

鉄筋コンクリートスラブのせん断補強効果について

An Experiment on Shear Strength of RC Slab

小島 雅樹*
Masaki Kojima

武内 義夫*
Yoshio Takeuchi

要 約

一般的に面外せん断力を受ける鉄筋コンクリートスラブまたは壁のせん断設計は、せん断補強は行わずコンクリートでせん断力を負担することが多いが、規準または応力状態によってはせん断補強が必要となる時がある。

しかし、2方向スラブにおいてはせん断補強が施工上難しく、特にせん断補強筋の定着部は設計当初から施工を意識していないと実際問題として施工不可能な場合が多い。

本実験は鉄筋コンクリートスラブのせん断補強効果を、スターラップの定着部の形状をパラメータとして、はり型試験体によりせん断力を与え比較実験を行ったものである。

3種類のスターラップの定着部の比較によりせん断補強効果を検討した結果、最大荷重時までの範囲において強度、変形性状とも大きな違いはないものの細かくみれば興味あるデータが得られ今後の一資料となる結果を得た。

目 次

- §1. はじめに
- §2. 実験概要
- §3. 試験体
- §4. 試験および計測方法
- §5. 試験結果
- §6. 考察
- §7. まとめ

§1. はじめに

ある土木構造物のスラブの施工において、2方向スラブとしてせん断補強を行って設計されていたスラブは、両方向ともに通常のはりと同様のスターラップ型のせん断補強が行われていたが、定着部の形状が施工に困難を極めた。

このためせん断補強筋の定着部の形状を変更することを検討したが、資料も少ないため構造実験により確認す

る必要があった。

十分な検討期間が取れなかったため、せん断補強筋の定着部の形状を3種類のみに変化させたせん断実験を行い、最大荷重時までの強度、変形性状を比較検討した。

一般的な結論に達するためには、はり試験体ではなく2方向版としての実験および最大荷重以降の検討が必要である。

なお、この構造実験を行う時期に海外からの研修生としてアメリカ合衆国 Linbeck Corporation の Leo Linbeck III が当技術研究部に研修中であった。

このため、研修テーマとして構造実験におけるマイクロコンピュータを用いた計測システムのプログラム開発を選定した。プログラムリストは4000行を越えるため掲載は不可能であるが、当社にとっても貴重な資料となったことを付記したい。

§2. 実験概要

検討対象となっているスラブは2方向スラブであるが、構造実験においては加力装置の規模、加力能力、治具の設計および制作期間の関係などにより、200tf 万能

*技術研究部原子力室係長

試験機を用いるはり型試験体によるせん断実験を行った。

§ 3. 試験体

3. 1 試験体の設計

実際の設計では曲げ破壊先行型であり、せん断強度は曲げ強度を上回る。しかし本実験ではせん断補強効果を調べることを目的であるために意識的に曲げ強度を高め

る必要があることから、せん断補強量はそのままし曲げ補強筋を多数配置して曲げ強度を高め、せん断破壊先行型とした。このため主筋比は通常的设计値より高目となっている。

試験体設計に当たっては、採用すべきせん断終局強度計算式の決定には少し検討を要した。詳細は省くが、土木、建築または研究者の考え方の相違により、おおむね次のようなところが検討課題であった。

