

研究展望

複合構造に関する研究の発展の歴史と動向

HISTORY AND TREND OF PROGRESS OF STUDIES ON HYBRID CONSTRUCTIONS

前 田 幸 雄*

By Yukio MAEDA

1. ま え が き

1950 年代に世界の各国で実用化された合成桁の研究は、その後社会の要請に応じて鋼構造、コンクリート構造に加えて複合構造という第三の構造にまで発展し、将来、さらに多方面の構造物に 응용されようとしている。本論文においては、国内の基礎的研究に重点をおいて、複合構造研究の発展の歴史を省み、最近の主な研究を論じ、また将来の研究課題を提案したい。

議論を進めるにあたって複合構造の定義を明らかにしておきたい。広い意味では鉄筋コンクリートや PC 構造も複合構造の一つであると考えられるが、これらを除外すると表-1 のような分類と定義になる。

合成桁という狭義の複合構造から脱して新しい広義の定義を与えたのはアメリカ合衆国の合成構造の先駆者である I.M. Viest の 1972 年 IABSE 第 9 回大会発表の論文である。混合構造という新しい概念を発表したのはアメリカ合衆国の H.S. Iyengar の 1977 年の ASCE 出版の合成と混合構造の調査報告であり、また 1978 年の合成・混合構造の日米合同セミナーではその実施例が 4 編の論文に発表された。現時点では鋼材とコンクリートの複合が主な構造であるが、その他にいわゆる複合材料・アルミ合金・高分子材料・ファイナセラミックスなども異種材料であって、これらの組合せからなる合成構造や混合構造の発展も将来期待できよう。

複合構造の研究は複合という学際的な考え方に基づいて、各種構成材料の特性を生かした連結方法や施工法に新しい分野を開拓し、広範な応用へと発展してきた。た

表-1 複合構造の分類と定義

| 分 類 | 定 義 |
|----------|--|
| I. 合成構造 | 異種材料の組合せによって断面が構成される構造 |
| 合 成 桁 | 鋼桁と床版を連結した構造、鋼桁をコンクリートで被覆した構造 |
| 合 成 柱 | コンクリート充填鋼管柱、コンクリート被覆鋼柱(鉄骨鉄筋コンクリート柱を含む) |
| 合 成 壁 | 連続した鋼柱列をコンクリートで被覆した壁体構造 |
| 合 成 床 版 | 鋼製床組をコンクリートで被覆した床版、鋼板とコンクリートを合成した床版、箱断面鋼床版にコンクリートを充填した床版 |
| 合成シェル | 曲面鋼板とコンクリートを複層に連結した構造 |
| II. 混合構造 | 異種材料からなる部材を組み合わせた構造システム |
| 桁 形 式 | 長さ方向の異種材料の桁の組合せからなる連続桁構造 |
| 塔 形 式 | 高さ方向の異種材料の柱の組合せからなる塔構造 |
| 斜張橋形式 | 塔、ケーブル、桁が異種材料からできている斜張橋構造 |
| ラーメン形式 | 異種材料の柱とはりの組合せからなるラーメン構造 |

たとえば橋梁では、単純・連続形式合成桁、プレビーム、合成床版、混合構造形式のラーメンと斜張橋、鉄骨鉄筋コンクリート橋脚、その他の分野では合成構造のサイロ、タンク、シールドセグメント、消波堤、浮ドック、駅構造物、また混合構造の石油生産プロダクションプラットフォームなどを挙げることができる。

しかしながら、現在わが国では複合構造の分野では実用化のための技術開発が基礎研究よりも先行しており、総合的な複合構造、特に混合構造システムの発展のためには、異種材料または異種部材の相関性を考慮したシス

* 正会員 工博 大阪大学教授 工学部土木工学科
(〒565 大阪府吹田市山田丘 2-1)

テム最適化とシステム信頼性、および連結機構の詳細な研究、使用性と終局限界を考慮した設計法などの研究が進歩しなければならない。以下に合成プレートガーダー、合成箱桁、合成柱、混合構造、ずれ止め、設計法に分けて研究の発展の歴史と現況について論述し、また将来の問題点の考察を試みたい。

2. 鋼プレートガーダーとコンクリート床版の合成構造

(1) 弾性挙動

a) 単純支持形式

鉄筋コンクリート床版と鋼桁をずれ止めで合成したいわゆる合成桁が鋼材の節約や大きな剛性などのために、西独では 1941 年の Maier-Leibnitz の研究などを手掛かりとして、1950 年代に入り主としてずれを生じない静定系剛合成について Graf, Klöppel, Fröhlich, Busemann, Dischinger, Heilig, Sattler, Fritz, Sontag, Steinhart らによって研究が進められ、合成断面の計算には鋼とコンクリートのヤング係数比 n を用いて弾性強度を求め得ることが明らかにされた。その後版コンクリートのクリープ、乾燥収縮の影響、版と桁の温度差の扱い方が研究の中心となり、現在わが国でも採用している想定ヤング係数比 n_1 (クリープの場合) や n_2 (乾燥収縮の場合) を用いて実用上精度のよい値が得られることが確かめられて以来、合成桁は多くの道路橋に利用されてきた。アメリカ合衆国では同じ頃 Siess (1948) の研究を手始めとして、Viest, Fountain, Singleton らが 1950 年代の研究を進め、Nelson Stud Welding 社の開発したスタッド溶植方法の実用化によって広く合成桁が用いられるに至った。わが国では 1952 年建設省の土木研究所が研究を開始して以来、当時の大阪大学 安宅教授や大阪市大 橋教授らによって合成桁の理論的な研究が行われ、1953 年大阪市の神崎橋、榎橋、1954 年東京都の代田橋、大阪市の古江橋と続いて架設され、以来合成桁橋が普及することとなった。

