

鉄骨ばりの横座屈と横座屈に対する補剛材の効果に関する実験的研究（その2）

若林 實・中村 武・中井 政義

EXPERIMENTAL STUDY ON LATERAL BUCKLING OF H-SHAPED BEAMS AND BRACING EFFECT ON LATERAL BUCKLING, PART 2

By *Minoru WAKABAYASHI, Takeshi NAKAMURA and Masayoshi NAKAI*

Synopsis

This paper reports on lateral buckling behavior of H-shaped steel beams with reinforced concrete slab on the top flange and subjected to uniform moment or moment gradient. It was confirmed experimentally and analytically that the reinforced concrete slab was very effective to increase lateral buckling strength and deformability of steel beams. In the case of the beam whose depth-to-width of flange ratio was about 3 and which had relatively thick web, the attainment of full plastic moment of a cross section of steel beams could be assured under moment gradient by the bracing effect of the slab, even when the slenderness ratio about the weak axis was 600.

1. 序

本論文は、H形断面はりの横座屈耐力、横座屈後の変形能力に対する、鉄筋コンクリート床スラブの効果を実験的・理論的に検討することを目的としている。

本論で報告する実験的研究のシリーズは、(その1)¹⁾で述べたように、実際の建築物にみられるように、鉄骨H形断面はりが中間で母屋、小ばり、床スラブ等のように横座屈に対して拘束・補剛効果のある材によって補剛された場合や分布荷重と端モーメントの組合せによって曲げモーメント分布が複雑になる場合の横座屈挙動を追跡するために計画された。

(その1)¹⁾では、はり中間に横座屈補剛材のない場合、はり上面ではりの長さ方向に等間隔に配置された母屋によって主に断面の振れが拘束される場合、スパン中央に小ばりが1本存在する場合についての実験結果及びこれらのはりの横座屈耐力、横座屈後の挙動を追跡するための有限要素法による弾塑性解析について報告した。実験的研究及び理論解析に基づいて、前報では、曲げモーメント分布の影響、隣接材による材端拘束の影響、中間小ばりの効果を横座屈に対する有効長さ係数の形で横座屈耐力の評価に導入する方法を示すとともに母屋の存在が横座屈補剛に大きな役割を果たすことを示した。本報では、鉄筋コンクリート床スラブの補剛効果の検討を中心に、他の補剛法との効果を比較する。

2. 実 験

2.1 実験計画及び実験方法

本実験的研究は、現実的な状態にあるH形断面はりの横座屈挙動を追跡するべく計画、遂行された。試験体は実大の約1/3を想定して、溶接組立H-200×60×6×6のH形断面材を用いた。実験方法はFig. 1に示す通りで、2本の試験体は平行に設置され、鉛直方向支点及び両端載荷点で同一断面の小ばりで結ばれ

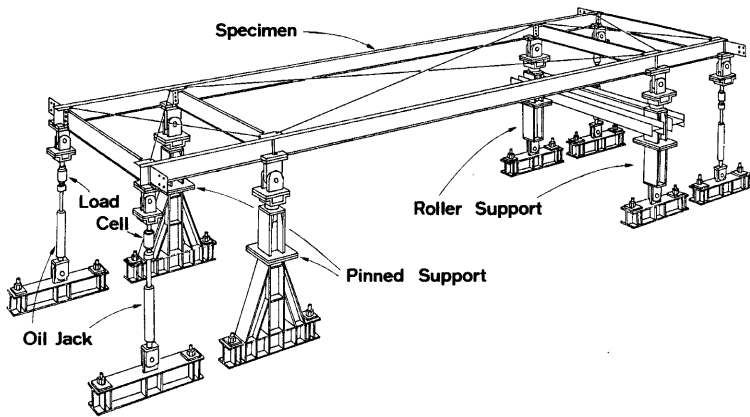


Fig. 1 Test set-up

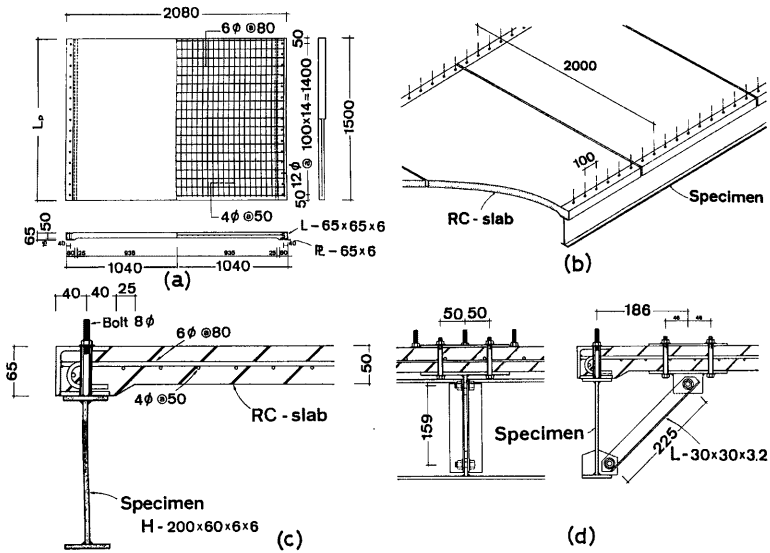
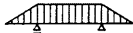

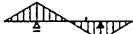
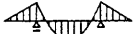

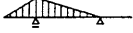
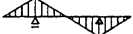
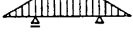
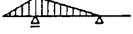
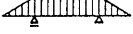