① せん断補強筋の効果の定量的評価：

$$p_w \cdot \sigma_y \text{ or } 2.7 \sqrt{p_w \cdot \sigma_y}$$

すなわち補強効果は補強量につれて線形的に増大するのか、または補強量が増大しても頭打ち現象があるのか。

② コンクリートの負担せん断力の評価：

コンクリート強度の評価だけの問題ではない。

軸鉄筋による負担せん断力の効果すなわち dowel action の評価でもある。

鉄筋コンクリート構造物にひび割れを許してもよいかどうかの設計態度の問題でもある。

③ M/Qd の評価：

部材に加わる曲げモーメントとせん断力の比はりの有効せいで除した無名数である。この値により負担せん断力は異なる。

④ 計算式の評価を平均値式として考えるか、下限値式としてみるかの相違：

実験式と設計式との対応において設計上採用する値として実験式の下限值として評価するかまたは安全率を考慮した平均値式として考えるか。

なお、曲げ終局強度については土木、建築とも大きな相違はなく

① ストレスブロックの形状の違い

② 圧縮ひずみ度の評価

③ 単筋ばりと考えるか複筋ばりと考えるかの違い

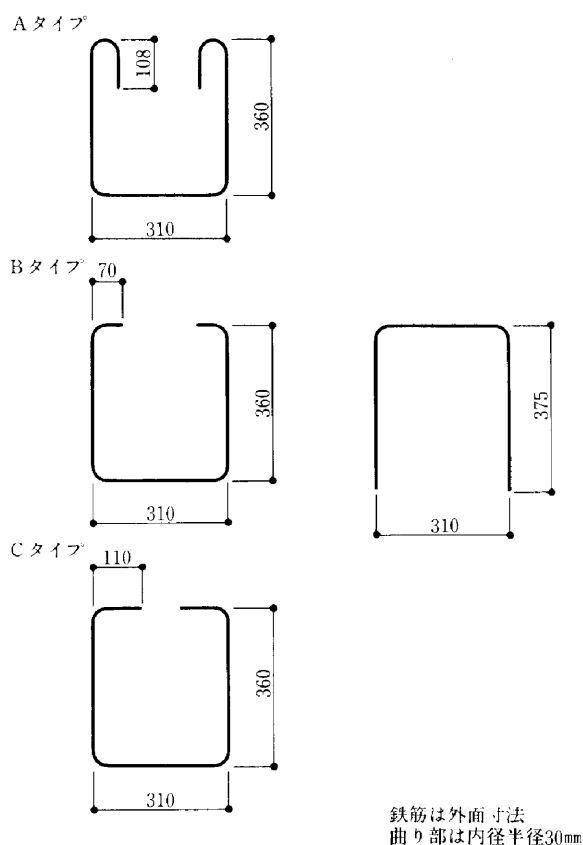
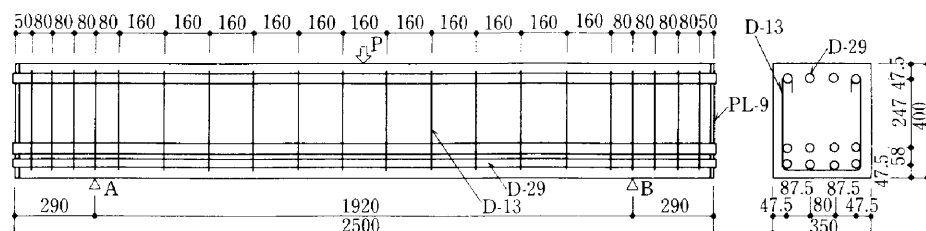


Fig.1 スターラップの形状



主筋 D-29 (SD35)
スターラップ D-13 (SD35)

P : 荷重
A : ピン
B : ローラー

Fig.2 試験体の寸法および形状

程度である。

最終的には既往の式にこだわらず曲げ終局強度には余力をもたした設計とした。

パラメータとしたスターラップの定着部の形状は次の3種類とした。スターラップの形状を Fig. 1 に示す。

- ① A型：スターラップの形状および定着部の形状はU字型でありいわゆる180度フック付きである。この180度フックが2方向スラブのせん断補強筋配筋時には施工が困難となる場合がかなり多い。
- ② B型：これは次に述べるC型の補強筋追加型で、定着部端部は90度型として余長は短くし、かわりに上から長めの追加補強筋を差し込むものである。
- ③ C型：これはA型の補強筋の定着部の形状が施工上難かしいためフックの形状を90度フックとし余長部を最大限に長くしたものである。

加力方法については通常、建築では地震時の挙動が支配的であるため、せん断実験においては逆対称荷重による繰り返し加力が一般的である。しかし本実験では長期荷重が支配的であることから加力方法は逆対称加力とせず単純ばり加力とした。

主筋の抜け出しによる定着破壊を防ぐために試験体の両端にはPL-9を配し、軸方向鉄筋を貫通させPLと溶接した。試験体の寸法および形状を Fig. 2 に示す。

Table 1 コンクリートの配合 (単位kgf/m³)