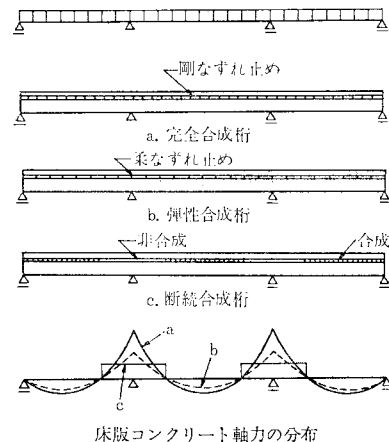
b) 連続形式

単純支持合成桁橋の経済的支間長はおよそ 40 m とされてきたが、さらに経済的理由から連続形式の合成桁が研究された。この形式では最初二つの問題が扱われた。一つは中間支点近傍の負モーメントにいかに対処するかということ、いま一つは床版にプレストレスを与えた場合、床版に加わる持続した圧縮応力によるコンクリートのクリープをいかに計算するかという問題である。前者の問題について一連の研究が Sattler によって行われ、支点の上げ下げの工法と床版に PC 鋼材を使用する工法のいずれか一方、または併用によってプレストレスを床版に導入して、連続形式の場合も完全合成桁として設計

することが提案され、この方法が今日に至るまで西独の連続合成桁設計の主流をなしてきた。後者の問題については Sattler, Fritz, Blaszkowiak, Walter, 安宅, 橋らがそれぞれ解法を発表した。西独では 1950 年代後半から 1960 年代の前半にかけて最大支間長 40~80 m の連続合成桁橋が架設された。わが国では 1958 年の大阪の毛馬橋 (55 m) を初めとして 1964 年までに 31 橋の架設が行われたが、1970 年大阪のモスリン橋 (76.5 m) を最後にその後実施例がない。その理由は計算の繁雑、合成後のプレストレスのため応力変化が大きい、架設期間が長い、施工技術に要求される経験、余分の架設工費などのためである。特に長スパン橋梁以外は有利でない。このことからプレストレスしない連続合成桁の研究が日本やアメリカ合衆国で進められた。

いま、等分布荷重を受ける種々の連続合成桁の床版に生ずる軸力の分布を比較してみる (図一1)。床版と鋼桁にずれを生じない完全合成桁に対して 2 種類の不完全合成桁を取り上げる。弾性合成桁と断続合成桁である。前者は柔らかいずれ止めを用いて鋼桁と床版間に弾性的なずれを生じるように設計したもの。後者は桁の一部を剛なずれ止めを用いて完全合成桁とするが、桁のある部分、一般に中間支点近傍を非合成とするように設計したもの。両者は床版に作用する引張力を軽減するための構造形式であって、図一1 の比較から明らかである。

この考え方によって 1960 年後半から米国リーハイ大学の Fisher, Slutter, Daniel らの一連の研究の結果、床版のひびわれを抑え、引張フランジの疲労強度に与えるずれ止めの有害な影響を避けるために、負モーメント域の一部または全域のずれ止めを除いた断続形式の有利なことが認められた。この場合、死荷重による正負モーメントの境界近傍に追加ずれ止めを設けることと、負モーメント域の引張鉄筋を正モーメント域に十分定着する



図一1 等分布荷重を受ける連続合成桁の床版の軸力分布

ことが大切であることが明らかにされ、これらの研究成果が AASHTO 示方書の規定に採用された。

わが国では全域にずれ止めを配置した連続合成桁の研究が行われた。橋らの静的強度の研究、前田らの疲労の研究に基づいて、プレストレスしない連続合成桁橋の設計法の研究²⁾もまた進められた。これら一連の研究の結果明らかにされたことは、中間支点上床版のコンクリートのひびわれを容認し、負モーメント域の抵抗断面として鋼桁と床版内橋軸鉄筋からなる鋼断面が有効に作用すること、ひびわれ幅をおよそ 0.2 mm 以内にとどめるための床版内の鉄筋比と周長率の値を定量化したこと、負モーメント域引張フランジの疲労強度に与えるずれ止めの影響をずれ止めに働くせん断応力によって評価したことである。この結果、プレストレスしない連続合成桁橋の規定が現行道路橋示方書に採用された。

