するために接合部入力せん断応力度を $0.25\sigma_B$ に制限することを提案した[16]。ひびわれた直交梁の拘束効果により接合部のせん断強度が 1.3 倍以上増大した A シリーズの実験結果より、接合部断面の 2/3 以上を覆う梁が接合部の四面に取りつく場合には、制限値 $0.25\sigma_B$ を 1.3 倍して $0.33\sigma_B$ としてよく、この値を用いる限りでは図 4 より接合部せん断強度の二軸相関を考慮しないでよいと考える。

4. 接合部せん断強度の二軸相関

二方向加力を受ける接合部せん断強度の二軸相関の有無については不明である。ただし接合部が柱部材の一部

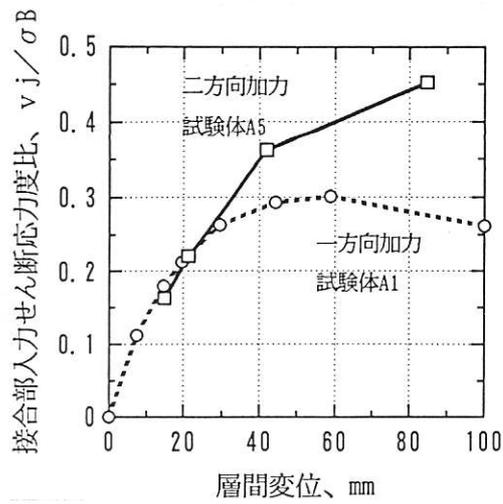


図 3 基準化接合部せん断応力度-層間変位関係(二方向加力)

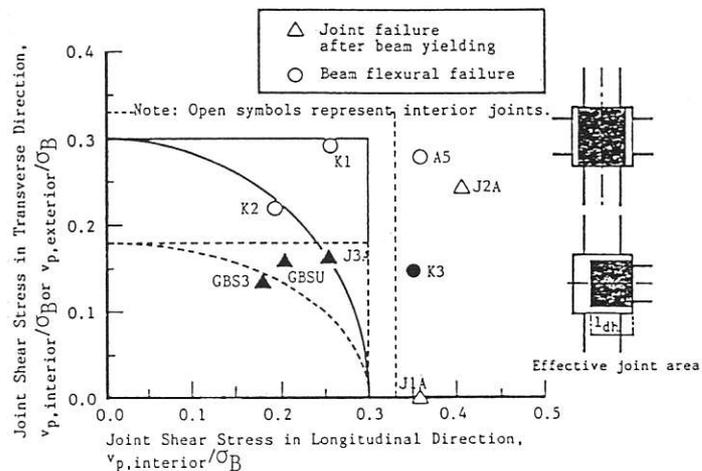


図 4 二方向加力時の各方向基準化接合部せん断応力度

であることを考えると、柱の二軸曲げによる見かけの耐力低下が発生するために接合部固有の二軸相関を抽出することは非常に困難となる。柱主筋の最外列すべてが降伏しなくとも、二方向加力により隅主筋1本が降伏することにより柱の二軸相関は表われ、梁耐力が見かけ上低下することから接合部入力せん断力も低下する。この例を図5に示す。すなわち、接合部せん断強度が二軸曲げの影響を受けるとしても表面には現われ難いと予想する。

柱の降伏曲面が二軸相関により円や楕円になるのは、鉄筋の引張り力を二方向で共有するためと考えられる。いっぽう接合部の場合には、コンクリートの斜め圧縮ストラットの圧縮強度によって耐力が決定されると考えており、二方向加力時にはコンクリートの圧縮力をそれぞれの方向で共有することにかわりはないが、ストラットの幅、角度などが弾力的に変化し得ると推定される。そのため接合部の二方向せん断強度には柱部材のような明確な二軸相関は見られないと予想する。

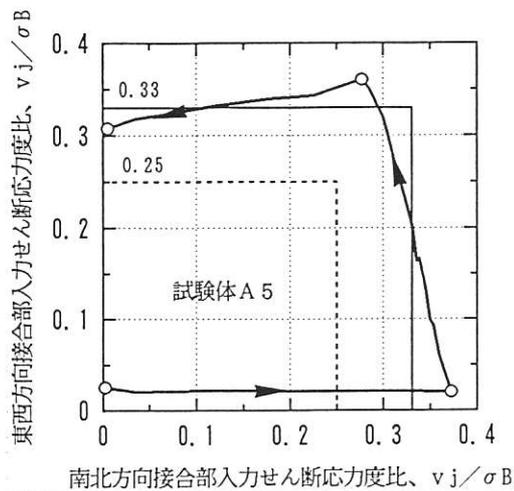


図5 基準化した接合部入力せん断応力度の軌跡

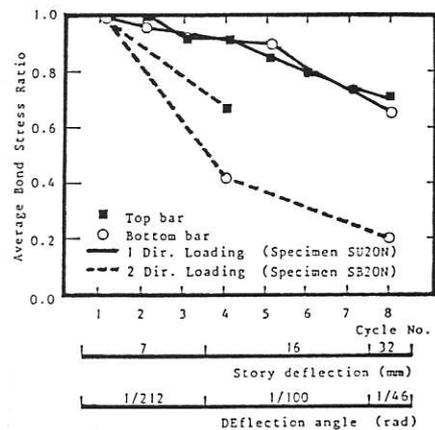


図6 梁主筋付着応力度-層間変位関係

5. 二方向加力時の梁主筋の接合部内付着性状

二方向加力により梁主筋の接合部内付着は一方加力時よりも劣化することが予想され、実験結果によっても指摘された。ここではこの実験例として Halim ら[3]および五洋建設技術研究所・宇都宮大学（未発表、1990年）の結果を示す。