C	W	S ₁	S ₂	G ₁	G ₂	Ad
258	148	682	171	640	426	.645
水セメント比 57.5%				細骨材率 44.9%		

Table 2 圧縮強度試験結果
(テストピース3本の平均)

材 令	圧縮強度 (kgf/cm ²)
3	144
16	193
10	237

Table 3 鉄筋の材料試験結果 (単位kgf/cm²)

呼 び 名	規 格	使用部位	降 伏 点	引張強さ
D13	SD35	肋 筋	3698	5273
D29	SD35	主 筋	3738	5945

3-2 使用材料

実験期間があまり取れないこともあって、使用コンクリートは早強レディーミクストコンクリートとした。混和剤はポゾリスNo.70を用いた。

構造実験に用いるコンクリートの配合方針は通常の場合、標準偏差を考慮せずに定める。本実験では材令10日において $F_c=240\text{kg/cm}^2$ となるよう配合を定めた。コンクリートの配合を Table 1 に、圧縮強度試験結果を Table 2 に示す。

使用鋼材は軸方向鉄筋およびスターラップとも JIS G 3112 に規定する SD35 の異形鉄筋を用いた。

鉄筋の材料試験結果を Table 3 に示す。

3-3 養生管理

試験体のコンクリート打設は冬季の12月となったため所定の材令での強度の発現には困難が予想された。

原則としては所定の材令にはこだわらず強度が発現した時点で実験を開始することとしたが、次のような温度管理を行ってみた。

試験体打設および養生は技術研究所大型実験棟反力床上で行うこととし、打設終了後ただちにビニールシートによる上屋を設けた。壁面および屋根面は空気層を有するように2重構造とした。試験体に直接シートをかぶせる養生方法もあるが、空気の対流による温度管理の方が合理的と考えた。

上屋内にはスプリンクラーで適宜散水することにし、また、空気を対流させる方法としては扇風機を常時回すこととした。熱の供給は反力床下の地下室の空気の温度が四季を問わず一定値であることを利用し循環させることにしたが、補助的に電気ストーブを24時間中動かし昇熱させた空気を反力床中に設けてある PC 鋼棒用の穴から空気を循環させるように計画した。

参考として試験体の上部に電気養生マットを、直接に

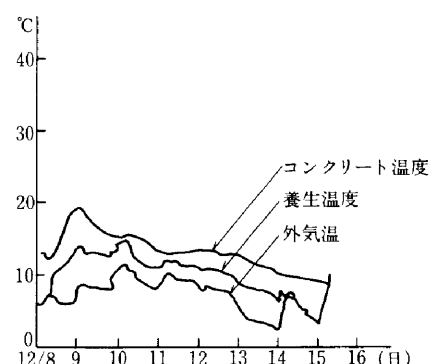


Fig.3 養生時の温度測定結果

は試験体に接しないようにして用いてみたが全然効果は期待できなかった。凍結防止用として初めて意味があるもので、温度をあげるためには無意味である。

Fig. 3 には養生時の温度測定結果を掲げる。測定温度は外気温、養生室内の気温および試験体のコンクリート内部の温度である。温度の測定には銅コンスタンタンの熱電対を用いた。

かなり外気温が変化するため所定の強度の発現には大きな問題も有り得ると考えられるが、今回は設計強度に対し 3 kg f/cm^2 の $F_c = 237 \text{ kg f/cm}^2$ を確保することが出来た。

§ 4. 試験および計測方法

4-1 試験方法

試験機は当社大型実験棟内の200tf 万能試験機を用いた。Photo 1 に示すように上部のクロスヘッドは球座であり、下部のテーブル上には載荷ビームを配置して、2等分1点集中載荷方式とした。