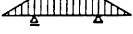


Fig. 2 Details of reinforced concrete slab on steel beam

ている。試験体への荷重方法、支持方法は本実験シリーズを通じて共通である。即ち中間支点では鉛直方向に単純支持、はり構面外の曲げに対しては回転自由（ピン）で横変位が拘束されている。両端荷重点では横移動拘束装置によって断面の横移動及び振れが拘束されている。荷重は両端の静的油圧ジャッキにより鉛直方向に下フランジが圧縮側となるように行われる。

本報で報告する実験的研究の主体は、はり上面に鉄筋コンクリート床スラブがある場合である。はり上面

Table 1 Planning of experiment and test results.

| Type | Moment Distribution | α, β | Bracing | Length L(mm) | Slenderness Ratio | | Lateral Buckling Strength | |
|------|---|-----------------|----------------------|--------------|-------------------|------------------|---------------------------|------|
| | | | | | L / i_y | \sqrt{L} / i_y | M_{max} / M_p | |
| I |  | 1, 0 | unbraced | 5000 | 459 | 222 | 0.35 | 0.35 |
| | | | | 2500 | 229 | 146 | 0.59 | 0.62 |
| |  | 0, 0 | unbraced | 6500 | 596 | 284 | 0.45 | 0.48 |
| | | | | 5000 | 459 | 230 | 0.58 | 0.55 |
| | | | | 3500 | 321 | 187 | 0.80 | 0.79 |
| |  | -1, 0 | unbraced | 6500 | 596 | 316 | 0.60 | 0.56 |
| | | | | 3500 | 321 | 242 | 0.86 | 0.84 |
| |  | 1, 2 | unbraced | 4000 | 367 | 184 | 0.34 | 0.40 |
| 2000 | | | | 183 | 92 | 0.65 | 0.64 | |
| II |  | 1, 0 | braced by purlins | 5000 | 459 | | 0.63 | 0.63 |
| | | | | 2500 | 229 | | 0.84 | 0.83 |
| |  | 0, 0 | braced by purlins | 5000 | 459 | | 0.92 | 0.93 |
| | | | | 3500 | 321 | | 1.08 | 1.11 |
| |  | -1, 0 | braced by purlins | 6500 | 596 | | 0.99 | 0.99 |
| | | | | | | | | |
| III |  | 1, 0 | sub-beam at mid-span | 5000 | 459 | | 0.52 | 0.56 |
| | | | | 2500 | 229 | | 0.90 | 0.86 |
| |  | 0, 0 | sub-beam at mid-span | 6500 | 596 | | 0.60 | 0.66 |
| | | | | 3500 | 321 | | 0.90 | 0.90 |
| IV |  | 1, 0 | braced by RC-slab | 5000 | 459 | | 0.97 | 0.95 |
| | | | | 2500 | 229 | | 0.93 | 0.96 |
| |  | 0, 0 | braced by RC-slab | 6500 | 596 | | 1.08 | 1.08 |
| | | | | 3500 | 321 | | 1.07 | 1.09 |
| |  | 1, 0 | braced by RC-slab | 5000* | 459 | | 0.92 | 0.96 |
| | | | | 5000** | 459 | | 0.93 | 0.92 |

- with stiffener at center
- braced by angles at center

に Fig. 2 (a) に示すプレキャスト鉄筋コンクリートスラブが設置され、Fig. 2 (b), (c) に示すように、はり上に 100mm 間隔で配されたスタッドボルトを模した 8φ ボルトで接合される。試験体は 6 組である。実験変数と実験より得られた最大耐力一覧を Table 1 に、試験体に用いた鋼材の引張試験結果を Table 2 に、試験体断面の実測結果を Table 3 に示す。本報告の主体は Table 1, Table 3 中の方の 6 欄相当分を Series IV に相当している。試験体断面の寸法記号を Fig 3 に示す。プレキ

Table 2 Result of tension test of the used steel plate

| Mechanical Properties of Material | |
|-----------------------------------|-----------------------|
| Yield Stress | 314 N/mm ² |
| Ultimate Strength | 448 N/mm ² |
| Yield Strain | 0.14 % |
| Strain Hardening Strain | 2.25 % |
| Ultimate Strain | 30 % |

