

論文 動的載荷時における鉄筋コンクリート造ト型柱梁接合部の力学的性状に関する研究

渡邊 則人^{*1}・安達 洋^{*2}・中西 三和^{*2}・小島 陽一^{*3}

要旨: 既往の研究成果から、建築構造物の部材挙動は地震などの動的外乱による載荷速度の影響を受けることが報告されている。しかし、動的載荷時における鉄筋コンクリート造ト型柱梁接合部の力学的性状を調べた研究は少ない。本論文は、機械式定着及びU字型定着を施した鉄筋コンクリート造ト型柱梁接合部に対する、既往の静的及び動的載荷実験結果を詳細に検討することにより、載荷速度が接合部の力学的性状に及ぼす影響を明らかにした。

キーワード: 鉄筋コンクリートト型柱梁接合部、載荷速度、せん断余裕度、破壊形式、変形成分比

1. はじめに

近年、建築材料の高強度化と鉄筋コンクリート造（以下、RC造）建物の高層化に伴って、柱梁接合部の応力状態は過酷となり損傷の危険性が増したことが指摘されている。また、その対策が接合部の設計に要求されている。しかし、地震などの動的外乱を考えた場合には、ひずみ速度による材料強度の上昇によって耐力が増大するなど接合部の力学的性状はより複雑なものとなっており、載荷速度が接合部挙動に及ぼす影響について未だ不明な点が多い。

本研究は、筆者等が過去に行った梁主筋を機械式及びU字型定着したRC造ト型柱梁接合部試験体の静的及び動的載荷実験結果^{1), 2), 3)}を詳細に比較検討することにより、破壊性状、強度、変形性能に及ぼす載荷速度の影響を明らかにすることを目的とする。

2. 試験体概要

検討対象とする試験体は、文献^{1), 2), 3)}で報告した同形状同配筋のRC造ト型柱梁接合部試

験体に対して静的載荷と動的載荷の両実験を行った8組（計16体）である。表-1に試験体一覧を示した。試験体名頭文字の**B**は、接合部せん断強度と梁曲げ強度が拮抗するように設計した試験体、いわゆるせん断余裕度の低い試験体で、頭文字**N**は梁曲げ降伏が先行するように設計した試験体、いわゆるせん断余裕度が高い試験体である。また、試験体名中の**M**は機械式、**U**はU字型のいずれかの定着方法を、**C**、**V**が柱軸力の載荷方法を表しそれぞれ一定軸力、変動軸力である。最後の文字は、**S**が静的載荷、

表-1 試験体一覧

実験年度	せん断余裕度	定着法	載荷速度	試験体名
H7	高い(Nシリーズ)	機械式	静的	N7MS
			動的	N7MD
	静的		B8MS	
	動的		B8MD	
H9	低い(Bシリーズ)	U字型	静的	B8US
			動的	B8UD
	高い(Nシリーズ)	機械式	静的	N1MS
			動的	N1MD
		U字型	静的	N1US
			動的	N1UD
H10	低い(Bシリーズ)	U字型	静的	BUCS
			動的	BUCD
	静的		BUVS	
	動的		BUVD	
	高い(Nシリーズ)		静的	NUVS
			動的	NUVD

*1 大成建設(株) 工修 (正会員)

*2 日本大学教授 理工学部海洋建築工学科 工博 (正会員)

*3 日本大学大学院 理工学研究科海洋建築工学専攻

D が動的載荷である。

3. 実験値最大耐力と計算値の比較

3-1. $V_{exp}/V_f - V_u/V_f$ 関係

図-1 に $V_{exp}/V_f - V_u/V_f$ 関係を示す。ここで、 V_{exp} は実験値最大耐力、 V_f 及び V_u は静的載荷の曲げ強度計算値とせん断強度計算値⁴⁾である。また、筆者等が行った実験結果との比較検討のため、他の機関で実施した既往の実験データ^{5)~9)}を図-1 に加えた。なお、引用したデータはRC造ト形試験体28体で静的載荷実験を行ったものである。破壊形式は、梁曲げ破壊型(B型)14体、接合部せん断破壊型(J型)7体、梁降伏後の接合部せん断破壊型(BJ型)7体である。