英国ではワーウィック大学の Johnson が連続合成はりの実験によって局部座屈や部分合成の研究を実施し、またオーストラリアのシドニー大学でも Hallan らを中心に疲労性状の研究が発表されている。

c) 合成床版の有効幅

有効幅については DIN や AASHTO の規定のほかに、福田・Stiglat, Dischinger らの研究が以前に発表されたが、前田・岡村らは従来の研究を検討した結果、同一符号のモーメント図を有する桁については DIN の規定と同様であるが、変化する符号を有するモーメント図を有する桁の場合、放物線分布と三角形分布に対して新しい計算式を与え、さらに拡張して鋼床版の有効幅への適用を示した。この成果が現行道路橋の設計示方書の規定に採用されている。その後有住・浜田らは³⁾不完全合成桁の有効幅の解析的研究を行い、現行示方書規定と比較し、規定の計算では下フランジでは大きく、上フランジでは小さく評価する結果になることを論じている。しかし以上の研究は弾性挙動の場合に限られていたが、これより先米国メリーランド大学の Heins⁴⁾らは終局荷重時の合成桁の有効幅の解析について研究を発表した。

(2) 弾塑性挙動と終局強度

a) 研究の発展の歴史

1960年代の後半から鋼構造の弾性挙動に基づいた従来の許容応力度設計法に代わる終局強度設計法を目的とした弾塑性または塑性を考慮した終局強度の研究が活発に展開された。これは 1955~1965年の間に体系化されたコンパクトな断面に対する塑性設計法の研究と、後座屈強度を考慮した薄肉断面の終局耐荷力の研究が引き金となり、同時に各研究機関に整備された大型試験機による実物大試験桁の実験が研究の発展に大きく寄与した。かかる研究の流れは合成桁の研究にも反映されて、種々の新しい研究⁵⁾が 1960年後半から 1970年後半にかけ

て実施された。

橋梁用合成桁の終局強度の研究はアメリカ合衆国のリーハイ大学で精力的に進められた。Slutter と Driscoll は、不完全なずれ止めをもつはりの終局強度の理論を導き、Daniel と Fisher は移動荷重モデルの下の合成ばりの実験、Lew はずれ止め間隔とはりの終局強度の研究、Barnard は応力ブロック形状と終局曲げ耐荷力の研究を発表した。英国では Chapman や Johnson が終局強度につき多くの実験を行った。

これら実験を主とした終局強度の研究と並行して非弾性解析法の研究も進歩した。アメリカ合衆国イリノイ大学 Dai と Siess (1963) の非弾性せん断結合をもつ合成桁の解析、ミズーリー大学 Baldwin (1965) や英国 Imperial College の Yam と Chapman (1968, 1972) らの単純合成桁の非弾性解析法、リーハイ大学の Slutter と Fisher (1971) の連続合成桁の解析などが発表された。以上の研究成果は 1973年の AASHTO 道路橋示方書の合成桁の荷重係数設計法の基礎となった。また英国でも Chapman や Johnson の研究成果に基づいてやがて 1980年、限界状態設計法による合成橋梁の新しい指針を生むに至った。

わが国では合成桁橋の普及に伴い、個々の橋梁の架設にあたって単純支持形式合成桁の終局強度実験がいくつか行われているが、まとまった研究報告としては発表が少ない。わが国最初の合成桁橋神崎橋が 25年の供用を終えて昭和 53年撤去された機会に、各種使用材料、ブロックジベル、主桁の静的強度と疲労の大規模な実験が実施され、本橋施工前に実施した実験結果の記録と対比して耐荷力がほとんど低下してないことを確かめた研究が報告⁶⁾されている。

わが国の合成桁の研究を調べてみると、奥村・佐藤 (1972) の単純合成桁の強度の研究のほかは、ほとんどプレストレスしない連続合成桁の非弾性挙動を含む終局強度や疲労の研究に重点がおかれている。特に浜田・有住の一連の研究では不完全連続合成桁の有限要素解析⁷⁾を扱っている。この研究で考えた不完全合成桁のモデル化は、コンクリート床版と鋼桁をそれぞれ軸力と曲げを受ける独立のはり要素とし、ずれ止めはスラブと鋼桁間の水平せん断力のみ抵抗する要素としている。また、曲げと同様に軸方向変位に対しても三次式を仮定し、ずれ止めの配置も要素内で連続的に分布したものと、要素端に集中したものとの方角について剛性行列を求めている。さらに弾塑性解析にまで発展させている。

前田・Chang は有限要素法を用いて斜め合成桁の構造挙動の解析を行った。また前田・梶川は負モーメントを受ける合成桁の疲労実験、断続合成桁の弾塑性曲げ性状と曲げ耐荷力の解析のおよび実験的研究を発表してい

る。

b) 最近の研究の動向

1977—1983年の合成桁の研究を調べると、わが国では現行道路橋や鉄道橋用合成桁設計指針でもって一応区切りがついた考えがあって研究が活発でないが、外国では依然として終局強度と途中の性状の研究、および特定の問題についての研究が盛んである。主なものを紹介したい。