Table 3 Measured dimension of the test specimens

| SPECIMEN | α, β | | D | Bu | B1 | tw | tfu | tf1 |
|----------|-----------------|---|--------|-------|-------|------|------|------|
| E-250 | 1,0 | N | 200.03 | 60.85 | 61.07 | 6.15 | 6.00 | 5.96 |
| | | S | 201.45 | 61.27 | 60.43 | 6.27 | 5.95 | 5.96 |
| E-500 | 1,0 | N | 200.20 | 60.70 | 60.70 | 5.45 | 5.82 | 5.81 |
| | | S | 200.50 | 60.70 | 60.70 | 5.44 | 5.82 | 5.79 |
| T-350 | 0,0 | N | 200.93 | 61.25 | 59.83 | 6.12 | 6.07 | 6.05 |
| | | S | 200.52 | 60.03 | 60.85 | 6.17 | 5.96 | 5.88 |
| T-500 | 0,0 | N | 200.20 | 60.70 | 60.70 | 5.45 | 5.82 | 5.82 |
| | | S | 200.50 | 60.70 | 60.70 | 5.44 | 5.82 | 5.82 |
| T-650 | 0,0 | N | 198.80 | 60.60 | 60.00 | 5.55 | 5.91 | 5.91 |
| | | S | 199.00 | 60.60 | 60.45 | 5.56 | 5.79 | 5.80 |
| R-350 | -1,0 | N | 200.83 | 60.78 | 60.73 | 6.16 | 6.25 | 6.17 |
| | | S | 200.13 | 60.12 | 60.35 | 6.00 | 6.12 | 6.00 |
| R-650 | -1,0 | N | 200.15 | 60.90 | 59.80 | 5.20 | 5.81 | 5.81 |
| | | S | 200.00 | 59.80 | 60.75 | 5.40 | 5.81 | 5.81 |
| D-200 | 1,2 | N | 199.80 | 59.90 | 59.80 | 5.95 | 5.91 | 5.98 |
| | | S | 200.30 | 60.80 | 60.30 | 6.20 | 5.90 | 5.96 |
| D-400 | 1,2 | N | 200.30 | 60.60 | 60.60 | 6.20 | 5.78 | 5.80 |
| | | S | 199.90 | 61.00 | 60.90 | 6.20 | 5.84 | 5.87 |
| PE-250 | 1,0 | N | 200.13 | 60.95 | 60.30 | 6.25 | 6.17 | 6.06 |
| | | S | 200.47 | 60.92 | 60.28 | 6.33 | 6.06 | 6.08 |
| PE-500 | 1,0 | N | 200.35 | 60.90 | 60.29 | 6.03 | 5.93 | 5.97 |
| | | S | 199.92 | 60.06 | 60.70 | 6.16 | 5.83 | 5.87 |
| PT-350 | 0,0 | N | 200.42 | 61.12 | 60.85 | 6.37 | 6.08 | 5.97 |
| | | S | 201.20 | 60.10 | 60.90 | 6.17 | 5.99 | 6.01 |
| PT-500 | 0,0 | N | 199.82 | 60.26 | 60.16 | -- | 5.89 | 5.88 |
| | | S | 200.04 | 60.22 | 60.35 | -- | 5.95 | 5.94 |
| PR-650 | -1,0 | N | 199.86 | 60.35 | 60.69 | -- | 5.85 | 5.83 |
| | | S | 200.35 | 60.39 | 60.10 | -- | 5.99 | 5.99 |
| CE-250 | 1,0 | N | 200.20 | 60.46 | 61.35 | 5.92 | 6.03 | 6.01 |
| | | S | 199.93 | 60.33 | 60.62 | 5.98 | 6.02 | 5.98 |
| CE-500 | 1,0 | N | 200.00 | 60.70 | 60.66 | 5.80 | 5.84 | 5.93 |
| | | S | 200.28 | 60.39 | 60.47 | 5.89 | 6.03 | 6.03 |
| CT-350 | 0,0 | N | 199.94 | 60.92 | 60.65 | 6.13 | 5.80 | 5.80 |
| | | S | 200.11 | 61.57 | 60.52 | 6.04 | 5.82 | 5.89 |
| CT-650 | 0,0 | N | 200.18 | 60.64 | 60.65 | 6.03 | 5.88 | 5.87 |
| | | S | 200.28 | 60.03 | 60.58 | 6.20 | 5.99 | 6.03 |
| SE-250 | 1,0 | N | 200.84 | 61.12 | 60.06 | 6.08 | 5.98 | 6.07 |
| | | S | 200.69 | 60.85 | 61.07 | 6.11 | 6.01 | 6.06 |
| SE-500 | 1,0 | N | 200.39 | 60.68 | 60.72 | 5.99 | 6.00 | 5.99 |
| | | S | 200.39 | 60.70 | 60.00 | 6.02 | 5.92 | 5.92 |
| ST-350 | 0,0 | N | 199.94 | 61.37 | 60.29 | 6.02 | 5.98 | 6.00 |
| | | S | 200.49 | 60.86 | 61.03 | 6.05 | 6.01 | 6.02 |
| ST-650 | 0,0 | N | 200.60 | 60.36 | 60.64 | 5.97 | 6.05 | 6.13 |
| | | S | 199.97 | 60.79 | 60.15 | 5.92 | 6.01 | 6.02 |
| SSE-500 | 1,0 | N | 200.45 | 60.40 | 60.90 | 5.97 | 5.99 | 6.02 |
| | | S | 200.51 | 60.42 | 60.46 | 6.03 | 6.04 | 6.08 |
| BSE-500 | 1,0 | N | 200.41 | 60.56 | 61.05 | 5.95 | 5.93 | 6.00 |
| | | S | 200.41 | 60.42 | 60.23 | 5.96 | 5.98 | 6.00 |

UNIT : mm

キャスト床板の各試験体での配置を Fig. 4 に示す。プレキャスト床板は幅は 2080mm で共通、長さが 1000mm, 1250mm, 1500mm の 3 種類の組合せで構成しており、各試験体共途中で床板の切れ目を複数有するので床板の存在による鉄骨はりの耐力上昇はないように設計してある。Fig. 4 中 ▲印の位置で Fig. 5 に示