従来の強度推定式で算出し、筆者等が実施した静的載荷試験体は $V_u/V_f > 1.0$ の範囲では、実験値(V_{exp})が曲げ強度計算値(V_f)に良く対応しており、梁曲げ破壊を起こしていることに符合する。また、 $V_u/V_f < 1.0$ の範囲で、実験値(V_{exp})が曲げ強度計算値(V_f)を下回る試験体は、接合部せん断破壊を起こしているのに対し、実験値(V_{exp})が曲げ強度計算値(V_f)に近いもの、もしくは上回る試験体は梁曲げ降伏を経験し、その後接合部せん断破壊を起こしている。一方、動的載荷した試験体は静的載荷した試験体に比べ、

すべての試験体で V_{exp}/V_f が高いことが分かる。このことは、載荷速度の影響により最大耐力が上昇したもので設計上の耐力評価において、安全側に移行したことになる。また、引用した既往の実験データとでは、 $V_u/V_f > 1.0$ の範囲ではB型、 $V_u/V_f < 1.0$ の範囲ではJ型、 V_u/V_f が1.0付近及び $V_{exp}/V_f \geq 1.0$ の範囲ではBJ型と、筆者等の実施した実験結果と符合しており、実験値と計算値に対する破壊形式の関係を明瞭に示している。

3-2. ひずみ速度と材料強度上昇率

図-2 にひずみ速度の算出方法を、表-2 にひずみ速度の最大値及び材料強度上昇率を示す。ひずみ速度は梁端主筋(上端筋、下端筋)に貼付したひずみゲージの測定値から、計測インターバル間の変化量($\Delta \epsilon$)を求め、計測インターバル(Δt : 1/100秒)で除して算定する。なお、コンクリートのひずみ速度はコンクリートと主筋との附着強度が完全であり、圧縮側梁主筋のひずみ速度と等しいと仮定して評価した。図-2及び上述の仮定にもとづいて算出したひずみ速度を、次式(1)及び(2)の推定式¹⁰⁾に代入し材料強度上昇率を算出した。

【鉄筋】

$$df_y / sf_y = 1.2 + 0.05 \cdot \log |\epsilon_D| \quad \dots (1)$$

【コンクリート】

$$dF_c / sF_c = 1.38 + 0.08 \cdot \log |\epsilon_D| \quad \dots (2)$$

df_y : 鉄筋動的降伏点強度 sf_y : 鉄筋静的降伏点強度
 dF_c : コンクリート動的降伏点強度 sF_c : コンクリート静的降伏点強度
 ϵ_D : 動的ひずみ速度