シドニー大学の Ansourium⁹⁾ は 1978 年、ずれの影響、鋼材の降伏、残留応力、コンクリートの非線形を考慮した論文を発表し、1982 年には単純および連続形式の合成桁について延性パラメータに着目して塑性回転能に関する実物大試験桁の実験を行い、崩壊時の非弾性回転とたわみの式を求めた。アメリカ合衆国アラバマ大学の Wegmuller (1977) は多主桁合成桁橋の過載荷重時の後弾性挙動を予測するために、層状有限要素を用いてコンクリートの亀裂と圧潰、床版内鉄筋の影響を考慮した解析手法を開発した。アメリカ合衆国メリーランド大学の Botzler (1979) は連続合成桁の実物大モデル試験、カナダの Carleton 大学の Humar (1979) は高応力低サイクル繰り返し荷重を受ける合成桁の実験を発表した。アメリカ合衆国メリーランド大学の Heins⁹⁾ は合成桁の荷重係数設計法の研究に成果をあげたが、前述したように有効幅の解析を発表し、1980 年には多主桁合成桁橋の荷重係数設計の条件決定のために、理論的・実験的研究を行い、終局荷重時の有効床版幅、荷重分配を評価した。同じくアメリカ合衆国の Hansell, Galambos, Ravindra, Viest¹⁰⁾ らも 1978 年荷重係数設計法による合成桁の設計条件の理論的研究を発表した。

カナダにおいては最近合成桁の研究が進み、合成柱の研究の Lachance や上記 Humar のほかに、Queen's 大学の Batchelor¹¹⁾ ら (1979) は合成桁床版の静的終局強度と疲労の研究を発表し、Ottawa 大学の合成桁の研究者 Berwanger¹²⁾ は実験と FEM 解析によって合成桁の温度差の影響について研究を発表した。

他方ヨーロッパでは Stuttgart 大学の Schade (1980) は合成断面をもつ不静定構造部材のコンクリートのクリープと乾燥収縮による断面力の変化の計算方法を与えた。英国の Warwick 大学の Johnson¹³⁾ は英国の合成橋梁の限界状態設計指針の原案作成者であるが、彼の現在実施中の研究は、連続合成桁負モーメント域の床版亀裂幅の制御、合成プレートガーダーのウェブ斜め張力場作用の影響、押抜き試験結果の評価と桁のせん断結合の終局強度などである。

(3) ねじり解析

合成桁のねじりの弾性解析法は、薄肉断面のねじり解析の拡張であって、純ねじりの性質と応力は適当なせん

断弾性係数比によって、また、そりねじりの性質と応力はヤング係数比によって修正された方法である。この方法を用いてアメリカ合衆国メリーランド大学の Heins と Kuo¹⁴⁾ は合成桁のねじり特性計算の広範囲な表を発表し近似式も与えた。さらに模型実験によって結果の妥当性を確かめた。また、ねじりに対する終局耐荷力が床版の斜め引張強度に支配されることを見出した。Colville はねじりを受ける単純支持曲線合成桁の実験からずれ止めの軸方向変位を求めるために、主桁間に適当なブレース材がないときには、鋼桁の回転より小さな回転が床版に許されることを示唆し、同時に、曲線合成桁のためのずれ止めの近似計算法を発表した。わが国では昭和 48 年架設の大阪市千本松橋の左右取付け部分に用いられた半径 37.2 m のらせん状 12 径間連続曲線合成桁（各橋脚とはピン結合）の設計にあたり、上記 Heins の方法と前田の実験によって安全性を確かめたが、床版のねじれ抵抗向上のために鉄筋量増加について研究の余地があることを示した。

3. 鋼箱断面桁とコンクリート床版の合成構造

箱断面合成桁は開断面箱桁の上フランジと床版を合成したもの、閉断面箱桁の上フランジ板のウェブ直上の位置のみに、または上フランジ板に橋軸方向と直角方向にずれ止めを配置してコンクリート床版と合成したものがある（図-2 と 図-3 参照）。前者の形式は従来からプレートガーダー断面の合成桁の応用として設計されたが、後者の形式、特に橋軸直角方向合成併用の橋梁が要求されてきた。その理由

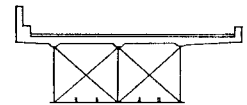


図-2 開断面合成箱桁

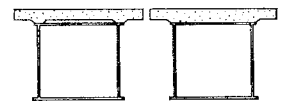


図-3 閉断面合成箱桁

は、近年支間の長大化と曲線橋のためにねじり強度の大きな断面、上フランジの座屈強度の大きな断面の要求や、また架設時の安全性から広幅上フランジをもつ閉断面が必要になってきたからである。しかし、最近の研究報告書¹⁵⁾が示すように両形式に限らず合成箱桁の研究は少ない。これは鋼床版箱桁の普及のためと思われる。国内では有限帯板法を用いて 1 室または 2 室の不完全曲線合成桁の数値解析を行った有住・浜田らの研究があるのみである。実験としては鉄道橋用合成箱桁の実用化のために国鉄が行った閉断面箱形合成桁の静的載荷試験の結果が報告¹⁶⁾され、橋軸直角方向のずれ止めに作用する水平せん断力の分布が一樣でないことに検討を加えている。なお、1983 年架設された東北新幹線荒川 B 鉄道橋は一箱桁の単純支持合成桁橋で、わが国最長の合成桁支