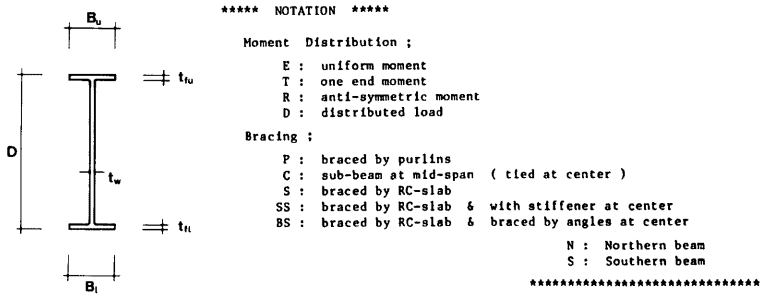


Fig. 3 Notation in dimensions of the beam

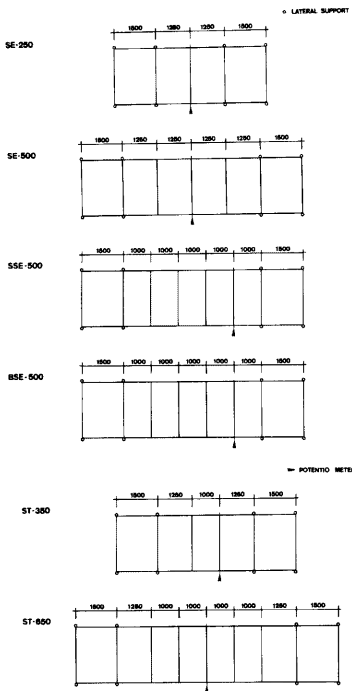


Fig. 4 Arrangement of pre-cast reinforced concrete slabs

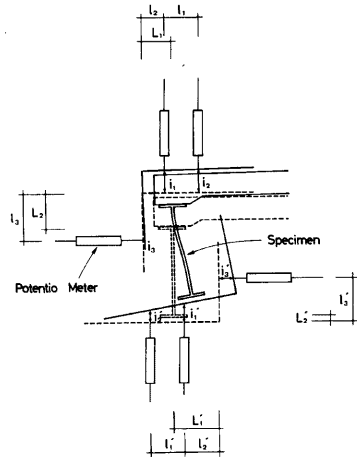


Fig. 5 Method of displacement measurement

すように配置した変位形によって上, 下フランジの水平変位 (U_v, U_L), 鉛直横変位 (V_v, V_L), 捩れ角 (W_v, W_L) を測定した。なお Table 1, 3 の最下 2 欄に示す試験 SSE-500, BSE-500 ではスパン中央に Fig. 2(d) に示すスチフナ (SSE) 及び山形鋼補剛材 (BSE) を取り付けその補剛効果を調べた。

載荷の制御は, 最初は荷重制御で行い, はりの塑性化が進行し始めるか横たわみが大きくなり始めた後は, 載荷点の鉛直変位で制御した。フランジの横

変位が大きくなるに従い, 下側フランジの横方向変位をスパン 8 等分点で適時測定し横たわみモードを確認した。

2.2 実験結果

各試験体は製作に伴う不可避の元変形を有している。Fig. 6 に試験体組立て完了後に測定した試験スバ

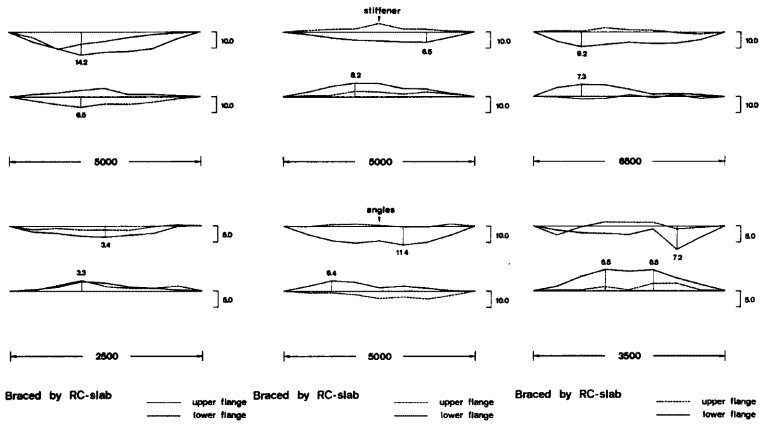


Fig. 6 Initial lateral deflection of flanges.

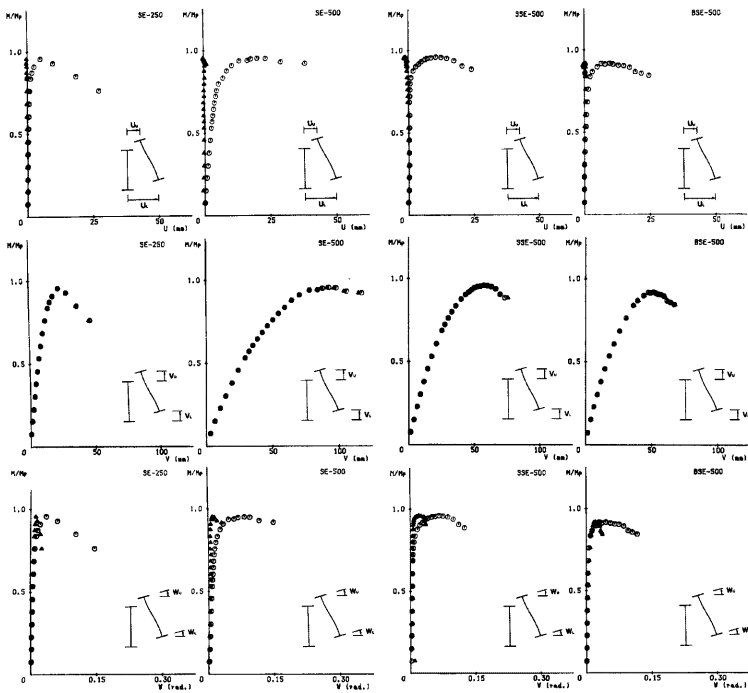


Fig. 7 Experimental load vs displacement relationship of the beam with reinforced concrete slab