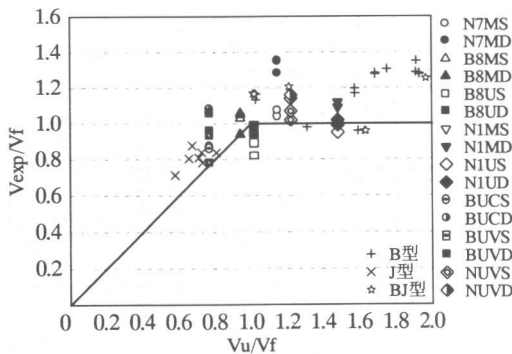


図-1 $V_{exp}/V_f - V_u/V_f$ 関係

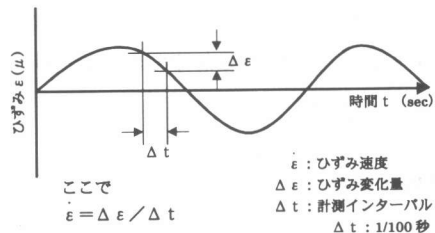


図-2 ひずみ速度の算出方法

表-2 材料強度上昇率

実験年度		平成7年		平成9年			平成10年		
試験体名		N7MD	B8MD	B8UD	N1MD	N1UD	BUCD	BUVD	NUVD
ひずみ速度	鉄筋	0.1481	0.0165	0.0284	0.0135	0.0374	0.0050	0.0044	0.0871
	コンクリート	-0.0097	-0.0090	-0.0112	-0.0254	-0.0187	-0.0045	-0.0052	-0.0060
上昇率	鉄筋	1.1585	1.1108	1.1227	1.1064	1.1286	1.0847	1.0821	1.1470
	コンクリート	1.2190	1.2162	1.2240	1.2524	1.2417	1.1921	1.1975	1.2021

当研究室で行った実験によって得られたひずみ速度の範囲は鉄筋で $10^{-3} \sim 10^{-1} \text{sec}^{-1}$ 、コンクリートで $10^{-3} \sim 10^{-2} \text{sec}^{-1}$ であった。このひずみ速度は試設計した RC 造建物の応答解析結果より得られたものと同じレベルであった。また、このひずみ速度の値に対して、鉄筋の降伏強度は 8~16% 程度、コンクリートの圧縮強度では 19~25% 程度上昇することが分かった。これらの材料強度上昇率は、地震時における接合部の力学的性状に影響を与える大きな要因であり、設計上十分考慮する必要がある。

3-3. 材料強度上昇を考慮した諸強度計算値

動的実験を行った試験体に対しては、前節で求めたひずみ速度に基づく動的材料強度を用いて諸強度計算値を算出し、実験結果との比較を試みた。図-3 は、このひずみ速度の影響を考慮したときの $V_{exp}/V_f - V_u/V_f$ 関係である。

ひずみ速度による材料強度上昇を考慮した場合、B8M を除くすべての試験体で、動的載荷の V_{exp}/V_f は静的載荷の値に近づく傾向が見られた。このことは、従来の強度推定式において材料強度上昇を考慮すれば動的載荷強度を推定できることを示している。また、静的載荷に比べ動的載荷の V_u/V_f が大きな値を示している。これは、せん断余裕度の上昇を意味するものであり、B シリーズ試験体では破壊形式が接合部せん断破壊から梁曲げ破壊への移行があり得ることを、N シリーズ試験体では、梁曲げ破壊がより強まることを示している。また、引用した既往の実験データとの比較において、静的載荷時では J 型付近に位置していた試験体(BUC, BUVD)が、

動的載荷時では B 型もしくは BJ 型の方向への移動が見られる。即ち、従来の設計において、もっともエネルギー吸収の良い破壊形式である梁曲げ破壊への移行を意味し、安全側に化したことになる。

3-4. 実験値最大耐力と計算値

表-3 に実験値最大耐力と計算値⁴⁾の比較を示す。せん断余裕度の高い N シリーズ試験体の実験値は、破壊形式である梁曲げ計算値に良く対応している。一方、せん断余裕度の低い B シリーズ試験体でも実験値は静的載荷では破壊形式に符合した計算値と良く対応している。さらに、動的載荷において、破壊形式の移行が見られた試験体の実験値はその変化した破壊形式に対応する計算値と一致しているのに対し、破壊形式の移行が顕著でなかった B8U 試験体及びコーン破壊を起こした B8M 試験体の実験値はいずれも計算値を下回る結果となった。

