

合成梁の剛性と塑性耐力

井上一朗*

はじめに

合成梁とは、図1に示すように、鉄骨梁とコンクリートスラブとをシャコネクタで結合した複合構造である。このような合成構造については、1930年代に欧米で研究が開始され、1940年にはいって道路橋で広く利用され始めている。建築構造ではやや遅れてその利用は1950年代になってからのことであるが、当初は高い剛性に着目して、床荷重が大きい場合や大スパン梁に使用されていた。一般に広く利用され始めたの

は比較的最近のことである。建築構造物では、図1に示すように、デッキプレートを捨型枠として用い、その上にコンクリートスラブを打設する構法が多くとられている。

シャコネクタとしては、当初チャンネルや折り曲げた鉄筋などを鉄骨梁の上フランジ上に溶接したものが使用されていたが、溶接技術の信頼性の向上に伴い、現在では図1中に示すスタッドコネクタが用いられている。

合成梁の大きな特徴は、その剛性および耐力が純鉄骨梁のそれに比べてかなり上昇すること

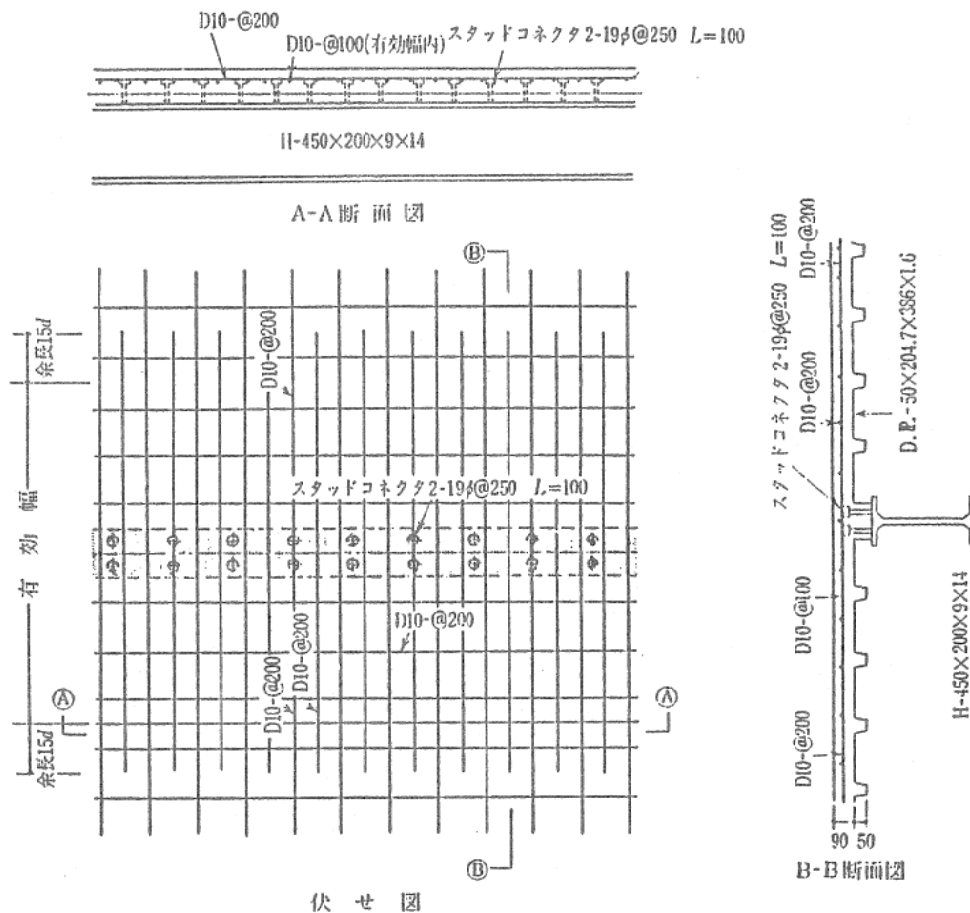


図 1

* 井上一朗 (Kazuo INOUE), 大阪大学, 工学部, 建築工学科, 五十嵐研究室, 助手, 工学博士, 建築構造

にあり、一般に剛性では2倍前後、耐力では1.5~2倍程度になる。わが国では、大部分の建築構造物は地震力に対して設計されているが、構造物に入力される地震力はその剛性や耐力に左右されるため、合成効果を的確に評価しなければ設計用地震力そのものが信頼できないことになる。