間 86.7 m をもつものである。

外国では英国とアメリカ合衆国の研究があるが、非弾性挙動や終局耐荷力に関する研究の発表は少ない。合成箱桁の弾性挙動については、荷重分配、応力の計算、設計条件に関するアメリカ合衆国 Mattock の 1968—71 の研究¹⁵⁾、曲線合成箱桁を対象とした Heins, Tung, Chu, Aneja, Dabrowski (1967—73)¹⁶⁾ らのそりねじり解析や断面変形などの理論的な解析、Armstrong の曲線合成箱桁の現場実験による動的挙動の研究がある。

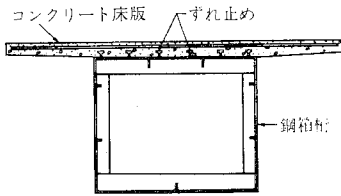


図-4 解析の対象とした合成箱断面

1976—79 年、英国 Imperial College の Moffatt ら¹⁷⁾ が図-4 に示した合成箱断面の弾性挙動の研究を実施した。完全または不完全合成作用をもった合成箱断面桁の FEM 解析をもとに、橋軸直角方向の圧縮フランジ上のずれ止め配置とその剛性が曲げ作用に与える影響を論じ、その結果、箱断面の上フランジに配置されたずれ止め一個に作用する橋軸方向せん断力 f の計算に次式を提案した。

$$f = F_c \frac{K_s}{K_{r,s}} \left[(A-C) \left(\frac{x}{B} \right)^2 + C \right] \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 F_c = 完全剛性の場合、箱断面の幅方向のずれ止め列に生ずる全軸方向せん断力

$K_{r,s} = \Sigma K_s$, K_s = ずれ止め一個のずれ係数

A = ウェブ上に配置されたずれ止めのずれ係数 $K_{r,s}$ に対する比に関係した定数で 100~400 の値

C = ずれ止め列に対する Σf が F_c と等しくなるように選んだ係数

B = 断面内フランジ端からウェブ中心までの距離

x = 断面内フランジ端から任意のずれ止めまでの距離

この式に基づき BS 5400, Part 5 (合成橋梁) の中に広幅フランジをもつ箱桁のずれ止め剛性と配置の新しい式が規定された。また、この研究については国際的な討議¹⁸⁾ が行われ英国の Chatterjee, Chapman, Johnson, Morley, 日本の前田, 西独の Roik, Schmidt らが議論を展開している。弾塑性挙動と終局強度の算定は今後の研究課題の一つである。

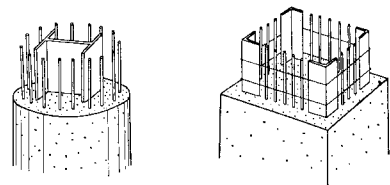
4. 合成柱

合成柱はコンクリート埋込み鋼柱（またはコンクリート被覆鋼柱、図-5）とコンクリート充填鋼管柱（図-5）に大別できる。前者は鉄骨鉄筋コンクリート柱（わが国では SRC 柱と略称することが多い）を含むと考えてよい。

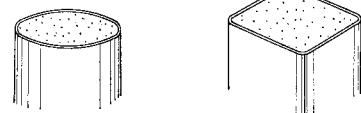
(1) コンクリート埋込み鋼柱

鋼柱のコンクリートへの埋込みは、耐火性を高める目的で今世紀初めから広く用いられてきたが、埋込みによる柱の剛性と強度の増加はかなり後まで考慮されなかった。1908 年アメリカ合衆国の Burr の実験以来、フランスの Laredo と Bard (1969)、英国の Jones と Rizk (1963)、Stevens (1965)、Procter (1967) の実験、同じく Bondale (1966) と Basu (1967) やオーストラリア、シドニー大学の Roderick と Rogers (1969, 1972) らの偏心載荷柱の終局荷重計算プログラムの開発、などの研究が行われた。1973 年頃から、この形式の柱が耐火性のほかに、強度と剛性が単一鋼柱より大きいことが見出され、ここ 10 年間に大きな発展をみた。

西独 Bochum 大学の Roik らは¹⁹⁾ 合成柱の限界状態設計法確立のために、2 軸対称断面コンクリート被覆鋼柱の実験、解析、計算法と研究を展開し、合成断面の全塑性モーメントの計算法、および断面に作用する曲げと軸力の相関式、全塑性モーメントに対する横荷重の影響などの研究を発表した。これらの研究はコンクリート充填鋼管柱の研究²²⁾ とあわせて、ヨーロッパの統一規準 Eurocode の合成構造の原案²⁰⁾ の中の合成柱の設計指針の基礎になったものである。なお、英国の Warwick 大学の Johnson¹³⁾ も Cambridge 大学の広範な実験のもとに、Roik の研究と同じ方向に研究を進展させている。最近の研究の特色は柱の一般の問題から特定の問題に移行しており、シドニー大学の Bridge (1979) は持続荷重を受けるコンクリート被覆合成柱の挙動に与えるクリープと乾燥収縮の影響について解析と実験結果を発表し