動的載荷と静的載荷を比較すると、B8M を除くすべての試験体で、ひずみ速度の違いによる耐力上昇が見られた。また、梁曲げ破壊した試

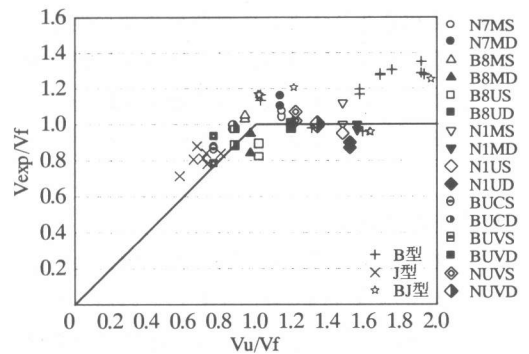


図-3. $V_{exp}/V_f - V_u/V_f$ 関係

表-3 実験値最大耐力と計算値の比較

実験年度		試験体名		平成7年		平成9年				平成10年																							
実験値 [kN]	静的載荷	正負	N7M	B8M	B8U	N1M	N1U	BUC	BUV	NUV																							
			92.3	110.8	106.4	91.4	77.3	82.8	74.4	60.8																							
動的載荷	正負	95.0	113.8	97.9	81.4	77.3	82.0	88.0	63.6																								
		119.1	114.7	117.9	88.8	80.9	100.5	91.1	68.2																								
		113.2	101.4	112.9	91.4	83.5	102.9	100.8	69.4																								
最大耐力上昇率 [%]		正負	29.0	3.4	10.8	-2.9	4.6	21.4	22.5	12.3																							
			19.2	-10.9	15.3	12.3	8.0	25.4	14.6	9.1																							
計算値 [kN]	梁曲げ	静的	88.5				108.0				116.4		81.8		95.1		59.7																
		動的	102.8				120.6				130.7		91.1		92.8		104.0		103.8		69.0												
	接合部せん断	静的	102.1				102.1				121.4				72.9																		
		動的	117.2				117.0				139.8				142.1				141.2				91.6				91.9				92.1		
	支圧	静的	142.6				158.8				-				115.3				-				-										
		動的	152.8				170.0				-				123.2				-				-										

験体に比べ、接合部せん断破壊した試験体の方が耐力上昇率は大きく 15~30%程度の耐力上昇が見られた。これは、梁端主筋よりも接合部内コンクリートの材料強度上昇率が大きく、接合部耐力が上昇したためであると考えられる。一方、B8M 試験体では、静的載荷時に接合部せん断破壊と定着部の引き抜きコーン破壊で耐力が決まり、動的載荷時は梁主筋の降伏後、定着部の押し抜きコーン破壊により耐力が決まり、これら両者の試験体に耐力の差が見られなかった。今後、施工の合理化をめざし機械式定着の使用が増大することが予測されるが、設計地震時に接合部がコーン破壊のような脆性的な破壊を引き起こす可能性があることを十分考慮する必要がある。

4. せん断余裕度と破壊形式

表-4 にせん断余裕度と破壊形式を、図-4 に最終破壊状況を示す。載荷速度の違いにより材料強度が上昇することは前述したとおりである。このことは、単に部材耐力を上昇させるだけではなく、接合部の破壊性状が変化することによって構造物全体としての強度や変形性能にも大きな影響を及ぼす可能性があることを示唆している。以下に静的及び動的載荷実験を行った試験体のせん断余裕度と破壊形式の関係を示す。

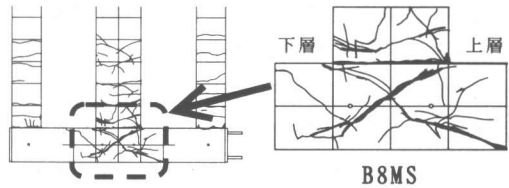
[Bシリーズ試験体]

すべての試験体で、載荷速度の変化によりせん断余裕度が 3~13%程度上昇している。それに伴い、破壊形式が接合部せん断破壊(J)から梁曲げ破壊(B)もしくは梁曲げ降伏を経験する接合部せん断破壊(BJ, JB)に移行している。また、最終破壊状況においても、動的載荷実験ではひび割れの本数が減少し、接合部の損傷が軽減していることが分かる。即ち、動的載荷時において、せん断余裕度の上昇は破壊形式を接合部せん断破壊から梁曲げ破壊へ移行させるものであり、従来の設計においては安全側に評価できることを示唆する。