加力内容は1方向漸増載荷として繰り返しは行っていない。除荷は試験体の最大荷重を確認した時点とした。

4-2 計測方法

計測対象は大きく次の3種類である

- ① はりのたわみは載荷点直下のはり中央部のたわみとし、はりの両面に変位計を設置しその平均の値を用いた。
 - ② 鉄筋のひずみは、はり主筋の引張側下端筋の外側の2本の主筋のみとし、スターラップは32カ所とした。
 - ③ コンクリートの表面ひずみはパイゲージを用い、コンクリートの主応力が計測できるように1カ所につき3方向設置し計4カ所を測定した。
- 全ての計測位置を Fig. 4 に示す。



Photo 1 試験方法

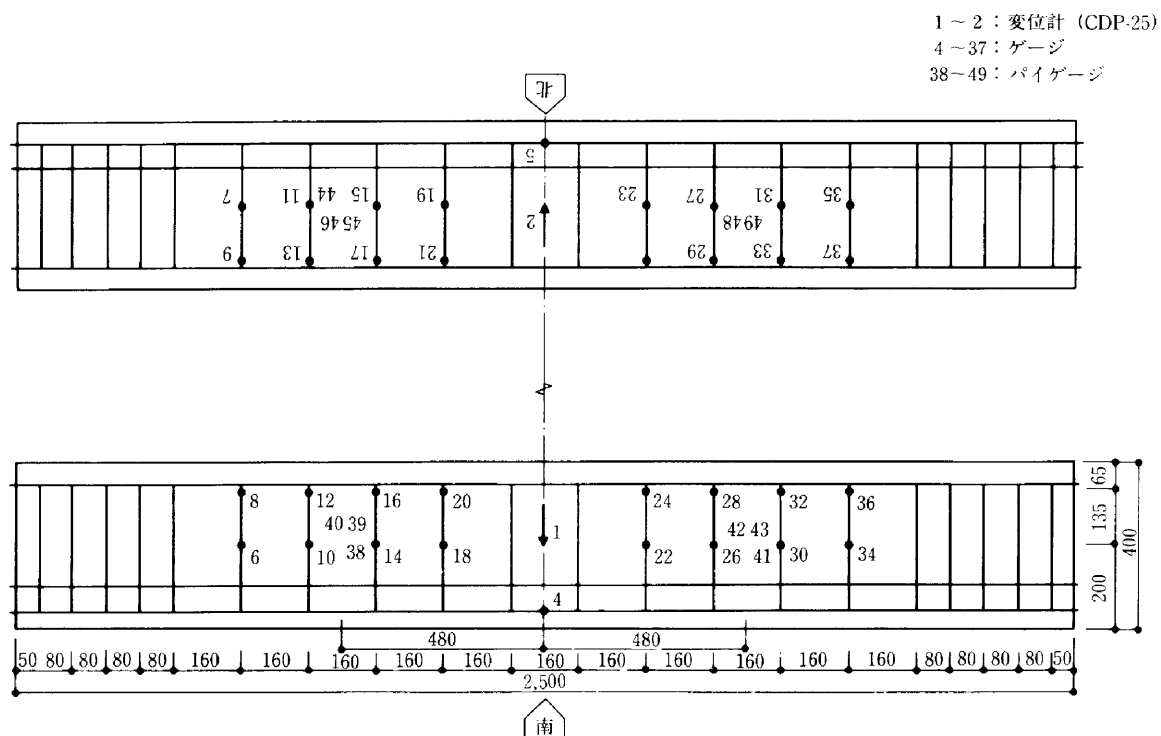


Fig.4 計測位置

測定システムは、従来 NEC の PC9801 シリーズを用いていたが、今回は計測プログラムの開発を Leo Linbeck 氏の研修テーマとしたため、APPLE 社製の Mac II Plus で開発した。

開発方針として C 言語を採用し、取り込むデータの形式は ASCII データではなく、より高速でのデータ収録が行える Binary データによるデータ転送を試みた。また、計測中のモニターを容易にするため、リアルタイムで計測データを高速表示させる仕様とした。開発期間は約 5 日間であるが、4000 行に及ぶものである。