従来の合成梁に関する研究は単純梁や連続梁を対象としたものが多く、荷重としては鉛直力を想定している。しかしながら、建築構造物に地震力が作用する場合、合成梁は複曲率曲げを受け、部材の中間でコンクリートスラブの軸力が圧縮から引張へと変化する。コンクリートは引張に対して強度が期待できないため、合成梁は変断面部材として挙動することになる。その他、繰返し力としての地震力に対して合成梁架構がどのように応答するかを解析するためには、弾塑性域における合成梁の挙動を把握しておく必要がある。

筆者が所属する研究室では5年ほど前から地震力を受ける合成梁および合成梁架構の弾塑性履歴特性に関する研究を行っており、ここ2年の間にいくつかの実験も行っている。本稿ではつい最近行った実験の一部を紹介する。

合成梁の実験

試験体は、図2に示すように、H-250×125×6×9のH形鋼の鉄骨梁にデッキプレート付きコンクリートスラブをスタッドコネクタを介して緊結したもので、実物の約 $\frac{1}{2}$ ~ $\frac{1}{3}$ のスケールである。この試験体は完全合成梁となるように設計されているが、完全合成梁とは、合成梁が終局曲げ耐力に達するまでスタッドコネクタが破壊しない合成梁のことである。

試験体を加力装置にセットして、図3に示すように部材中央に鉛直力Vと両端に繰返しモーメント M_L , M_R を作用させる。モーメントは両端の部材端回転角 θ が常に等しくなるように作用させている。これは、多層多スパンフレームに水平地震力が作用したときの合成梁の挙動を再現するためである。

V=0の場合の実験結果を図4、5に示す。図4は図2に示した合成梁試験体の荷重-変形関係を示すもので、縦軸は両端のモーメント和を鉄骨梁の全塑性モーメント (M_p^s) で無次元化しており、横軸は両端の回転角 θ (rad.) である。図5は合成効果を確認するために行った鉄骨梁の実験結果を示すもので、座標軸は図4