ン内での上, 下フランジの水平横方向元たわみの大きさと分布を示す。

床スラブ付きはり横座屈実験結果を Fig. 7 に示す。図中, 試験体名は SE は床スラブ付き・等曲げ (中央試験スパン内で), ST は床スラブ付き・片曲げ (中央試験スパン内で) また, SSE, BSE はスチフナ付き・等曲げ, 山形鋼拘束材付き・等曲げをそれぞれ表す。続く 3 桁の数は横座屈スパン (中央スパン) 長を表す。図中の○印は下側フランジ, △印は上側フランジでの測定値を表す。図の縦軸は外力によって生じるはり断面強軸まわりの曲げモーメントのスパン内での最大値 (M) をはり鉄骨断面の全塑性モーメント (M_p) で除した無次元耐力, 横軸は Fig. 4 ▲印位置で測定した各変形量を表す。図に示される通り, はり上に設置された床スラブの効果により, 上フランジの横移動はなく, 振れ角も極めて小さい。

Fig. 8 に下側フランジ (圧縮フランジ) の横たわみ形の測定結果を示す。中央スパンで等曲げを受けるはりの場合には, このフランジの横たわみモードから測られる座屈波長は SE-250 の場合で約 1250mm, SE-500 の場合には対の 2 本のはりで最大変位を生じている位置は異なるが座屈波長はほぼ等しく約 1550~1700mm である。スパン中央にステフナあるいは山形鋼による拘束材を設けた SSE-500 と BSE-500 の場合に