データロガーとして東京測器社の高速データロガー THS-1000 を用いた。

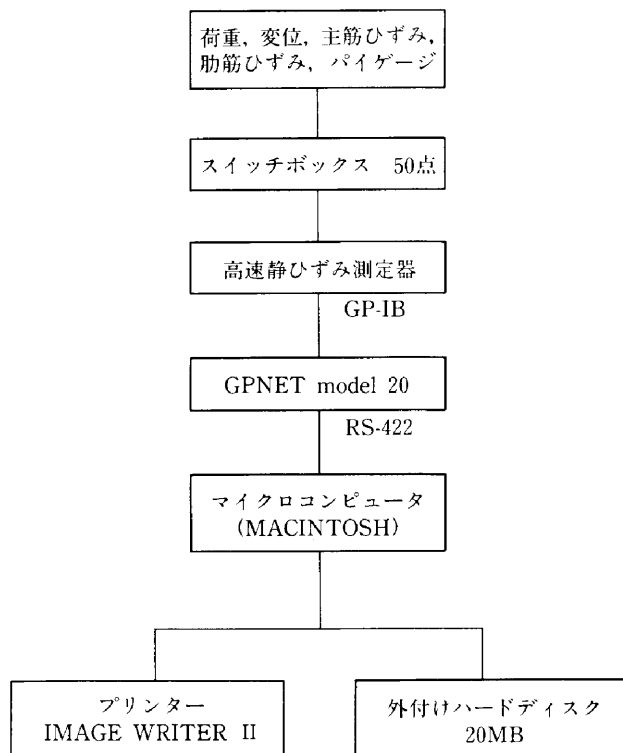


Fig. 5 データの測定・処理システム

インターフェイスの仕様は GP-IB インターフェイスバスであるため PC9801 においては GP-IB ボードを用意すれば取り込むのであるが、Mac II 用の GP-IB インターフェイスボードは期間的に入手不可能であったため、Mac II の標準シリアルバスである RS422 インターフェイスを用いることとした。GP-IB インターフェイスから RS422 インターフェイスの変換装置として GP-NET Model-20 を採用した。

なお、GP-IB バスは General Purpose Interface Bus の略で、パラレルデータの転送を行うものである。もともとは Hewlett Packard 社の社内用のインターフェイスバスであり HB-IB バスと呼ばれていたのが各社が採用するにつれて GP-IB バスと呼ばれるようになったものである。また IEEE488 バスと呼ぶこともある。

RS422 バスはシリアルデータの転送を行うバス規格である。

Fig. 5 にデータの測定・処理システムを示す。

§ 5. 試験結果

試験結果の一覧を Table 4 に示す。荷重変形曲線の 1 例を Fig. 6 に、最終破壊の様相の 1 例を Fig. 7 に示す。

§ 6. 考察

Fig. 8 には各試験体の荷重変形曲線の重ね合わせたものを示す。大きくみれば全試験体とも荷重変形曲線の形状には差異は無く、せん断補強筋の定着方法による違いは認められないとしてよい。

しかし細かくみると B 型試験体においては若干最大荷重が大きく、これは上からかぶせた補強筋がせん断力の一部を負担しているものと考えられる。しかし、せん断耐力の上昇はわずかである。

Table 4 試験結果の一覧

記号	荷重	変位 1	変位 2	主筋歪 1	主筋歪 2	降伏した肋骨の番号（降伏歪度 $\approx 1800\mu$ ）
A 1	74.1	5.33	5.68	1523	1422	11, 31
A 2	69.2	5.15	5.19	1467	1423	31, 35
B 1	87.6	9.73	8.90	2062	2219	10
B 2	90.9	9.22	9.09	2209	1968	
C 1	75.3	6.49	7.21	1617	1839	5, 10, 14, 15, 26, 27, 30, 31
C 2	79.0	6.78	7.57	1778	1799	6, 10, 11, 14, 15, 27, 30, 31