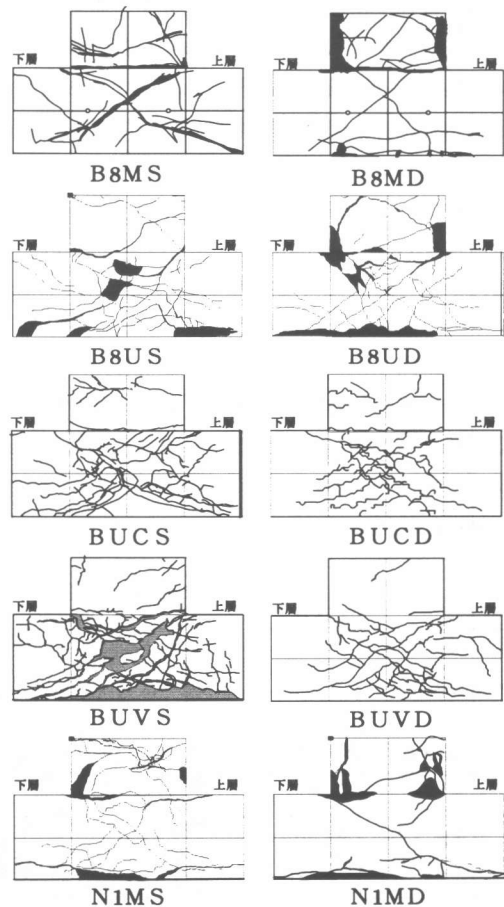
表-4. せん断余裕度と破壊形式

試験体	せん断余裕度		破壊形式		
	静的(S)	動的(D)	静的(S)	動的(D)	
N7M	1.21	1.20	BJ + S	BJ	
B8M	0.97	1.01	J + CT	B + CC	
B8U	1.06	1.09	J	JB	
N1M	1.60	1.70	B + CC	B + CC	
N1U	1.60	1.65	B + T	B	
BUC	0.78	0.90	J	BJ	
BUV	引張軸力	0.78	0.91	J	JB
	圧縮軸力			JB	BJ
NUV	引張軸力	1.27	1.41	B	B
	圧縮軸力			B	B

B: 梁曲げ破壊 J: 接合部せん断破壊 S: 支圧破壊
 BJ: 梁曲げ降伏後接合部せん断破壊 T: 定着破壊
 JB: 梁曲げ降伏とほぼ同時に接合部せん断破壊
 CC: 押し抜きコーン破壊 CT: 引き抜きコーン破壊



接合部の破壊に着目するため、接合部の周辺を拡大表示
 ※最終破壊状況の詳細は参考文献 1) 2) 3) を参照されたし。



[Nシリーズ試験体]

N7Mを除く試験体で、載荷速度の変化によりせん断余裕度が5~14%上昇している。しかし、Nシリーズは梁曲げ破壊が先行するように設計された試験体のため、接合部せん断耐力は上昇するが破壊形式の移行は見られない。また、最終破壊状況においても、動的載荷時の接合部の損傷は少なく、従来の強度算定式を用いて設計しておけばより安全側の値を与えることになる。一方、N7M試験体はせん断余裕度の上昇がなく、破壊形式の移行も見られなかった。この原因として、①接合部せん断補強筋量の不足、②コンクリートに比べ鉄筋の材料強度上昇率が高く、接合部せん断耐力の上昇が少ないことなどが考えられる。また、せん断余裕度が1.2程度では、他のNシリーズ試験体よりも接合部の損傷が激しいことが分かる。

