

柱・梁接合部の動的耐力・変形性能に関する繰返し载荷実験

運上茂樹¹・寺山 徹²・林 昌弘³

¹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）

²正会員 工修 首都高速道路公団 神奈川建設局調査課長補佐（〒231-0016 横浜市中区真砂町2-25関内中央ビル）

³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）

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⁾においてRC一層ラーメン橋脚に対する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された。また、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。例えば、コンクリート標準示方書²⁾では、ラーメン構造の構造細目として「柱とはりの接点部付近では、帯鉄筋またはスターラップを密に配筋しなければならない」という規定があるのみで、具体的な設計法は規定されていない。これに対して、海外では、米国のカリフォルニアを中心に研究が進められており、柱・梁接合部の圧縮ストラットに期待する方法等いくつかの設計手法が提案されている。

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た繰返し载荷実験結果とそれを解析的に検討した結果を報告するものである。

2. 柱・梁接合部の繰返し载荷実験

(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载荷を行

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。载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 δy 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、図-2に示すように、梁の軸方向鉄筋はD13×17本であり、帯鉄筋はD6を125mmピッチとし、断面内に2本の間帯鉄筋を配筋した。柱には軸方向鉄筋としてD13を16本配筋し、帯鉄筋はD6を125mmピッチとし、断面内に2本の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V耐震設計編に基づいて配筋したものである。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及びCASE2供試体の柱にはPC鋼棒により54tfの軸力を導入した。これは応力度として15kgf/cm²に相当する。

これに対し、CASE3、4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。

CASE3供試体は、梁の軸方向鉄筋としてD19を16本配置し、帯鉄筋としてD6を150mmピッチとし、断面

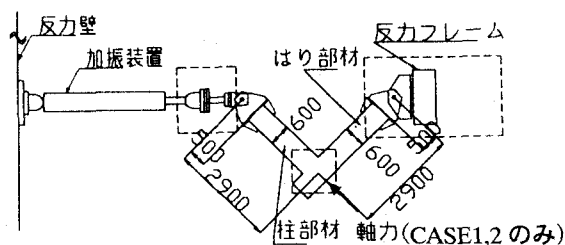


図-1 実験状況

表－１ 実験供試体

供試体	CASE 1	CASE 2	CASE 3	CASE 4
梁	軸方向鉄筋	17-D13	17-D13	16-D19
	帯鉄筋	D6ctc250	D6ctc250	D6ctc150
	軸方向鉄筋比	0.60%	0.60%	1.27%
	横拘束筋体積比	0.24%	0.22%	0.62%
柱	軸方向鉄筋	16-D13	16-D13	20-D19
	帯鉄筋	D6ctc125	D6ctc125	D10ctc125
	軸方向鉄筋比	0.56%	0.56%	1.59%
	横拘束筋体積比	0.36%	0.19%	0.53%
柱への軸力導入		有	有	無
配筋方法		H8道示	H2道示	H8道示

内に2本の中間帯鉄筋を配筋した。柱には軸方向鉄筋として D19を20本配筋し、帯鉄筋はD6を125mmピッチとし、断面内に2本の中間帯鉄筋を配筋した。

CASE4供試体は、梁の軸方向鉄筋としてD25を16本配置し、帯鉄筋は D10を250mmピッチとし、断面内に2本の中間帯鉄筋を配筋した。柱には軸方向鉄筋としてD25を20本配筋し、帯鉄筋はD10を125mmピッチとし、断面内に2本の中間帯鉄筋を配筋した。

各供試体のコンクリート圧縮強度および鉄筋降伏強度を表－2に示す。

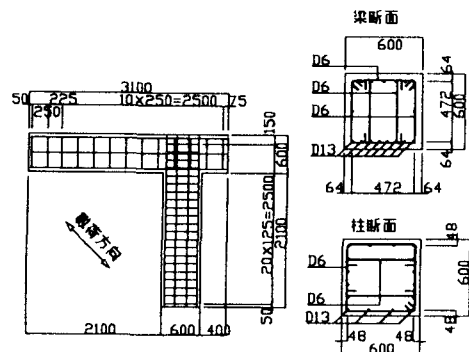
(2) 実験結果

CASE1供試体は、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9δy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CASE 1 供試体と同様に、柱・梁接合部にひび割れは発生せず、9δy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。

これに対してCASE3供試体では4δy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。5δy載荷時にさらにひび割れが進展し、大きく耐力が低下した。

CASE4供試体では、2δy載荷時で、柱・梁接合部



図－２ 供試体配筋図 (CASE 1)

