

鉄筋コンクリート部材の損傷評価

その1: コンクリートの応力歪特性に歪速度が与える影響
その2: 鉄筋コンクリート梁・柱接合部の性能評価

河野 進¹・藤井 栄²・西山 峰広²・渡辺 史夫³

1 工博 京都大学助手 工学研究科 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)
2 工博 京都大学助教授 工学研究科 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)
3 工博 京都大学教授 工学研究科 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

Two types of experimental studies are being conducted to evaluate damage process of reinforced concrete members under seismic loadings. The experiment on 72 cylinder specimens has been completed and the results are being analyzed to study strain rate effects on the stress-strain relation of confined concrete. The experiment on 8 beam-column joints with different bar anchorage details are to be carried out soon and the shear capacity of joints is investigated. This paper explains the research background obtained in the feasibility study and the scope of two experiments.

Key Words: Confinement, strain rate, beam-column joints, shear, anchorage

1. はじめに

筆者等は、鉄筋コンクリート部材の損傷評価を行うために重要と考えられる2つの事柄について実験的研究を行っている。本論文では、これらの研究の背景と実験概要の紹介を行う。

2. コンクリートの応力歪特性に歪速度が与える影響について

(1) 研究の背景と目的

建築物の梁や柱等が地震による動的荷重を受ける場合、せん断補強筋等の拘束及び歪速度の影響を受け、コンクリートの応力-歪関係が変化するといわれている。拘束コンクリートの軸応力-軸歪関係に与える歪速度の影響は1980年代から海外において、Ahmad等¹⁾、Dilger等²⁾、Soroushian³⁾⁴⁾等により研究が行われている。これらの研究では、歪速度の増加に伴い最大圧縮強度、弾性係数、最大耐力以降の剛性等の物理量は増加すること、配筋間隔はこうした3項目の増加率には影響しない事等が明らかにされた。しかし、最大軸応力やその時の歪の増加率影響因子については研究者により意見の相違がある。また、荷重中の横拘束の程度

がどのように変化したかについてはこれまで報告されておらず、上記の物理量の増加が拘束の増加によるものか歪速度に依存するものなのか明らかでない。

本研究は、歪速度が拘束コンクリートの軸応力-軸歪関係に与える影響を、スパイラル筋で拘束されたコンクリートシリンダーを用いた実験で定量化しモデル化を行うことを目的とするが、特に以下の点に着目するものとする。

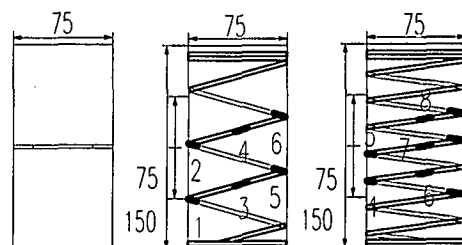
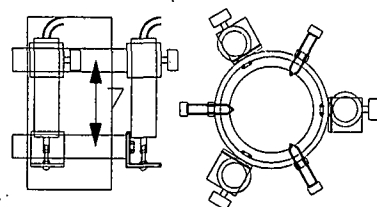
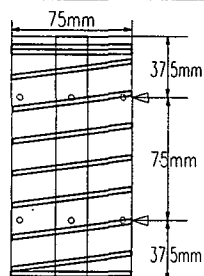
1. 無拘束コンクリート圧縮強度、歪速度、拘束の程度、寸法及び形状を実験変数として、これらの物理量が拘束コンクリートの軸応力-軸歪関係に与える影響を定量化すること。
2. 実験時の横拘束力の変化を、拘束筋として用いたスパイラル筋の伸び歪から算出し、動的荷重条件下の拘束コンクリートの軸応力-軸歪関係に関わる様々な物理量の変化が、歪速度に依存するものか拘束量の変化に依存するものかを明らかにする。
3. 歪速度の変化により、破壊や損傷の形態にどのような変化が生じるかを観察する。