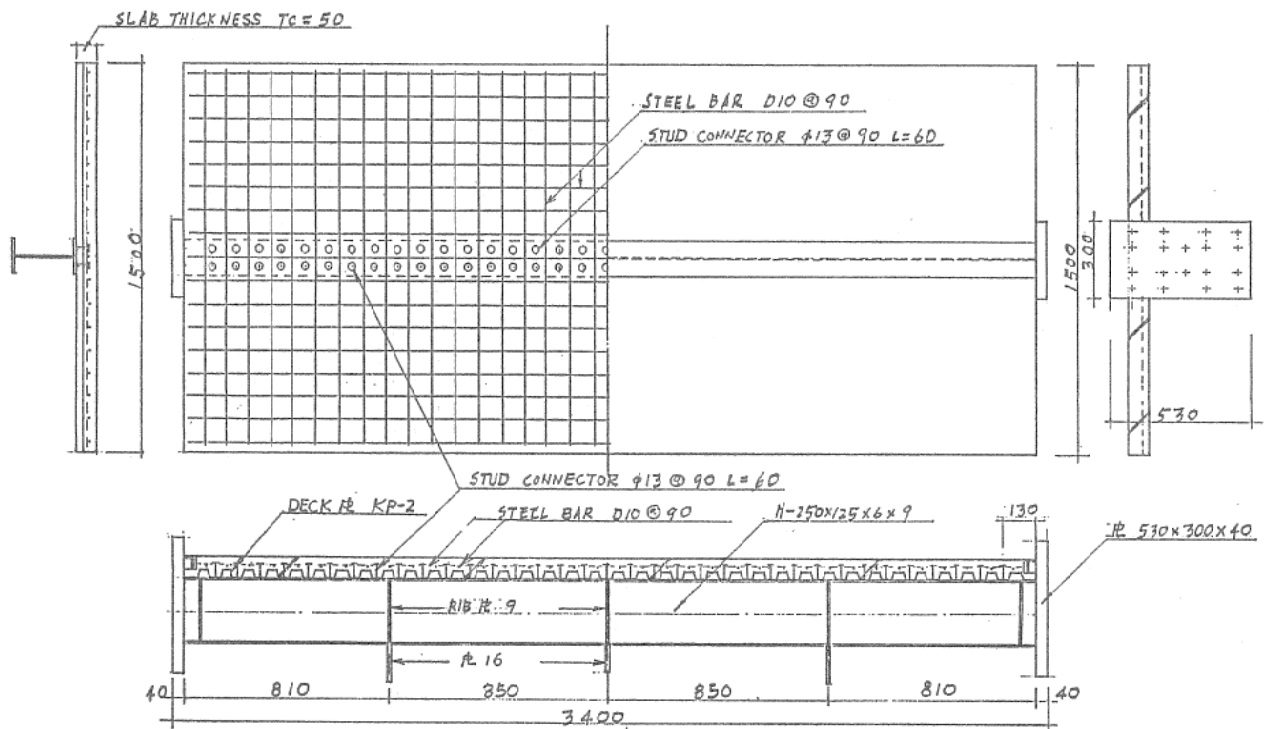


図 2

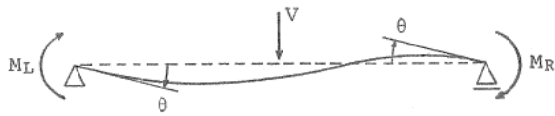


図 3

と同じである。両者を比較すれば、剛性、耐力ともに合成梁の方が5割前後大きく、スタッドコネクタによる合成効果は明らかであろう。また、合成梁は鉄骨梁に劣らず十分な塑性変形能