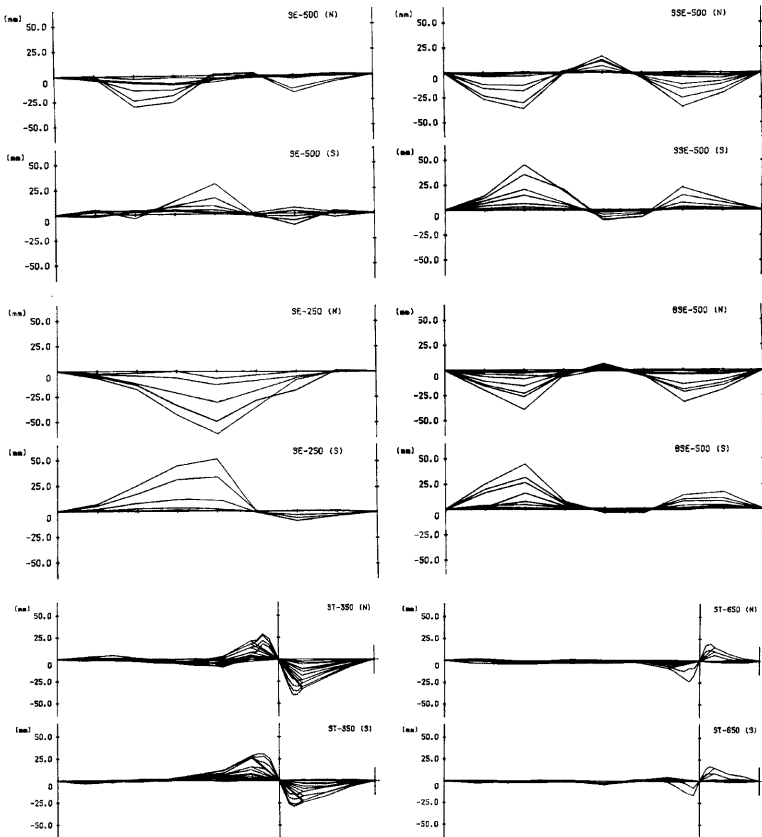


Fig. 8 Experimental mode of lateral deflection of the lower flange

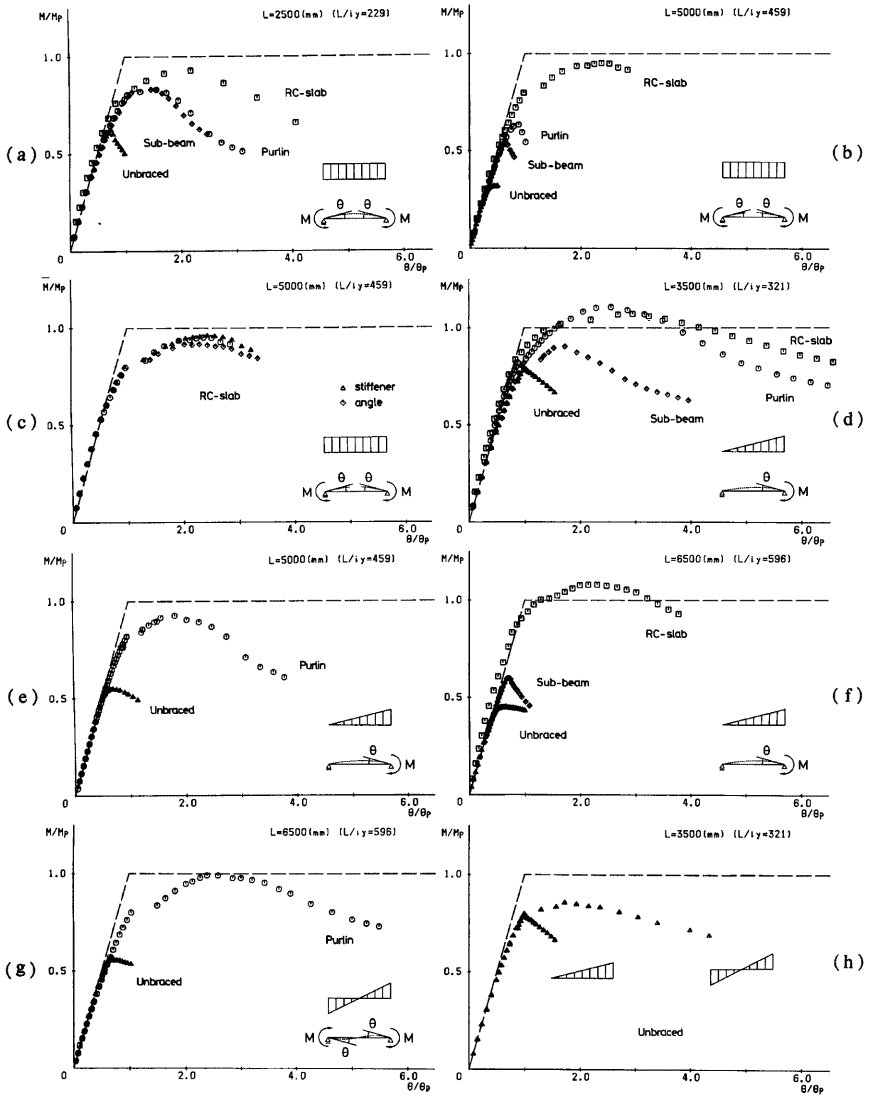


Fig. 9 Experimental M/M_p , vs θ/θ_p , relationship of the beam with reinforced concrete slab

は、中央補剛点での横変位は小さく、中央点を中心としたほぼ対称の座屈モードとなっている。この時の座屈波長は SE-500 にほぼ等しく約 1700mm である。中央試験スパンで片モーメントを受ける ST-350, ST-650 の場合には、フランジに横変位が生じるのは最大モーメント点近傍に限られる。

2.3 種々の拘束材の補剛効果

Fig. 9 は本実験シリーズ I, II, III, IV によって得られた種々の曲げモーメント分布の下で種々の横座屈拘束材をもつばりの曲げモーメント (M/M_p) とたわみ角 (θ/θ_p) の関係を比較したものである。Fig. 9(a), (b), (c) は中央試験区間で均等曲げを受ける場合で、 L/i_y (横方向細長比) = 229, 459, 459 に対応している。(c) 図はスパン中央のスティフナ、山形鋼拘束材の効果を見るための比較図である。Fig. 9(d), (e), (f) は中央試験区間で片モーメントを受ける場合で $L/i_y = 321, 459, 596$ に対応している。Fig. 9(g) は中央試験区間で逆曲げモーメントを受ける場合で $L/i_y = 596$ の場合である。Fig. 9(h) では $L/i_y = 321$ の場合について

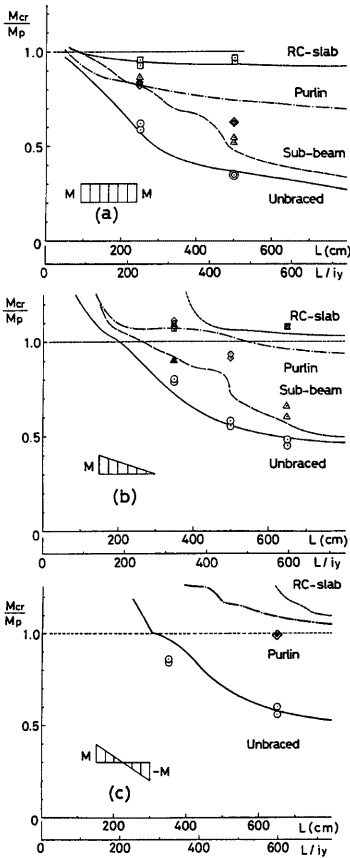


Fig. 10 Maximum load carrying capacity of the beams

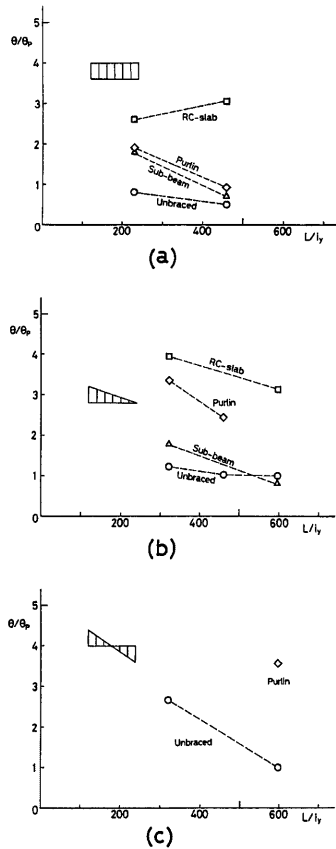


Fig. 11 Deformability of the beams

片モーメントを受ける場合と逆曲げモーメントを受ける場合が比較されている。

中央試験スパンより短い長さのプレキャスト板が小さな間隔をおいてはり上にならべられているので均等曲げを受ける場合には、はりの最大耐力が床スラブの存在によって鉄骨断面の全塑性耐力を上まわることはないが、床スラブ付きはりの最大耐力はその他のはりよりは大きくっており、床スラブの横屈耐力を高める効果が大いのがよくわかる。Fig. 10 は各シリーズについて実験で得られた最大耐力と横方向細長比の関係をモーメント分布で区別して示したものである。曲げモーメント勾配がある場合には歪硬化の影響で最大耐力が鉄骨断面の全塑性耐力を上まわることもあるのがわかる。Fig. 11 は最大耐力の95%まで耐力が低下した時のたわみ角 (θ/θ_p) と横方向細長比の関係をプロットしてはりとしての変形能力を評価しようとしたものである。Fig. 10, Fig. 11 によって横方向細長比が小さくなる程、中央試験区間内の曲げモーメント勾配が大きくなる程、最大耐力、変形能力が大きくなる傾向にあることがわかる。さらに、大部分の領域では無拘束→中央小ばりによる拘束→母屋による拘束→床スラブによる拘束の順に最大耐力、変形能力を高める効果が大きくなっているのがわかる。