(2) 実験概要

試験体はφ75mm×150mmの円柱形であり、これを図1(a)に示す。試験体の内部には、軸方向変形を計測する

表-1 試験体名と実験変数

名称			実験変数				実験結果					
セット名	シリーズ名	試験体数	公称コンクリート強度 (MPa)	拘束用スパイラル筋		設定歪速度 (1/s)	平均歪速度 (1/s)	平均最大軸力 (MPa)	平均最大軸歪感度 α	平均最大軸歪 (%)	平均最大軸歪感度 β	
				公称降伏強度 (MPa)	鉄筋量 (%)							
30N0	30AN0	3	30	None	None	3.10E-05	3.10E-05	29.2	1.00	0.23	1.00	
	30BN0	3					1.17E-03	1.30E-03	31.6	1.08	0.22	0.94
	30CN0	3					1.17E-02	1.69E-02	33.9	1.16	0.17	0.74
	30DN0	2					1.34E-01	1.32E-01	38.9	1.33	0.28	1.20
30H1	30AH1	2		850	0.88	3.50E-05	3.50E-05	36.0	1.00	1.92	1.00	
	30CH1	3					1.34E-02	1.44E-02	39.9	1.11	1.52	0.79
30H2	30AH2	3		850	1.76	3.10E-05	3.10E-05	63.2	1.00	2.87	1.00	
	30BH2	3					2.01E-03	1.81E-03	62.6	0.99	3.11	1.08
	30CH2	3					1.34E-02	1.37E-02	64.2	1.02	2.65	0.92
	30DH2	3					1.34E-01	1.53E-01	66.6	1.06	2.57	0.89
30L2	30AL2	3		300	1.76	3.50E-05	3.50E-05	41.1	1.00	1.42	1.00	
	30CL2	3					1.34E-02	1.48E-02	44.3	1.08	1.15	0.81
35N0	35AN0	3	35	None	None	3.10E-05	3.30E-05	35.4	1.00	0.21	1.00	
	35BN0	4					1.17E-03	1.23E-03	39.7	1.12	0.17	0.82
	35CN0	3					1.18E-02	1.36E-02	44.7	1.26	0.19	0.93
	35DN0	2					1.34E-01	1.32E-01	46.9	1.32	0.25	1.21
35H1	35AH1	2		850	0.88	3.10E-05	3.10E-05	47.0	1.00	1.24	1.00	
	35CH1	4					1.17E-02	1.55E-02	47.3	1.01	0.67	0.54
35H2	35AH2	3		850	1.76	3.10E-05	3.10E-05	72.7	1.00	1.55	1.00	
	35BH2	3					1.17E-03	1.19E-03	73.9	1.02	1.31	0.84
	35CH2	3					1.17E-02	1.24E-02	74.3	1.02	1.48	0.96
	35DH2	2					1.34E-01	1.61E-01	76.2	1.05	1.33	0.86



(a) 試験体寸法

(b) 変位計による軸方向歪測定

(c) 3種類の拘束と横歪用ゲージ位置

図-1 試験体図

ため、供試体上下端から37.5mmの位置に三つまたの鉄製治具を埋め込んだ。これは図1(b)に示すような軸方向変形を計測する3本の変位計の取り付け治具を固定するために用いられる。また、変位計とは別に検長67mmの歪ゲージを3枚軸方向に貼付した。図1(c)に示すように、横拘束には無拘束のもの・拘束が小さいもの及び大きいものの3種類を用意した。拘束小及び大のスパイラルピッチはそれぞれ20mm及び40mmである。横拘束スパイラル筋は、高強度鉄筋(直径2.9mm, 引張降伏強度855MPa)及び普通強度鉄筋(直径3.0mm, 引張降伏強度307MPa)の2種類を用いた。

それぞれ変位計及び歪ゲージから求めた値の平均値であり、それらの値が最大軸応力まではほぼ同じであることがわかる。異なる方法で得られた2つの軸歪がほぼ等しいことから、両者は、検長区間の歪を良く表していると思われる。本論文では、特に断らない限り、変位計から求めた軸歪を用いて議論を進める。図2より、歪速度が大きいと軸歪は一定の割合で増加していないことが分かる。こうした、試験体における歪速度を表すため、本研究では最大軸応力の1/3及び最大軸応力時の2つの歪を直線補間し、この直線の傾きをもって歪速度とした。図2の各図において、2つの白丸はこの2点を示す。