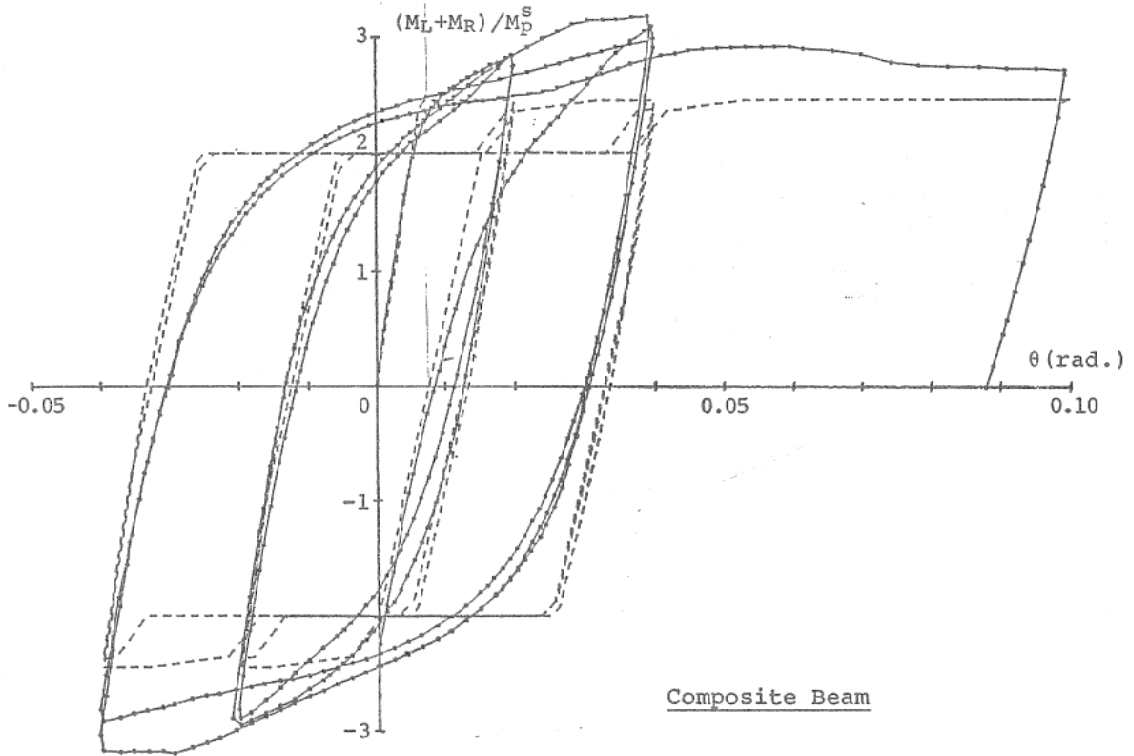


図 4

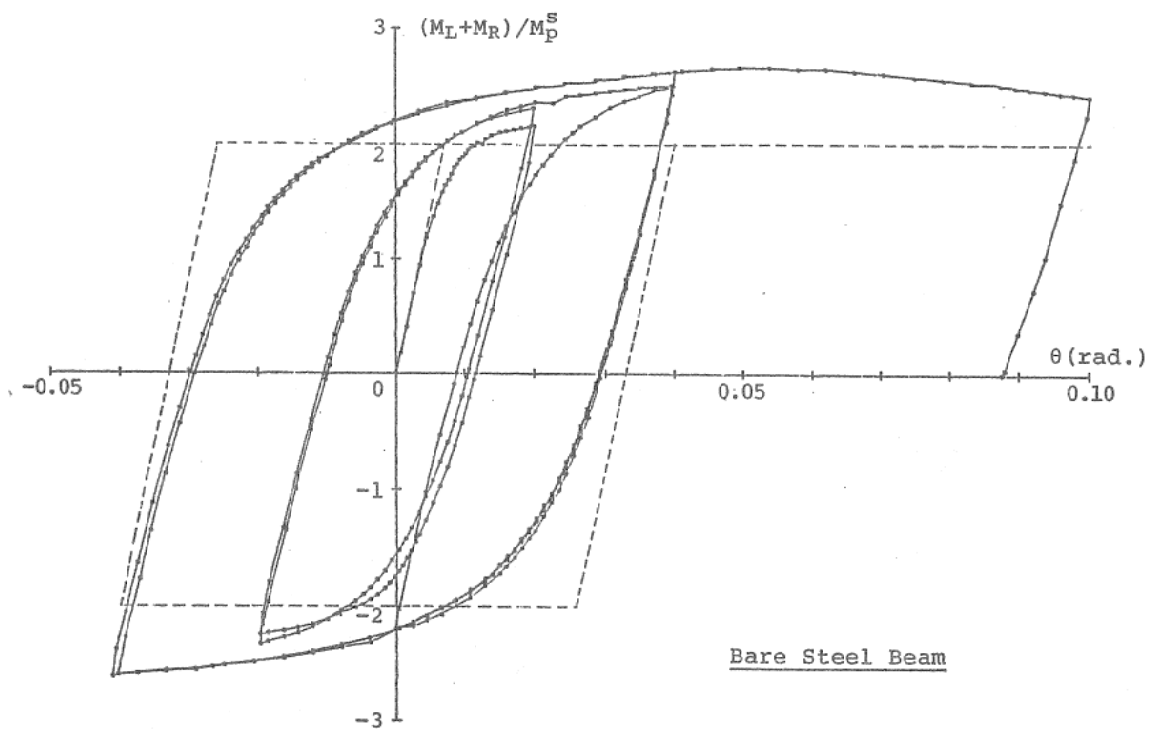


図 5

力を有していることも明らかである。ただし、鉄骨梁試験体の荷重—変形曲線は紡錘形の履歴ループを示すのに対して、合成梁試験体では、繰返し加力後に鉄骨梁の塑性化による剛性の低下が生じた後、再び剛性が上昇する hardening の現象が認められる。これは、逆方向加力時に生じたコンクリートスラブの亀裂が閉じて圧縮に抵抗するようになるからである。最終的には 0.05 rad. 以上の大変形領域で耐力がやや低下しているが、これは鉄骨梁における局部座屈の発生やコンクリートスラブの圧壊などによるものである。