同一変形での1サイクル目と4サイクル目における接合部中央部分の梁主筋付着応力度比を図6に示す[3]。二方向加力を経験した試験体では接合部内梁主筋の付着応力度の低下が顕著であることがわかる。

二方向加力履歴を実験変数とした立体スラブなし内柱・梁接合部（五洋建設・宇都宮大学）の梁主筋付着性状について簡単に説明する。柱頭の加力点パスの形を図7に示す。主方向および直交方向を交互に加力し二方向同時加力を行わないもの（試験体 J1）、口の字形に加力し原点を通らないもの（試験体 J2）、8の字形を組み合わせて田の字形に加力するもの（試験体 J3）の3種類で、各1体ずつ実験を行った。コンクリート圧縮強度は 460 kgf/cm^2 程度、梁主筋には D16 と D13（いずれも SD40）を使用した。3体とも接合部に入力されるせん断応力度は小さく、梁付け根コンクリートの圧壊で耐力が決定した。

接合部中央 $1/3 \cdot D$ （ D ：柱せい）での梁主筋付着応力度の最大値をコンクリート圧縮強度の平方根で基準化したもの（ $\tau/\sqrt{\sigma_B}$ ）と累積層間変位との関係を図8に示す。二方向同時加力を受ける2試験体は、一方加力を交互に行った場合に比べて付着強度の低下が著しく、最大付着応力度に達する累積変形も約半分と小さかった。ただし、口の字形と田の字形との加力履歴の違いによる差は小さかった。

田の字形加力を行なった試験体 J3 の $\tau/\sqrt{\sigma_B}$ -層間変位関係を図9に示す。実線は一方加力時、点線は

二方向加力時のものである。層間部材角 $1/200$ rad 以降、二方向加力時の付着応力度が一方加力時よりも大きくなった。これは直交方向加力により直交梁付け根より接合部に圧縮力が導入され、コア・コンクリートを拘束することにより付着性状が見掛け上改善されたためと考える。