(3) 実験結果

図2は、2つの軸歪と軸応力の時刻歴の例を2つの試験体について示す。図2(a)におけるに2つの軸歪は、

図3(a)(b)(c)は、表1に示す平均最大軸応力の歪速度感度 α の値が、歪速度に伴ってどう変化するかを、拘束の程度別に示したものである。ここで、白抜きの

点は各歪速度における平均値であり、基本コンクリート強度が同じもの同士が直線で結ばれている。図3(a)(b)(c)と拘束が大きくなるに従い、平均を結ぶ線の傾きが小さくなる。そこで、拘束がないと歪速度が大きいほど最大軸応力は大きくなるが、拘束が大きな試験体では歪速度が変化しても最大軸応力はほとんど変化しないことがわかる。

図3(d)(e)(f)は、やはり表1に示す平均最大軸応力時軸歪の歪速度感度 β の値と歪速度の関係を示したものである。(d)の無拘束のものでは、歪速度が静的から上昇するにつれ、歪速度0.01(1/s)まで β 値は減少するが、これ以上の歪速度では β 値が上昇に転じている。これに対し、拘束した試験体結果を示す(e)及び(f)では歪速度の増加に伴い β 値はほぼ一定、またはわずかであるが単調減少の傾向がみられる。

(4) 今後の研究方針

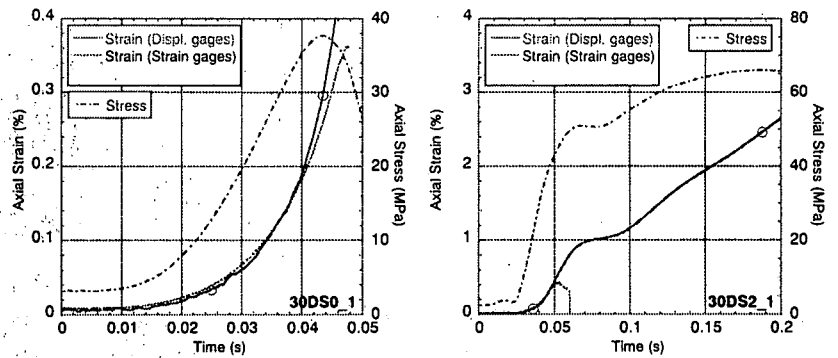
歪速度が、最大軸応力や最大軸応力時軸歪に与える影響は、拘束の程度によって異なることが明らかとなった。今後は、横歪に関する実験結果の解析を進め、こ

うした結果が得られた理由を明らかにすることや、歪速度を含めた応力-歪関係のモデル化を行う予定である。

3. 鉄筋コンクリート梁・柱接合部の性能評価

(1) 研究目的

鉄筋コンクリート骨組構造における柱・梁接合部は、兵庫県南部地震で見られた特徴的な被害事例として指摘され、現行の設計指針の見直しと有効な対策が早急に必要とされている。被災建物には現行基準を満たす比較的新しい建物も含まれており、接合部コンクリートの圧壊や顕著なせん断ひびわれ、さらには、柱・梁