コンクリート埋込み鋼柱



コンクリート充填鋼管柱

図-5 合成柱

た。また西独の Roik らも大型合成柱の3年間にわたるクリープ試験を実施中である。カナダの Laval 大学の Lachance (1972)²¹⁾ は4種類の異なった合成断面をもつはり-柱の軸力と2軸曲げのもとにおける終局強度解析の論文を発表し、ついで1980年、同じくはり-柱の非線形解の精度を論じた。

(2) コンクリート充填鋼管柱

今世紀の初めから主として建築構造に用いられてきたコンクリート充填鋼管は当初円形のものが多かったが、最近では角形鋼管も用いられている。

1957年の西独の Klöppel と Goder が軸圧縮力に対する耐力の研究の後、主としてアメリカ合衆国で研究が活発に行われ、1963年の Bureau of Standards の実験、ACI Building Code の許容軸力計算式、Salani と Sims (1964) の実験、Gardner と Jacobsen (1967-68) の短柱と長柱の耐力力計算式、Roderick の角柱の実験、テキサス大学の Furlong (1967-68) の52体の鋼柱の実験および軸力と曲げモーメントの相関式、Knowles と Park (1970) の半径方向拘束の研究などが発表された。

他方英国では立体交差の下部工に大口径柱が1963年用いられて以来、Imperial College で実験が続けられ、Neogi, Sen, Chapman (1969) の計算プログラムの開発、Basu と Somerville (1969) の角柱終局強度計算式の開発などが行われた。

近年、コンクリート充填鋼管の柱・はり作用について2つの計算プログラムがカナダとアメリカ合衆国で開発された。西独の Bochum 大学の Roik ら^{22), 23)} はコンクリート充填鋼管柱の限界耐力力算定法を発表して、限界状態設計法の基礎資料を提供し、コンクリート被覆鋼柱と同じく前述の Eurocode²⁰⁾ の合成構造原案作成に寄与した。

以上の合成柱の研究は主として建築構造を対象としたものであるが、将来の合成構造の広範な応用を考えると、多くの重要な基礎的資料を与えたものである。

(3) わが国における合成柱

欧米と同じくわが国の合成柱の研究は主として耐火の点から建築の分野において発展してきたのであるが、近年、都市内道路を支える高架橋の橋脚が占める大きさが制限されることや、種々の有害な環境条件に対して耐久性を必要とすること、また騒音の軽減などから合成柱の要望が高まり、主として橋梁下部工に実施例¹⁾が増え、それとともに新しい研究が年々展開されている。

a) 鉄骨鉄筋コンクリート (SRC)

コンクリート埋込み鋼柱はわが国では鉄骨の周囲に鉄筋を配置してコンクリートで被覆した SRC 構造として発展し、高層建築物にはすでに利用され、昭和33年に

日本建築学会の「鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準」が制定されている。近年国鉄・道路公団・首都公団・阪神公団・本四公団、建設省がそれぞれ独自の設計指針を整備して実用に供している。SRC 部材は欧米のコンクリート埋込み鋼柱と同様に、積極的にずれ止めなどで鋼部材とコンクリートの力学的一体化を目的としたものでない。したがって一種の混合部材と解釈されるもので設計方法については現在次の二方法がある。

a. 許容断面力は、独立に計算した鉄骨部分と鉄筋コンクリート部分の許容断面力の和である。累加強度方式とよばれる。

b. 許容断面力は、鉄骨部分をこれと同等な断面積をもつ鉄筋とみなして、鉄筋コンクリート部材と同じ方法で算定する。鉄筋コンクリート方式とよばれる。

累加強度方式ではひずみの適合条件を満足していないという理論的な欠点があるが、SRC の終局耐力力として鉄骨部分の降伏強度と鉄筋コンクリートの終局強度を加えたものは、一般に鉄骨部分をこれと同等な断面積をもつ鉄筋とみなして計算した終局強度をこえないことが解析的に証明され、かつ後者の終局強度は実験結果とよく一致することも認められている。したがって累加強度方式は部材の終局強度に対して一定の安全率を与えることを目的とした便宜的な方法である。しかし、曲げモーメントと軸圧縮力を受ける部材で鉄骨の断面や配置が著しく非対称のときは b の方式がよい。したがって a と b 両方式は実用的にはどちらも一種の近似式であって、経済的な設計かどうかという問題になる。この a と b の議論は鋼柱非弾性座屈算定式の接線係数法と等価係数法の論争を思い出させる性質のものである。しかし大きなせん断を受ける場合には、断面構成要素間のせん断力伝達の機構が不明確であり、建築構造のラーメンの柱と橋脚では、受ける荷重の性質も違っており、鉄骨・鉄筋比や鋼材比に応じて曲げ、曲げと圧縮、せん断、ねじりなどをおのおの受ける場合について、ひびわれや付着応力を考えた終局耐力力・変形・靱性の研究が必要である。