スパン中央にスチフナや山形鋼拘束材が存在する場合については、Fig. 8 でみたように、スチフナや山形鋼拘束材が無い場合にも圧縮側フランジの横たわみモードの全体的な形は必ずしも同じにはならないものの隣接部材の存在やウェブの面外剛性と耐力の効果で座屈波長がかなり短くなっており、結果的にスチフナや山形鋼拘束材のある場合の座屈波長とほぼ等しくなるため、スチフナや山形鋼拘束材の存在がはりの最大耐力や変形能力を高める効果はなかった (Fig. 9(c) 参照)。しかし Fig. 8 に示されたようにスチフナ、山形鋼

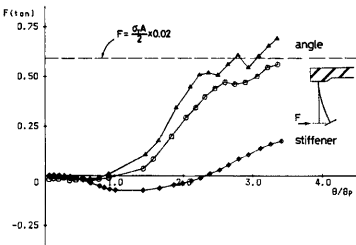


Fig. 12 Bracing force in stiffener and angle-
brace

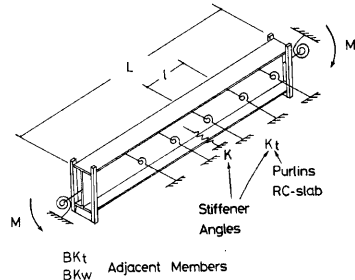


Fig. 13 Analytical model in FEM analysis

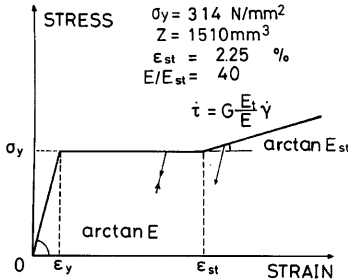


Fig. 14 Assumed stress-strain relationship of
steel

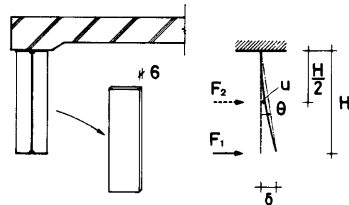


Fig. 15 Estimation of the bracing rigidity of
the stiffener

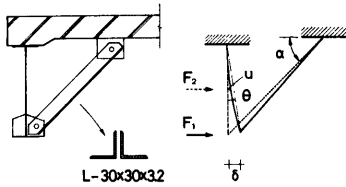


Fig. 16 Estimation of the bracing rigidity of the angle-brace

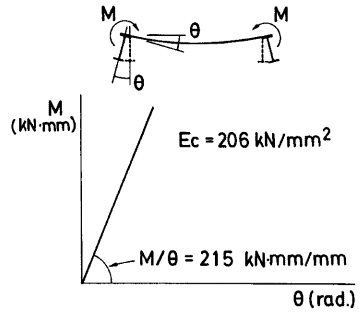


Fig. 17 Bracing rigidity of the reinforced concrete slab

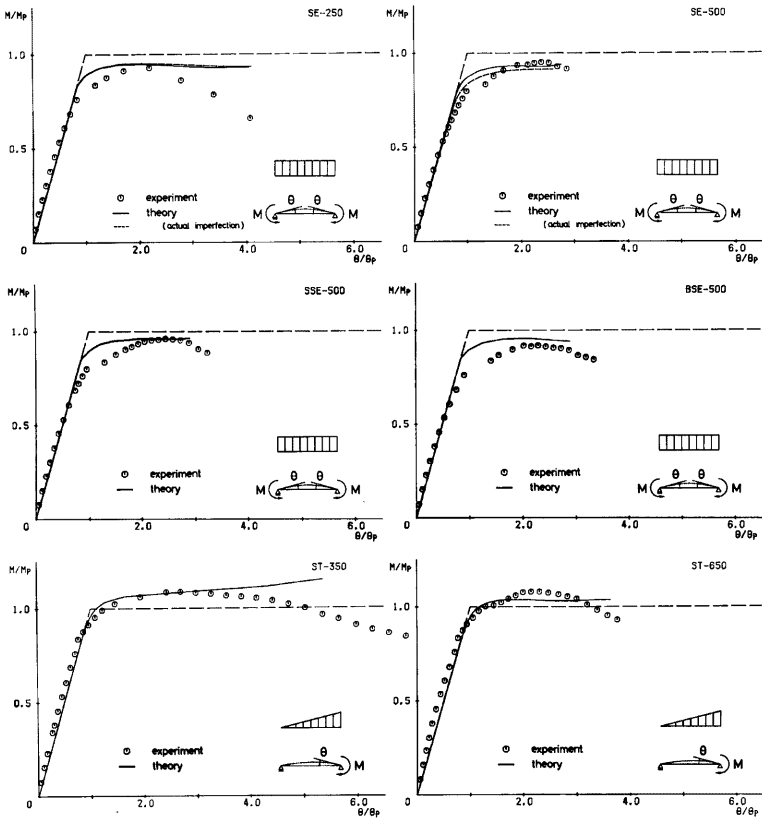


Fig. 18 Comparison of analytical results with experimental results in M/M_p vs θ/θ_p relationship