(a) 拘束が無い試験体の例 (b) 拘束が有る試験体の例
図-2 2種類の軸歪と応力の時刻歴

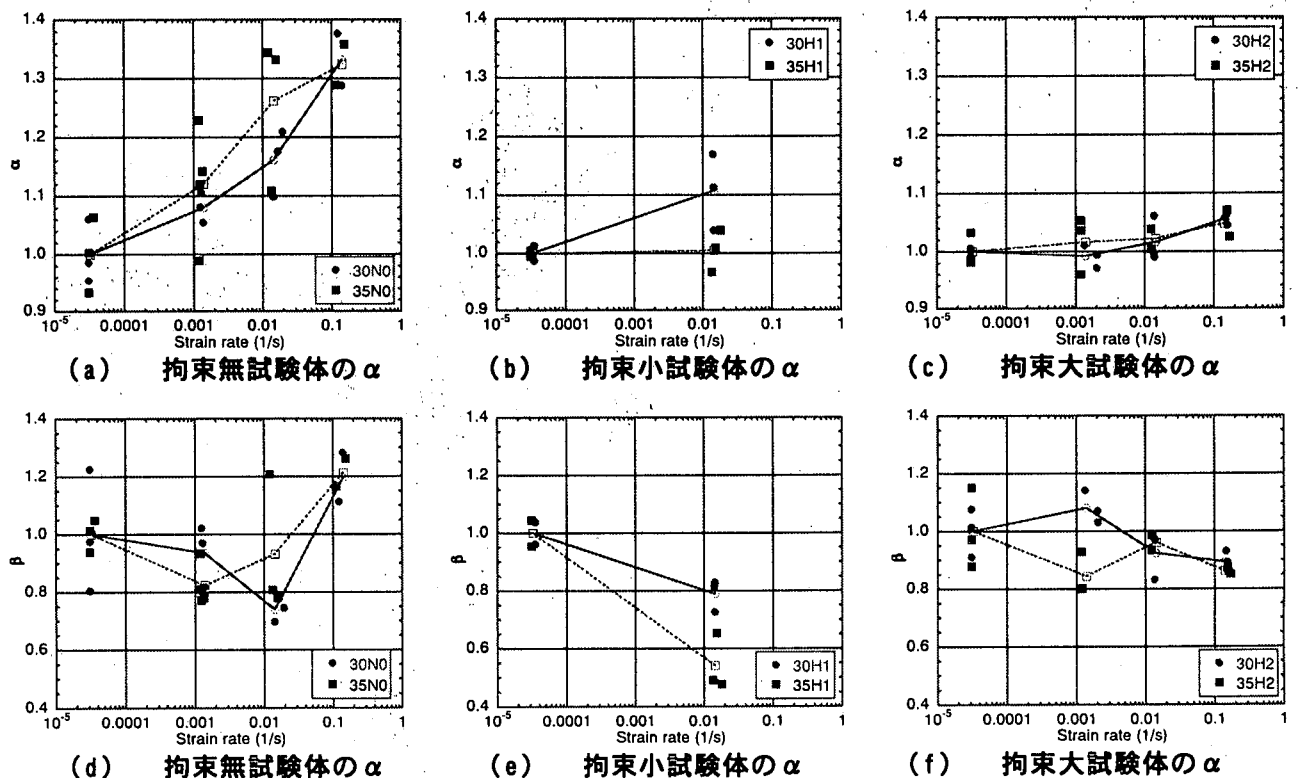


図-3 平均最大軸応力の歪速度感度 α 及び平均最大軸応力時軸歪の歪速度感度 β の変化

接合部の損壊によって上階の鉛直荷重を支えられず致命的な層崩壊した建物もある¹⁾。接合部は限られた領域に大きい応力が作用する部位であり、とりわけ、建物外周、隅に位置する柱・梁接合部では、鉄筋が錯綜して地震時の性能が配筋のディテールに決定的に支配される。本研究では隅柱、外柱と梁の接合部を対象に、定着部ディテールとせん断耐力の相関、保有性能と損傷の関係を明らかにすることを目的としている。

(2) 柱・梁接合部の地震被害

研究遂行に先立ち、柱・梁接合部に関する既往の地震被害事例について検討を行った。古い建物では、柱のせん断破壊が最も支配的であって柱・梁接合部の損傷についてはそれほど数多く報告されていない。しかしながら、柱、梁主筋の接合部への定着のディテールにも起因する接合部の損傷事例はいくつか報告されている。写真1、写真2（十勝沖地震）、写真3（1985年メキシコ地震）、写真4（1990年フィリピン地震）、写真5（1992年トルコ地震）、写真6（1993年グアム地震）にそれらの一例を示す。²⁾これらの建物では柱にも増して接合部がより脆弱であったことを意味しており、多くは、外周構面架構で主筋の定着ディテールに接合部の性能が支配されている部位である。さらには、隅柱接合部では地震時の二方向入力によって内柱には生じない高軸力が作用することも留意すべき事項であり接合部の破壊が部分層崩壊の要因となったことが推測される建物もある。

写真7、写真8、写真9には1995年兵庫県南部地震でみられた被害事例のうち、外周構面ト型接合部の被害事例を示す。写真10には1999年台湾地震でみられた被害事例を示す。これらの建物には現行の設計基準に準拠した建物も含まれている。現行の設計基規準で柱、梁のせん断に対する設計規定の強化がなされてきたことで今後、ますます接合部の被害事例が増えることが予想される。さらに、性能を変形能力で保証するラーメン構造では接合部の耐震性能をいかにして確保するかが重要な関心事といえる。