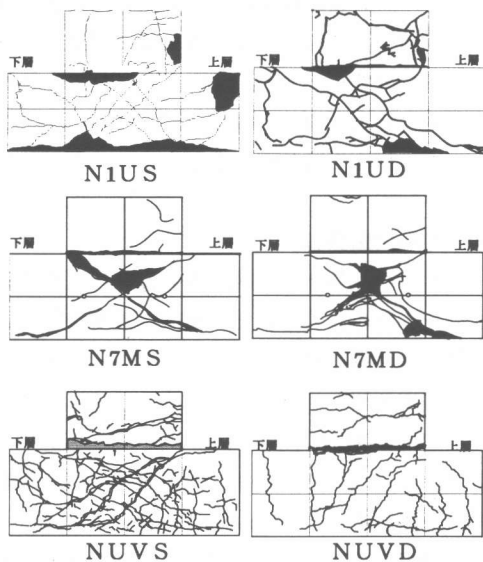


図-4 最終破壊状況

5. 変形成分の分析

載荷速度が、梁・柱・接合部に及ぼす影響を調べるために、梁加力点位置で測定した変形を梁の変形、柱の変形及び接合部の変形の各成分に分離し比較検討した。図-5に全体変形に対する各変形成分比を示す。

[Bシリーズ試験体]

B8M試験体は静的及び動的載荷ともに初期の段階から梁及び柱の変形成分が大部分を占めている。層間変形角が進むにつれ、接合部の変形成分は増加するもののその値は小さく、最終的には梁の変形成分が大きな値となる。このことは、単に梁の曲げ変形が増加しているのではなく、コーン破壊による影響であると考えられる。B8U試験体では、接合部変形成分が変わらないにもかかわらず、動的載荷によって柱の変形が減少するのに伴い梁の変形が増加している。また、BUC試験体はせん断余裕度の上昇に伴い、梁変形成分比が増加しているのに対し、柱成分は変化せず接合部変形成分が減少している。これは、静的載荷で接合部せん断破壊したものが、動的載荷では梁曲げ降伏を経験する接

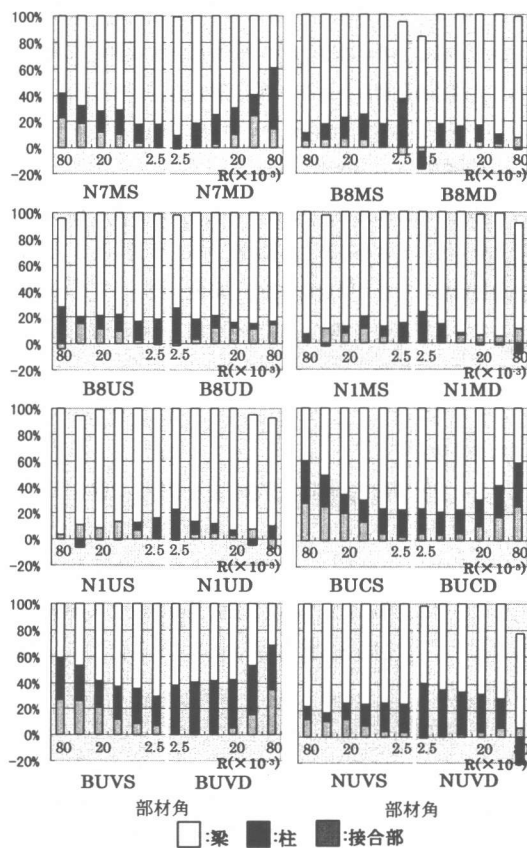


図-5 変形成分比

合部せん断破壊に破壊形式が変化したことに符合する。BUV 試験体は静的載荷時に初期の段階から接合部変形成分が見られるのに対し、動的載荷では最大耐力を迎えるまで接合部の変形は小さく、柱変形成分の影響が大きいことが分かる。

[N シリーズ試験体]

すべての試験体で載荷速度の違いによる変形成分比の違いが見られる。梁曲げ破壊をした試験体では、柱の変形成分比はわずかで、全体変形に対する梁変形成分比の占める割合は大きい。また、静的載荷における接合部変形成分は10%以下と小さな値であるが、動的載荷の接合部変形成分はさらに小さな値を示した。

梁曲げ降伏後に接合部せん断破壊を起こしたN7M 試験体では、静的及び動的載荷ともに最大耐力を迎えるまでは梁の変形成分比が大きく、その後、接合部の変形成分が増加する。また、静的載荷と動的載荷を比較すると、静的載荷では初期の段階から接合部変形が見られるのに対し、動的載荷ではせん断余裕度の上昇に伴い、接合部変形成分が減少している。