SRC の土木の分野での研究は現在官公庁で行われており、たとえば建設省土木研究所の SRC の柱とはりの実験の報告²⁴⁾、道路公団試験所の SRC の耐震設計のための実験の報告²⁵⁾がある。後者では強度のほかに変位や靱性の研究に重点をおき、特にせん断耐力力の研究を将来の課題としている。また、本四公団では大型 SRC の鉄骨の定着部の設計について要領²⁶⁾を発表している。国鉄でも騒音の軽減から SRC 構造に注目し、種々の研究結果と実施例を国鉄構造物設計資料²⁸⁾に発表している。特にねじりを受ける SRC 部材の研究が行われている¹⁹⁾。実施例の一つとして本四公団大鳴門橋の門崎高架橋の橋脚に用いた SRC 柱の一つを図-6 に示してある。実施

例をみると、定着部以外では鉄骨とコンクリートの間にはずれ止めは使用されていないが、ずれ止めを用いて積極的に合成した方が挙動が理論的に明確になり、終局耐荷力、特にせん断耐荷力の向上がはかれるのではないかと思う。

b) コンクリート充填鋼管柱

わが国では建築構造以外に用いられなかったコンクリート充填鋼管柱が橋梁の分野でも実用に供されるようになり、建設省土木研究所²⁷⁾では、昭和 55 年度から耐震設計上の利点をもつ本形式の橋脚の設計基準作成のための一連の実験的研究を行っている。この研究では短柱・長柱・はりの三形式について、ずれ止め有無の影響を含み、静的載荷、繰り返し載荷の試験を実施している。また同じ理由から阪神公団でもこの形式の合成柱の実験を行っている。

コンクリート被覆、またはコンクリート充填の鋼管の研究はいずれも実用のための設計基準や指針作成の基礎資料を得るためのものであるが、既述した外国の研究に

劣らない基礎的研究が活発になることを期待したい。

5. 混合構造

混合構造は一つのシステムであって、鋼材、PC または RC, SRC などの異なった材料から成る部材が連続的に結合された構造体をいい、既往の実施例^{1), 29)}をみると桁形式、塔形式、斜張橋形式、ラーメン形式に分類できる。桁形式では 図-7 にみるように連続形式の橋梁主桁が鋼桁と PC 桁から成っているもので、この例では PC 2 箱桁の張出しスパンに 2 主桁鋼床版鋼桁がゲルバー式に支持されている構造である。塔形式は主柱が高さ方向にコンクリート柱と鋼管柱から成るものである。またラーメン形式はコンクリートラーメンとそれに直角な鋼ばりによって立体ラーメンを形成したものや、柱に SRC, はりに鋼断面を用いた平面ラーメンなどである。斜張橋形式は塔に RC, 連続形式の主桁として側径間では PC, 中央径間に鋼桁を用いた大規模の混合構造システムである。これまでの研究から鋼プレートガーダー、鋼箱桁, RC 桁, PC 箱桁, SRC 柱の部材そのものの性質はかなり解明されて、規準や指針などもあるが、連結の細部構造については指針的なものすらなく、合成桁の経験から得た知識を準用しているにすぎない。

(1) 混合構造システム斜張橋

この形式の斜張橋は西独に発達したもので、決して単なる思いつきではなく、材料、解析、工法の進歩を背景とした複合化という優れた設計概念によるものである。この考えは 1965 年の Leverkusen 斜張橋や 1971 年の Neuenkamp 斜張橋の競争設計にすでに出現しており、1973 年の Kurt-Schumacher 斜張橋で実現し、1979 年の Flehe 斜張橋で本格的混合構造システムを生み出したものである。この傾向はヨーロッパの他の国の橋梁にも大きな影響を与え、1978 年ノルウェーの Bybrua 斜張橋、さらに最も新しいスウェーデンの 1982 年架設の新 Tjörn 橋もまたこの形式である。Flehe 橋³⁰⁾は中央径間 367.25 m の鋼箱桁と 13 @ 60 m の連続 PC 箱桁を 図-8 に示したように、RC 塔の 2 本の脚の間に支持された横ばり (鋼箱桁) に連結したものである。また同じく RC 塔をもつ Tjörn 斜張橋では中央径間 366.0 m を側径間におおの 10 m 張り出し、この位置で左右おのおの 156.6 m と 124.5 m の側径間コンクリート桁を