(3) L字型、ト字型（T字型）接合部のせん断設計、定着設計の現状と本研究で究明する事項

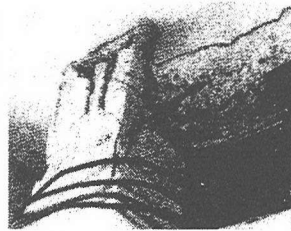


写真1 十勝沖地震2



写真2 十勝沖地震2



写真3 メキシコ地震

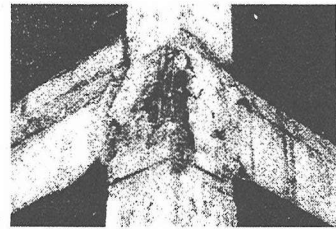


写真4 フィリピン地震

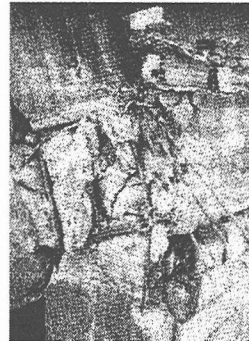


写真5 トルコ地震

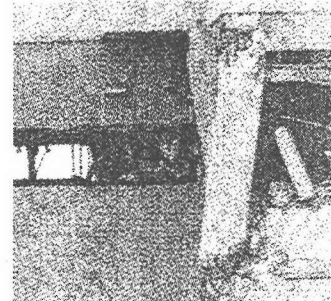


写真6 グアム地震



写真7 神戸地震(隅柱接合部)

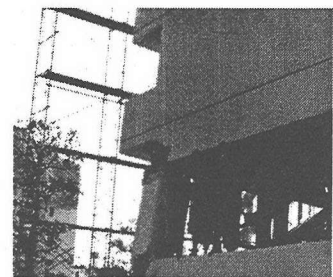


写真8 神戸地震(隅柱接合部)

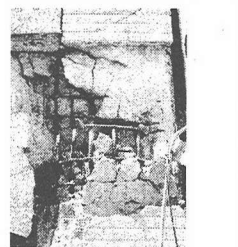


写真9 神戸地震(隅柱接合部)



写真10 台湾地震

a) 現行のせん断強度評価法

1999年に終局強度型耐震設計指針の改定を念頭に作成され、刊行された靱性保証型耐震設計指針では、以後の研究成果と高強度材料の利用($F_c=60\text{MPa}$ までが適用範囲)をもとに以下の式で接合部のせん断強度を与えている。

$$V_{ju} = \kappa \cdot \phi \cdot (0.8 \sigma_B^{0.7}) \cdot b_j \cdot D_j$$

(σ_B はMPa 単位)

κ は接合部形状係数(十字型1.0, ト字型0.7, L字型では0.4), ϕ は直交梁の有無による補正係数(両側直交梁つき接合部1.0, それ以外0.85), D_j は柱せいまたは90°折り曲げ定着筋の水平投影長さ, σ_B はコンクリート圧縮強度, b_j は接合部有効幅である。終局強度型設計指針からの相違点は、高強度コンクリートに適用するためにコンクリート強度の指数関数に比例する形式としたこと、直交梁の効果を式中に明示したこと、ト型を十字型の0.7倍, L字型を0.4倍のせん断耐力とみなす評価に改めた点である。L字型をさらに低減している理由はL字型接合部の場合、正負でその性能が大幅に異なり、正モーメントとなる載荷(開く側)では負モーメントとなる載荷(閉じる側)の場合より大幅に耐力が低下する実験事実を受けたことによる。このようにL字型, ト字型(T字型)接合部の設計では単に強度比で評価されているにとどまる。配筋のディテールに基づいたせん断耐荷機構が解明することが本研究の主な目的である。

b) 定着ディテールと接合部性能

一般に、外柱に定着される梁主筋は慣用的に90°折り曲げ定着とされている。この定着法は折り曲げ部の支圧作用によるところが大きく余長部に生じている付着力は支圧力の鉛直方向成分の反力を与える役割をになう。日本建築学会では1999年にRC規準⁶⁾の付着、定着条項を全面的に改定し、総長さでなく投影定着長さを設計の対象と改めた。同時に標準フックを定め、コンクリート強度と鉄筋鋼種に応じた曲げ直径と鉄筋径の10倍以上の余長を設けることとしているが、L字型の接合部に限り、投影定着長の確保とともに余長を直線定着の場合と等価な長さとする事が定められている。この余長部の役割を解明し合理的な設計法を提示することも本研究の目的のひとつである。