（注）荷重は tonf, 変位は mm, 歪は μ

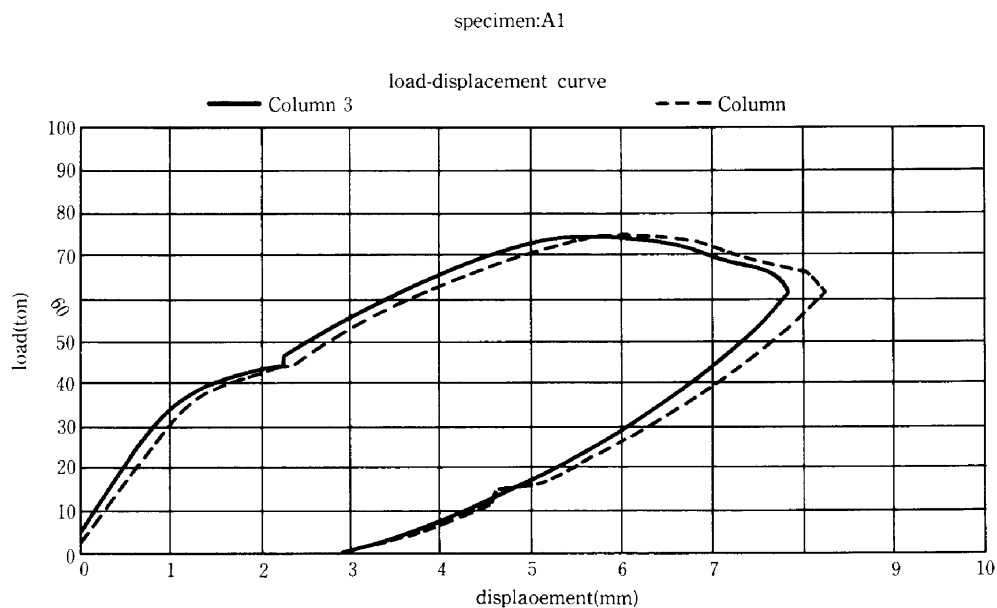


Fig.6 荷重変形曲線の1例

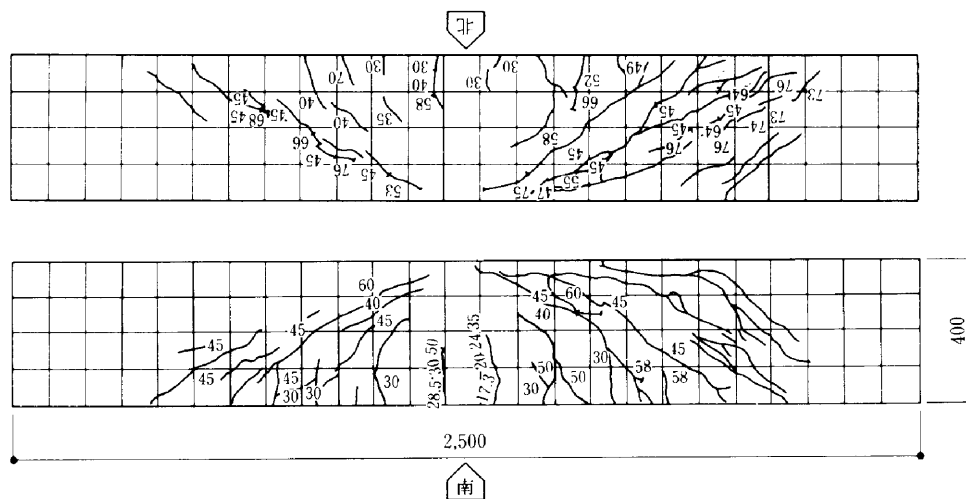


Fig.7 最終破壊の様相の1例

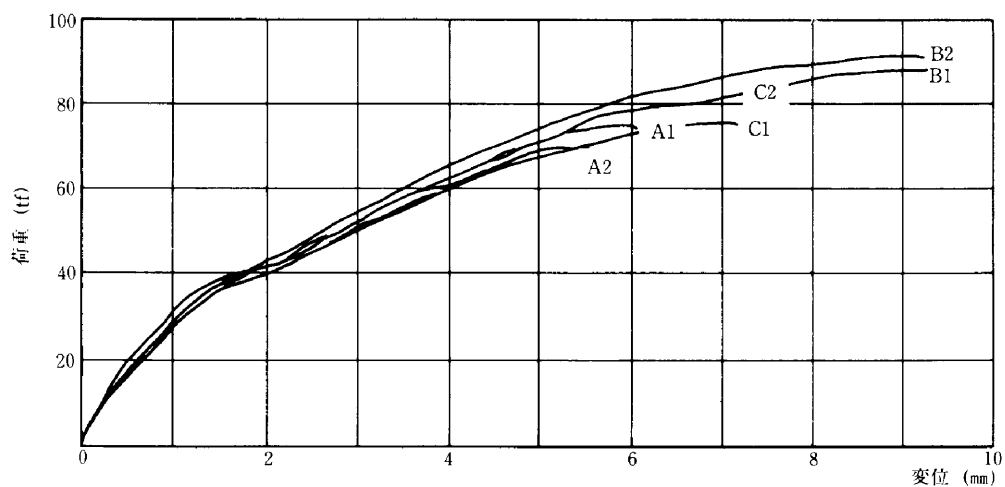


Fig.8 各試験体の荷重変形曲線の重ね合わせ

また、C 型試験体は A 型試験体とほぼ同様の最大荷重を示し、少なくとも A 型試験体を下回ることではない。

最大荷重時の変形能力については B 型試験体が大きな値を示し、つぎに C 型試験体、A 型試験体の順番となった。前記の最大荷重のところでは A 型と B 型の試験体については差異がないとしていたが最大荷重時における変形量では若干の差異が認められた。

前掲の Table 4 には最大荷重時の各試験体の主筋のひずみ度およびスターラップのひずみ度を示す。

B 型試験体においては主筋のひずみ度は降伏ひずみ度(約 1800μ)を越え試験体は曲げ降伏した。スターラップは試験体 2 体のうち 1 体の 1 本のみが降伏ひずみ度に達した。

A 型試験体においては主筋は降伏せず、スターラップの 1 部のみが降伏してせん断破壊にいたった。

C 型試験体においては主筋はほぼ降伏し、かつスターラップの大部分も降伏し、試験体は曲げ破壊およびせん断破壊となった。

以上のように破壊モードは定着部の形状により少し異なる結果となり、B 型試験体においてはせん断終局強度は増大する傾向にある。

実験時のひび割れ観察の結果によれば、試験体上面の圧縮域においては、荷重の増大につれ圧縮鉄筋ぞいのひび割れが発生、伸展する。