表－２ 材料試験結果

供試体	コンクリート圧縮強度 (kgf/cm ²)	鉄筋降伏強度(kgf/cm ²)	
		軸方向鉄筋	横拘束筋
CASE 1	274	3762	3620
CASE 2	296	3762	3620
CASE 3	312	3696	3446
CASE 4	314	3909	3738

に斜めひび割れが発生し、3δy載荷時でこのひび割れが大きく進展し耐力が低下した。図－3に各供試体の荷重－変位関係を示す。ここで示している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－3によると、CASE 1, 2供試体が8δy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5δyで、CASE4供試体は3δyで大きく耐力が低下しているのがわかる。また、CASE3, 4供試体では載荷に伴い梁外面に多数のひび割れが発生し軸方向鉄筋の付着力が低下したため履歴曲線が正負で異なる結果となった。

3. 解析手法

供試体の損傷モードと比較して、柱・梁接合部を対象として剛域の仮定が成り立つか、また仮定できない場合でも地震時にぜい性的な損傷を生じないようになれるかの検討を行った。解析手法としては、(1)柱・梁接合部のコンクリートの圧縮ストラットによる力の伝達に期待する方法、(2)接合部に生じる引張主応力度とコンクリートの引張強度を比較する方法、(3)トラス理論によりせん断耐力を算出する方法、の3種類とした。

(1) 柱・梁接合部のコンクリートの圧縮ストラットによる力の伝達に期待する方法

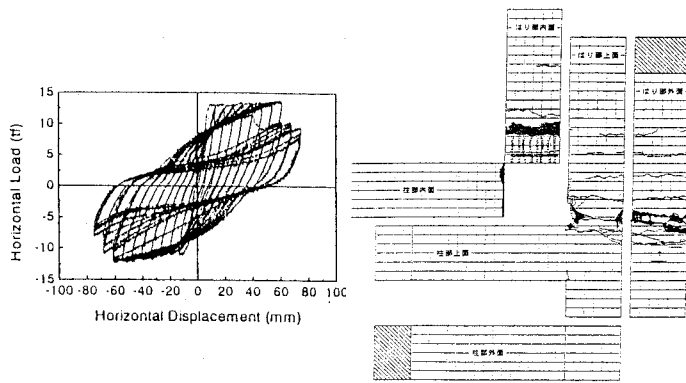
鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説³⁾第7章「柱梁接合部」によると、柱・梁接合部のせん断力Vjhは、図－4に示すような、梁および柱が終局曲げモーメントMuに達した時の力のつり合いから次式により求められる。

$$V_{jh} = Tr + Cl \quad (1)$$

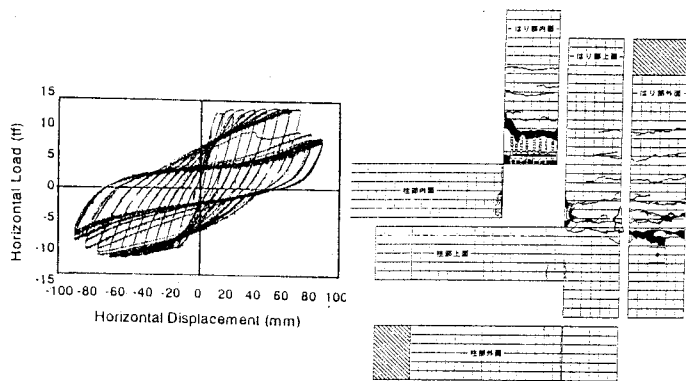
本実験においてはCl=0であるので、

$$V_{jh} = Tr = Mu/hb \quad (2)$$

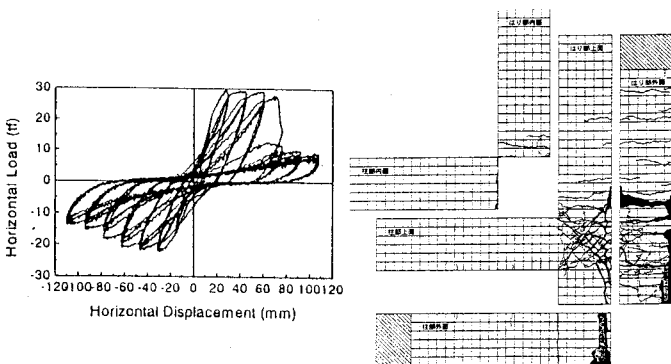
同指針では、柱・梁接合部のせん断強度に関しては梁と柱の圧縮領域を結ぶ対角線上の斜めコンクリート圧縮束を介しての力の伝達を期待しており、接合部の横補強筋の効果は期待していない。横補強筋の役割としては接合部の強度増大ではなく剛性の確保を期待し、横補強筋の最小鉄筋量を規定している。