拘束材のある位置での下側フランジの横方向変位は小さく座屈モードの対称点ともなっており補剛点としての効果はあるものと判断できる。Fig. 12 はスチフナ及び山形鋼拘束材に貼付したストレインゲージにより求めた圧縮フランジによって与えられた横座屈に伴う補剛力である。拘束材に働く補剛力は全塑性耐力時にはりに働く圧縮合力のほぼ 2%以下となっている。

3. 解 析

3.1 解析方法

本報で用いた理論解析の方法は、薄肉開断面ビームシェル理論に基づく有限要素法弾塑性解析法である。解析の詳細は前報1)及び文献2)に詳述されているので本報では、解析法の展開は行わない。

床スラブ付きはりの挙動の解析のために用いられたモデルの性状は次の通りである。解析用はりモデルの模式図を Fig. 13 に、はり材の応力-歪関係を Fig. 14 に、床スラブ及びスチフナ、山形鋼拘束材の剛性評価法を Fig. 15, 16 にそれぞれ示す。床スラブ、スチフナ、山形鋼拘束材はいずれも完全弾性拘束材として扱った。床スラブの剛性評価例を Fig. 17 に示す。

3.2 解析結果

解析結果の例として、 $M/M_p-\theta/\theta_p$ 関係を実験結果と比較して Fig. 18 に示す。解析による最大耐力はまずまずの精度で実験耐力を予測できるが、最大耐力以後の耐力低下性状の追跡はまだ不十分である。解析には横座屈に伴うはり断面の変形や局部座屈の影響は導入されていないので、特に片モーメントや逆モーメントを受ける場合には解析上横座屈は起っておらず実験における耐力低下は追跡できていない。Fig. 10 には、はりの最大耐力の解析値が同時に示してあり実験結果と比較できる。

Fig. 19 は解析より得られた圧縮側フランジの横たわみモードの推移を示したものである。SE-500 を除い

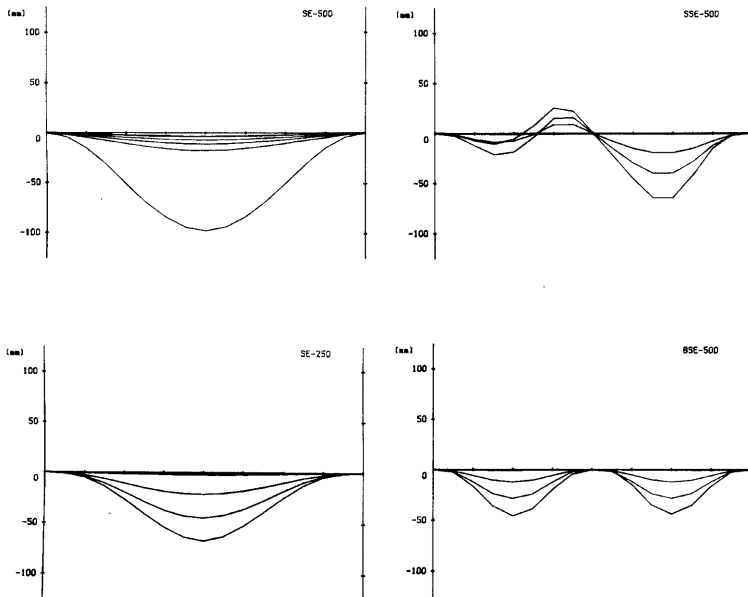


Fig. 19 Analytical mode of lateral deflection of the lower flange

て横たわみモードは解析によってよく追跡されている。

4. 結 論

鉄筋コンクリート床スラブによる鉄骨はりの横座屈に対する補剛効果は極めて大きいことが判明した。スパン内の曲げモーメント分布が片モーメント状態あるいは逆モーメント状態の場合には横方向細長比 L/i_y が600を越えても ($L/i_y=600$ は、本実験の場合にはスパンとはり丈の比で約33に相当する) 最大耐力が鉄骨断面の全塑性耐力を下まわってはいない。現実にはりが鉛直荷重による曲げと地震によって生ずる水平力による曲げを同時に受ける場合には横座屈に対してはより有利な応力状態が現出されるから、はり上面に床スラブが存在するはりの場合には地震力を受ける際には横座屈によってはりの最大耐力が鉄骨断面の全塑性耐力を下まわるとは非常に長いはりを除いてないと判断できる。

一方、屋根自重が小さい場合で風荷重が作用して、はりに吹き上げ力が働く場合には、はりのかなりの長さにわたって下側フランジが圧縮となり、本報における均等曲げに近い状態が現出される場合が起り得る。このような場合には横座屈によって、最大耐力が全塑性耐力より若干小さくなることを考慮しなければならない。しかし本実験のようにウェブがあまり薄い場合には $L/i_y=600$ 程度の長いはりでも床スラブがあれば最大耐力として、 $M/M_p \approx 0.9$ 程度は発揮できている。

以上に述べたごとく、鉄筋コンクリート床スラブの横座屈補剛効果は極めて大きいと結論できる。

参 考 文 献

- 1) 若林 實・中村 武・中井政義：鉄骨はりの横座屈と横座屈に対する補剛材の効果に対する実験的研究(その1), 京大防災研年報, 第26号 B-1, 1983, pp. 245-262.
- 2) 中井政義：H形断面はりの横座屈と横座屈補剛に関する実験的研究, 京都大学修士論文, 1984.3.