A 型試験体においてはスターラップの形状が³ U 字型となっているため部分的に無筋部分が生じ、ひび割れが発生した時に伸展を抑えることができず結果的に耐力の増大に結びつかないと考えられる。

C 型においても A 型と同様に無筋部分があるために耐力的には差異が無い結果となったと考えられる。

しかし、実際のスラブにおいては横方向の拘束があるわけであり、上記の点については実験上の問題である。

§ 7. まとめ

本実験はスラブのせん断補強効果をせん断補強筋の定着部の形状に注目し、はり型試験体により行ったものである。

短い期間で実験を完了する必要があつて十分な検討期間もなく、また、試験体の数、パラメータの選定など不十分な点もあり本実験結果から一般的な結論を導き出し、設計に採用するのは若干の無理があるが、まとめれば次のようになる。

スターラップ定着部の形状を変えることにより

- ① 破壊モードは異なり B 型では曲げ破壊に移行す

る

- ② 最大耐力は B 型の方が若干大きい値を示す

- ③ 最大耐力時の変形も B 型のほうが大きい

しかし、設計上用いることができるほど定着部の形状の違いによるせん断耐力の差異は無いため実際的には大きな差異はないと見てよい。これは次の理由にもよる。

- ① スラブの挙動をはりの試験体で行ったこと

- ② 設計は曲げが支配的であるがせん断実験であること

なお、本実験では実験期間の関係上、最大荷重時以降の耐力低下等の挙動については検討を行えなかった。

この点については今後の実験および検討が必要である。本実験を行うに当たり次の方々にご協力を賜りました。ここに感謝の意を表します。

土木設計部 前田詔一氏

関東支店 渡部勝敏氏

Mr. Leo Linbeck III