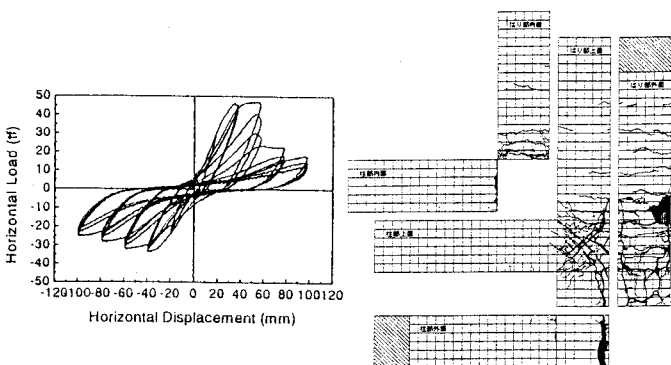
(1) CASE1供試体



(2) CASE2供試体



(3) CASE3供試体



(4) CASE4供試体

図-3 各供試体の荷重-変位履歴曲線と最終変状

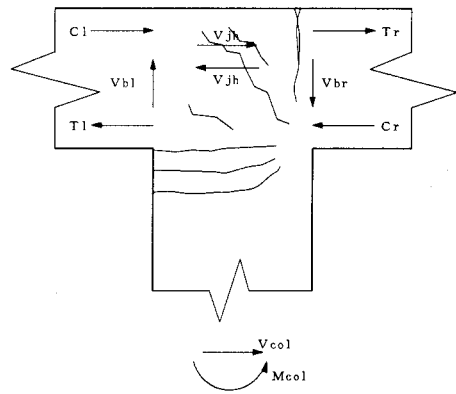


図-4 T型接合部の力のつり合い

なお、本解析では横補強としてはりの側面鉄筋と柱の帯鉄筋を考慮する。接合部のせん断耐力 V_{ju} は(3)式により算出される。

$$V_{ju} = k \cdot \sigma_{ck} \cdot b_j \cdot h_c \quad (3)$$

ここに、 k はT型接合部では0.18

σ_{ck} はコンクリートの圧縮強度

b_j は接合部の奥行長さ

h_c は柱の断面高さ

また横補強筋の鉄筋比 p_{jh} は0.002以上かつ(4)式を満足するものとされている。

$$p_{jh} \geq 0.003 \cdot V_{jh} / V_{ju} \quad (4)$$

(2) 接合部に生じる引張主応力度とコンクリートの引張強度を比較する方法

T型の接合部の力のつりあいは図-4と同様に考える。したがって、接合部のせん断力 V_{jh} は(1)式により $V_{jh} = M_u / h_b$ であるから、せん断応力度 v_j は、

$$v_j = V_{jh} / (b_j \times h_c) \quad (5)$$

となる。また接合部の鉛直方向の応力度 f_v は、

$$f_v = P_{axial} / (b_j \times h_c) \quad (6)$$

として求められる。ここに、 P_{axial} は、慣性力による軸力の変動の影響を考慮に入れた柱に作用する軸圧縮力とする。したがって、接合部における引張主応力度 p_t は図-5に示すモールの応力円による解法により(7)式によって算出される。

$$p_t = \frac{f_v}{2} - \sqrt{\left(\frac{f_v}{2}\right)^2 + v_j^2} \quad (7)$$

この引張主応力度 p_t がコンクリートの引張強度より大きければひび割れは生じず、接合部が剛域として挙動することを期待できる。

(3) トラス理論によりせん断耐力を算出する方法

接合部のせん断力 V_{jh} を(1)の方法で算出し、せん

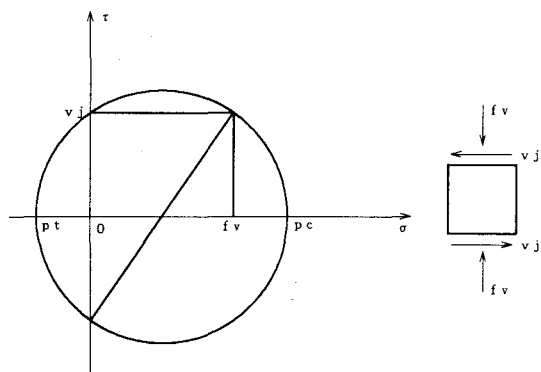


図-5 モールの応力円

断耐力を道路橋示方書Ⅴ耐震設計編(平成8年12月)で規定している(8)式で算出する。

$$P_s = S_c + S_s \quad (8)$$

ここに、 S_c はコンクリートが負担するせん断耐力であり、 S_s は帯鉄筋が負担するせん断耐力である。また隅角部における鉄筋が負担するせん断耐力には、柱の帯鉄筋に加えはりの側方鉄筋が影響することが想定される。ここでは、はりの側方鉄筋を片側あたり3本として計算した。