即ち、載荷速度の違いによるせん断余裕度の上昇は、接合部のせん断変形成分を抑制する方向に働くことがわかった。また、すべての試験体で破壊形式に符合した変形成分比を確認することができた。

6. まとめ

静的及び動的載荷実験結果を詳細に検討し、以下の知見を得た。

(1) 従来の強度推定式で算出した計算値に対して、動的載荷した試験体の実験値最大耐力は大きく、設計上の耐力評価において安全側に移行する。

(2) 地震時に RC 造建物が経験するひずみ速度は、鉄筋の降伏強度を 8~16% 程度、コンクリートの圧縮強度を 19~25% 程度上昇させる。

(3) 従来の強度推定式において材料強度の上昇率を考慮すれば動的載荷時の諸強度を算定

できる。

(4) B シリーズ試験体では、せん断余裕度の上昇に伴い、破壊形式が接合部せん断破壊から梁曲げ破壊に移行する。

(5) 載荷速度の違いによるせん断余裕度の上昇は、接合部の変形を拘束し、せん断破壊の発生を抑えている。

以上のことから、地震時に RC 造ト形柱梁接合部が経験するひずみ速度は、接合部耐力を上昇させ、破壊形式をエネルギー性能の良い梁端曲げ破壊へ移行させる。即ち、設計上では安全側に評価できることが分かる。しかし、定着などの違いによっては脆性的な破壊を起こす可能性があるため、設計の際には注意を要する。

[謝辞]

本研究は、文部科学省学術フロンティア推進事業（日本大学理工学部）・研究課題「環境防災都市に関する研究」（研究代表者：理工学研究所長：川幡長勝）の一環として実施したものである。関係者各位に感謝の意を表す。

[参考文献]

- 1) 奥田明久ほか：機械式定着法を用いた鉄筋コンクリート造ト形柱梁接合部の動的な定着性に関する実験的研究。コンクリート工学年次報告集, Vol.18, No.2, pp.971-976, 1996
- 2) 中西三和ほか：鉄筋コンクリート造ト形柱梁接合部の力学的性状に及ぼす載荷速度の影響に関する実験的研究。コンクリート工学年次報告集, Vol.20, No.3, pp.553-558, 1998
- 3) 山田高史ほか：変動軸力を受ける鉄筋コンクリート造ト形柱梁接合部の力学的性状に関する実験的研究。コンクリート工学年次報告集, Vol.21, No.3, pp.637-642, 1999
- 4) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の耐震性能保証型耐震設計指針(案)・同解説。日本建築学会, pp.241-277, 1997.7
- 5) 林ほか：鉄筋コンクリート造ト形柱・梁接合部の力学的性状に関する実験的研究。日本建築学会大会, 構造Ⅱ, pp.479-480, 1989
- 6) 河内ほか：高強度鉄筋コンクリート外柱梁接合部の挙動に関する実験的研究。日本建築学会大会, 構造Ⅱ, pp.395-396
- 7) 高強度材料を用いた RC 外柱梁接合部の剪断抵抗性状。日本建築学会大会, 構造Ⅱ, pp.641-642, 1991
- 8) 佃ほか：高層 RC 造建築物の柱梁接合部に関する実験的研究。日本建築学会大会, 構造Ⅱ, pp.691-692, 1991
- 9) 田才ほか：梁主筋を機械式定着した外部柱・梁接合部のせん断性状。日本建築学会大会, 構造Ⅱ, pp.857-858, 2000
- 10) 小谷俊介：解説・鉄筋コンクリートにおける載荷速度の影響。コンクリート工学, Vol.21, No.11, 1983.11
- 1) 1) 細矢ほか：地震時のひずみ速度の影響による鉄筋コンクリート部材の耐力の増大と破壊モードとの関係に関する研究。日本建築学会構造系論文集, No.492, pp.69, 1997.2
- 2) 日本建築センター：「構造計算指針・同解説」日本建築センター 出版部 pp.229-232 1991.7