c) 機械式定着の利用

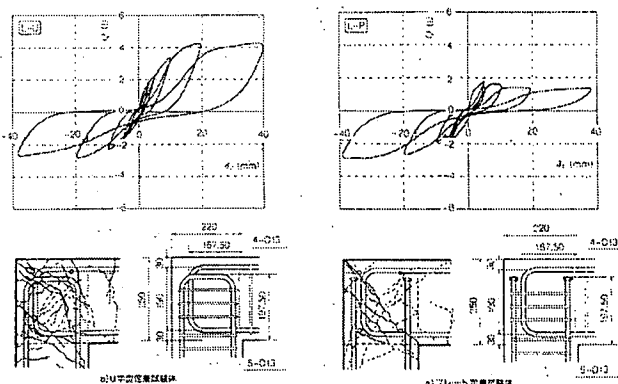


図-4 L字型接合部のパイロット実験結果

最近、仕口部での鉄筋の幅轉を避けることを目的に機械式定着法が種々開発され利用されている。過大な支圧力とならない面積と厚みを有する定着板(金物、突起)を鉄筋端部に設ければト型接合部では90°折り曲げ定着とくらべてほとんど遜色ないことが数多くの研究で実証されている。しかしながら、L字型接合部では注意が必要である。図4には本研究に先立って行った実験結果(L字型接合部の正負繰り返し荷重-変形曲線とひびわれ⁷⁾)を示す。2体の試験体のうち1体は主筋を柱、梁ともU字型定着としており、他の1体は梁筋はU字型定着、柱筋は鉄筋端に定着板を設けた機械式定着がなされている。正モーメント荷重時(開く側の載荷でグラフ上の負荷重側)にはU字型、プレート定着試験体間に差はみられないものの、プレート定着とした場合には負曲げモーメント荷重時(閉じる側の載荷時で、グラフの正荷重側)の耐力がU字定着としたものの半分以下になっている。これは出隅位置近傍の柱筋端部定着板位置から生じた斜めひびわれが大きく開口したことによっている。一方、開く側の載荷では、梁危険断面側の柱筋端部定着部では梁断面のコンクリート圧縮内力が折り曲げ定着の場合と同様に作用するため、同じ機構の斜め圧縮束が形成され、その性状に大きな差はあらわれなかったといえる。ト型接合部でも、柱圧縮ゾーンに設けることが折り曲げ定着の場合よりもさらに必須であり、せん断補強筋の果たす役割も大きいといえる。なお、U字型定着とした試験体でもL字型接合部のせん断耐力は、開く側の載荷時には閉じる側の載荷時のせん断耐力の2/3程度になることにも注意が必要である。

(4) 実験計画の概要

本研究では上述の研究現状をふまえて、L字型, T字型

表-2 試験体一覧表

試験体	形状	梁筋定着	柱筋定着	補強筋
L-1	L字型	90° (余長大)	180°	慣用フープ
L-2	L字型	90° (余長小)	180°	慣用フープ
L-3	L字型	90° (余長大)	プレート	慣用フープ
L-4	L字型	90° (余長小)	プレート	慣用フープ
L-5	L字型	90° (余長小)	プレート	斜め筋追加
L-6	L字型	90° (余長大)	プレート	斜め筋追加
T-1	T字型	通し筋	プレート	肋筋追加
T-2	T字型	通し筋	180°	慣用フープ

の柱・梁接合部について、約1/2縮尺の試験体を作成し、主筋の定着ディテールをパラメータとして地震荷重時の性能(耐力, 変形能, 損傷経過)を調査する。表2に計8体の試験体の概要, 図5に配筋詳細を示す。試験体は柱300×300mm, 梁200×300mm断面であり、接合部せん断破壊先行型の配筋, としている。試験パラメータは、柱主筋, 梁主筋の定着形式であり、従来型(柱180°フック, 梁筋90°フック), 機械式プレート定着および接合部補強方法とする。