4. 実験結果と解析との比較

3つの解析手法による検討結果を表-3に示す。

(1)の柱・梁接合部のコンクリートの圧縮ストラットによる力の伝達に期待する方法では、各ケースとも十分なせん断耐力があるはずであったが、CASE3、4供試体では柱・梁節点部からぜい性的な破壊が生じた。また最小横補強筋量については、柱の帯鉄筋のみでは最小横補強筋量を満足していないが梁の側面鉄筋を考慮すればそのみで最小横補強筋量を満足する結果となるため、柱の帯鉄筋と梁の側面鉄筋を考慮することで最小横補強筋量は満足していた。

(2)の接合部に生じる引張主応力度とコンクリートの引張強度を比較する方法では、CASE1、2供試体は引張主応力度がコンクリートの引張強度の約30%であり、接合部が剛域として挙動すると予測され、実験結果と一致した。またCASE3供試体は引張主応力度がコンクリートの引張強度とほぼ等しく、剛域として挙動する境界付近であろうと予測されたが、実験結果ではひび割れが発生し剛域として挙動しなかった。CASE4供試体は、引張主応力度がコンクリートの引張強度の約180%であり、接合部は剛域として挙動しないと予測され、実験結果が一致した。

(3)のトラス理論によりせん断耐力を算出する方法では、各ケースとも側方鉄筋を考慮することによりせん断耐力を確保していたが、CASE3、4供試体で

表-3 解析検討結果

	CASE1	CASE2	CASE3	CASE4
(1)コンクリートの圧縮ストラットによる力の伝達に期待する方法				
せん断力 V_{jh} (tf)	40.6	40.6	85.3	153.9
せん断耐力 V_{ju} (tf)	177.6	191.8	202.2	203.5
$V_{ju} > V_{jh}$	OK	OK	OK	OK
横補強鉄筋比 P_{jh}	0.0030	0.0030	0.0024	0.0047
$P_{jh} \geq 0.002$	OK	OK	OK	OK
$P_{jh} \geq 0.003 V_{jh} / V_{ju}$	OK	OK	OK	OK
(2)引張主応力度とコンクリートの引張強度を比較する方法				
せん断応力度 V_j (kgf/cm ²)	12.5	12.5	23.7	42.8
鉛直方向応力度 f_v (kgf/cm ²)	14.8	15.8	0.0	0.0
引張主応力度 P_t (kgf/cm ²)	7.1	6.9	23.7	42.8
コンクリートの引張強度 σ_t (kgf/cm ²)	21.0	22.2	22.9	23.0
$\sigma_t > P_t$	OK	OK	OUT	OUT
(3)トラス理論によりせん断耐力を算出する方法				
せん断力 V_{jh} (tf)	40.6	40.6	85.3	153.9
せん断耐力 P_s (tf)	59.8	59.8	113.6	202.9
$P_s > V_{jh}$	OK	OK	OK	OK
実験結果				
柱・梁接合部の損傷	無	無	有	有

実験結果と一致しなかった。ちなみに、側方鉄筋を考慮しない場合には全ケースともせん断耐力は確保できないことになり、CASE1およびCASE2の結果と一致しない。

5. 結論

本研究の結果は以下のようにまとめられる。

- (1) R C ラーメン橋脚の柱・梁接合部の模型供試体に対して繰返し載荷実験を行った結果、柱・梁接合部にひび割れが生じなかった供試体では、接合部は剛体として挙動し、損傷は梁部材に生じた。この場合、安定した変形性能が得られた。
- (2) 柱・梁接合部の動的耐力・変形性能を算定する方法としては、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が実験結果と比較的よく一致した。この場合、引張主応力度がコンクリートの引張強度の3割程度の供試体では柱・梁接合部にひび割れは発生しなかった。しかし同等あるいはそれ以上となる供試体では、繰返し載荷に伴い柱・梁接合部に斜めひび割れが生じ、安定した変形性能は得られなかった。

参考文献

- (1) (社) 日本道路協会：道路橋示方書Ⅴ，平成8年12月
- (2) (社) 土木学会：平成8年度版コンクリート標準示方書〔設計編〕
- (3) (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