合成梁と鉄骨梁の剛性と耐力の差をさらに詳しく調べるために、 $\theta=0.02$ rad. までの初期加力時の部材端モーメントと回転角の関係を図示したのが図6である。一般に合成梁では、コンクリートスラブ表面に圧縮力を作用させる曲げモーメントを正、一方スラブ表面に引張を作用させるものを負とする。図6において、 M^+ 、 M^- はそれぞれ合成梁の正側および負側の部材端モーメントを表し、 M_s は鉄骨梁の部材端モーメントを表す。ただし、縦軸は図4、5の場合と同様 M_p^s で無次元化されている。正曲げ側の剛性は鉄骨梁のその約2倍、耐力は約1.5倍である。負曲げ側でも正曲げ側の剛性の増加に伴って剛性がかなり高くなっており、また耐力もスラブ内の軸方向鉄筋の効果で鉄骨梁に比べてやや大きくなっている。

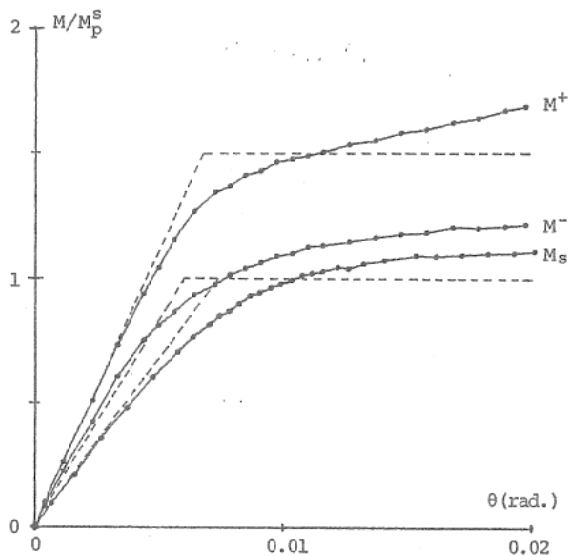


図 6

合成梁架構の弾塑性応答

地震外乱に対する構造物の静的あるいは動的弾塑性応答を解析するためには、任意の載荷履歴に対応できる増分型剛性行列の定義が必要である。図4、5、6中の点線は、一般化塑性ヒンジ理論に基づいて作成した剛性行列によって解析した結果を示している。実験値と解析値がよく合っているとは言いが、弾性域の剛性はほぼ一致しているし、また塑性耐力については、剛性が急激に低下する荷重レベルを捉えていると言えよう。解析値は塑性ヒンジ論によるものであるから、歪硬化やバウシinger効果などが考慮されていないため、最大耐力は実験値の方が大きく、また弾性から塑性への過渡領域において解析値と実験値にかなりの差が認められる。しかし、鋼材およびコンクリートの応力度—歪度関係に実際的な関係を定式化し、C DC法あるいは有限要素法を用いて解析すれば、図4、5に示す実験曲線の追跡は可能である。

図4の履歴曲線で気になるのは、一旦開いたコンクリートスラブの亀裂が閉じるまで耐力レベルが鉄骨梁の耐力レベルに留まることである。しかし、この程度の履歴特性の劣化によって激震外乱に対する変形の最大応答が増大することはないことを、筆者らは数値実験によって検証している。これは、激震に対する変形応答は一方向に偏る傾向があるからである。

おわりに

現在、合成梁架構の実施設計において合成効果を評価しているケースは少ない。しかし建築物に作用する地震力の大きさを把握するうえで剛性の評価は欠かせないし、また地震力やその他の荷重に対する建築物の安全率を明確にするためには、個々の部材耐力のレベルを的確に評価したうえで架構の塑性崩壊荷重を求めなければならない。前述したように、合成梁の剛性・耐力については、鉄骨梁の場合と同程度の精度で算出することができる。合成梁の剛性や耐力の計算はそれほどやっかいなものではなく、また鉄骨梁の横座屈に対する拘束効果も大きいから、若干の煩雑さをいとわなければ合理的かつ経済的な設計が十分可能となる。