(5) 研究成果の見通し

本研究に関連する地震被害例の総括と研究現状の調査より以下のことが指摘できる。

- ・過去の地震では外構面の接合部に定着に起因した接合部破壊が数多くみられ, 今後も接合部が地震によって損傷を受ける可能性が増大している。

- ・L字型, T字型接合部では研究資料が十分でないが配筋詳細によって大幅に性能が異なることが認められている。

- ・現行の設計指針は数少ない資料をもとに規定されて定着方法とせん断耐荷機構の関係が不明である。

- ・機械式定着の場合, L字型接合部では危険となる場合がある。

本研究結果に基づきL字型, T字型接合部の配筋ディテールに応じたせん断抵抗機構モデルの提案と合理的な設計法の提案し, ひび割れ, 圧壊損傷の進展と復元力特性の関係を明らかにする予定である。

4 まとめ

本研究における2つの実験は, 終了直後またはこれから実施予定で有る。そこで, まず実験を遂行すること, 得られた実験結果の解析を行い実験変数が及ぼす影響を定量化することを予定している。

謝辞

本研究は, 科学技術振興調整費地震防災・破壊メカニズム研究プロジェクトにおける「構造物の破壊過程解明に基づく生活基盤の地震防災性向上に関する研究」の一部として行われたものである。

参考文献

- 1) Ahmad, S.H. and Shah, S.P., "Behavior of Hoop Confined Concrete Under High Strain Rates," ACI Journal, Vol.82, No.5, Sep-Oct. 1985, pp. 634-647.
- 2) Dilger, W.H., Koch, R., and Kowalczyk, R., "Ductility of Plain and Confined Concrete Under Different Strain Rates", ACI Journal, Vol.81, No.1, Jan-Feb. 1984, pp. 73-81.
- 3) Soroushian, P., Choi, K-B., and Alhamad, A., "Dynamic Constitutive Behavior of Concrete," ACI Journal, Vol.83, No.2, Mar-Apr. 1986, pp. 251-259.
- 4) Soroushian, P. and Sim, J., "Axial Behavior of Reinforced Concrete Columns under Dynamic Loads," ACI Journal, Vol.83, No.6, Nov-Dec. 1986, pp. 1018-1025.
- 5) 日本建築学会: 阪神・淡路大震災と今後のRC構造設計-特徴的被害の原因と設計への提案-, 1998
- 6) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説-許容応力度設計法-, 1999
- 7) 下中裕史, 崔建宇, 内田貴之, 藤井 栄: 鉄筋コンクリートT字型, L字型接合部のせん断耐力, コンクリート工学年次論文報告集, 第19巻第2号, pp. 1023-1028, 1997年
- 8) 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
- 9) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説, 1999

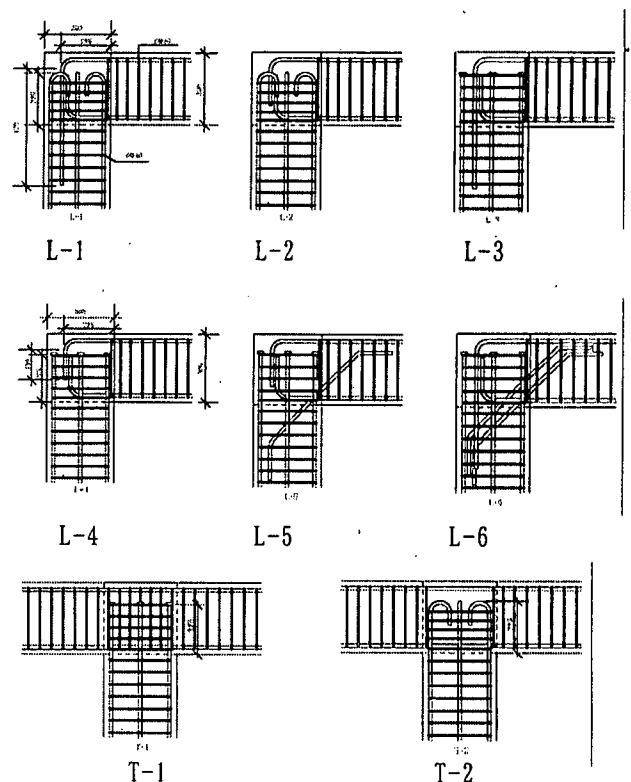


図-5 梁・柱接合部試験体配筋詳細