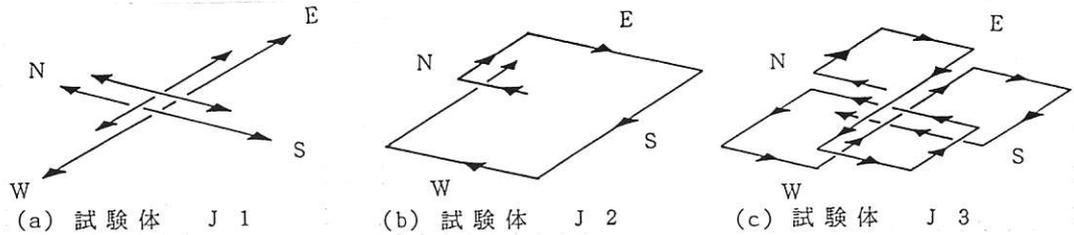


図7 柱頭加力点パスの形

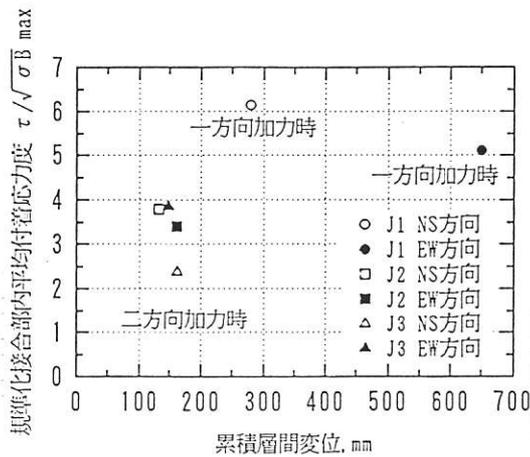


図8 最大基準化付着応力度－累積層間変位関係

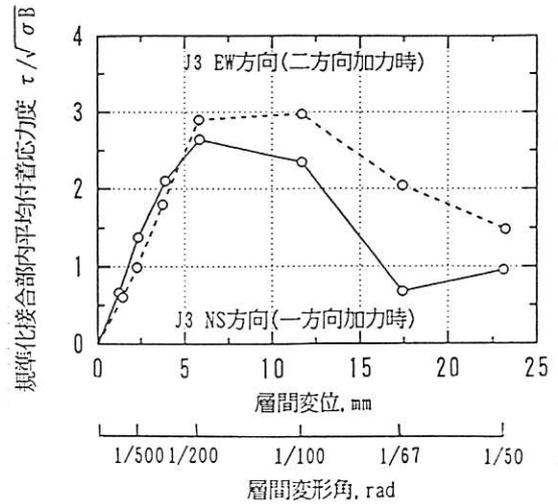


図9 基準化付着応力度－層間変位関係

6. まとめ

鉄筋コンクリート柱・梁接合部に関しては一方加力時のせん断強度を理論的に求めるに至っていないことから、二方向加力時のせん断強度にまで議論を拡張することは現時点では困難である。接合部のせん断強度を決定する要因として、コンクリート圧縮強度、接合部パネルの有効体積および横補強筋や直交部材による拘束効果が重要と考えれば、一方でのせん断耐力を求めることができた時点で、二方向への拡張は容易とも考えられる。ここでは現在得られている知見より、従来の材料を用いた柱・梁接合部では二方向独立に入力せん断応力度を抑えることにより、せん断破壊を防止できることを示した。接合部内の梁主筋付着は二方向加力を受けることにより劣化が顕著となった。しかし二方向加力履歴による影響は小さく、直交方向の変位を維持したまま主方向に加力する（口の字形加力履歴）と、主方向梁主筋の接合部内付着はむしろ見掛け上改善されることを示した。

謝辞

本論の一部は日本建築学会靱性設計小委員会付着・定着WG（主査 角徹三先生）の資料として提出したものであり、御討議・御意見いただいた委員諸氏に感謝いたします。また、貴重な実験データを提供していただいた東京大学工学部建築学科青山・小谷研究室、五洋建設技術研究所、資料作成の一部を御願ひした宇都宮大学大学

院生 江藤啓二君に感謝いたします。

引用文献

- [1] 小谷俊介：日米セミナー、RC骨組の柱はり接合部の耐震設計、コンクリート工学、Vol.27、No.9、1989、pp.66-67.
- [2] 鈴木紀雄、小谷俊介、青山博之：鉄筋コンクリート造スラブ付き柱はり立体接合部に関する実験的研究、第5回コンクリート工学年次講演会講演論文集、1983、pp.425-428.
- [3] Halim J.K.、今村晃、小谷俊介、青山博之：鉄筋コンクリート造立体柱・梁接合部の挙動に関する実験的研究、第6回コンクリート工学年次講演会講演論文集、1984、pp.657-660.
- [4] 草刈敏夫、後藤康明、真柄祥吾、城攻、柴田拓二：鉄筋コンクリート造立体柱梁接合部の破壊性状に関する研究（その1、2）、日本建築学会大会学術講演梗概集、1984、pp.1871-1874.
- [5] 北山和宏、浅海慎一郎、小谷俊介、青山博之：スラブ付き立体柱・梁接合部の挙動、第8回コンクリート工学年次講演会論文集、1986、pp.649-652.
- [6] 藤井栄、森田司郎：二方向載荷を受けるRC外部柱・梁接合部の挙動、コンクリート工学年次論文報告集、第9巻第2号、1987、pp.181-186.
- [7] 藤原幹弘、西村泰志、南宏一：2方向地震力を受ける立体柱梁接合部の弾塑性性状、コンクリート工学年次論文報告集、第10巻第3号、1988、pp.525-530.
- [8] Kurose, Y., G. N. Guimaraes, et al. : Study of Reinforced Concrete Beam-Column Joints under Uniaxial and Biaxial Loading, PMFSEL Report, No.88-2, December, 1988, The University of Texas at Austin.
- [9] Leon, R. and J. O. Jirsa: Bidirectional Loading of R.C. Beam-Column Joints, Earthquake Spectra, Vol.2, No.3, 1986, pp.537-564.
- [10] Cheung, P. C., T. Paulay and R. Park: Interior and Exterior Reinforced Concrete Beam-Column Joints of a Prototype Two-Way Frame with Floor Slab Designed for Earthquake Resistance, Department of Civil Engineering, University of Canterbury, Research Report, 89-2, March, 1989.
- [11] 大和田義正：鉄筋コンクリート梁・柱接合部における直交梁の効果に関する実験的研究（その4）、日本建築学会大会梗概集、1980、pp.1511-1512.
- [12] 北山和宏、小嶋千洋、小谷俊介、青山博之：高せん断力を受ける鉄筋コンクリート造内柱・梁接合部の挙動、第11回コンクリート工学年次論文報告集、第11巻第2号、1989、pp.531-536.
- [13] 北山和宏、小谷俊介、青山博之：地震力を受ける鉄筋コンクリート内柱・梁接合部の履歴挙動に関する実験的研究、第8回日本地震工学シンポジウム論文集、1990、pp.1407-1412.
- [14] 白木宏、高橋智康：鉄筋コンクリート内柱・梁接合部の復元力特性に関する研究、宇都宮大学工学部建築工学科卒業論文、1989年、12月.
- [15] 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（案）・同解説、1988.
- [16] 北山和宏、朝倉英博、小谷俊介、青山博之：鉄筋コンクリート造骨組における内柱・梁接合部の耐震設計法、第10回コンクリート工学年次論文報告集、第10巻第3号、1988、pp.491-496.