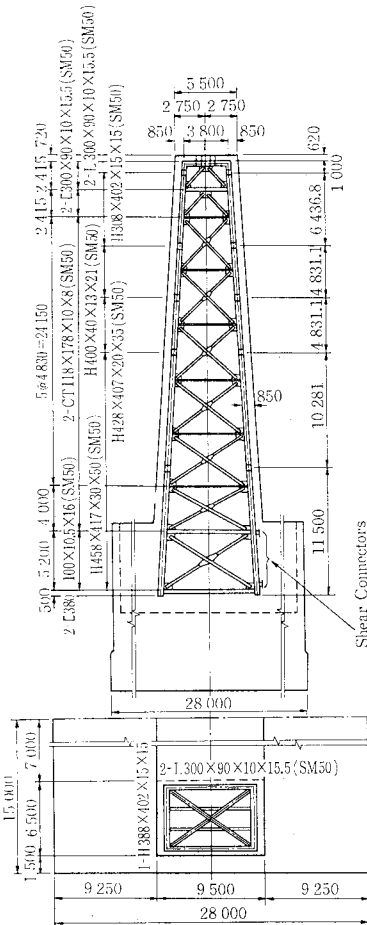


図-6 SRC 橋脚の実例

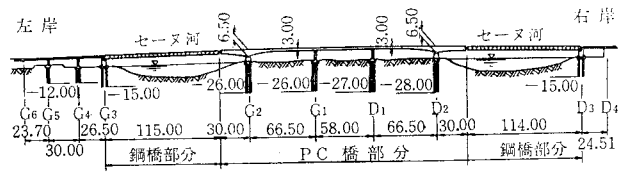


図-7 フランス、マチルド橋の例

連結したものである。Flehe 斜張橋の主桁 側径間 PC 桁と鋼横はりの連結は 図-9, 10 に示したごとくで、断面 A-A は PC 箱桁断面の隔壁の位置における連結、断面 B-B は開口部位置での連結を示す。作用断面力は連結面に直角の軸力と平行なせん断に分解し、PC 箱断

面上フランジに生ずる 支配的な引張力は 連結ボルトと PC 鋼棒によって伝達される。この PC 鋼棒は橋梁内にあらかじめ設けられた小室内に充填したコンクリートに定着される。PC 箱断面の下フランジは圧縮力が支配的でコンクリートと鋼横はりの間の支圧によって受け持たれる。せん断力は頭付きスタッドで抵抗する。そのために横はりの外側ウェブには 6 000 本のスタッドが配置され、またコンクリート小室内にも軸力伝達のために 14 000 本のスタッドが溶接されている。この連結部については特に実験を行ってその安全性を確かめたものでない。

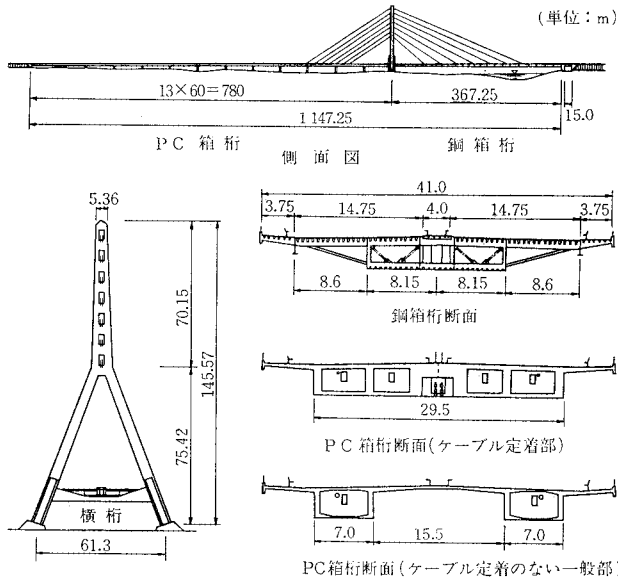


図-8 西独、Flehe 橋の一般図と横断面図

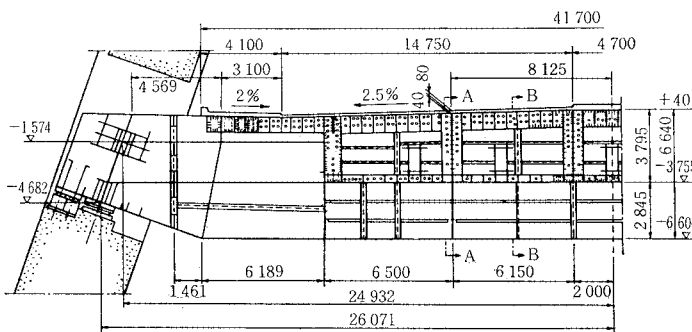


図-9 Flehe 橋の鋼横はり

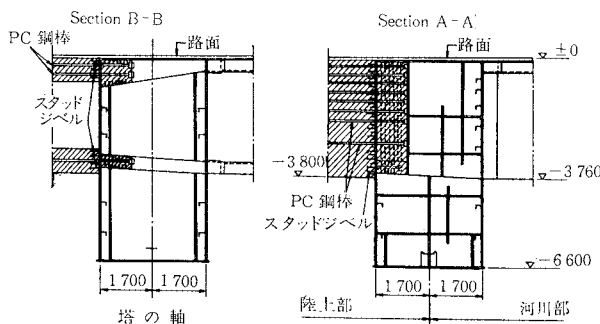


図-10 Flehe 橋の鋼横はりと PC 桁の連結

また、このような複雑な連結細部は上記外力のほかにコンクリートのクリープ、乾燥収縮、温度差による軸方向の変位の受けとめ方かなり無理がある。Tjörn 橋¹¹⁾ではこのような間接的な連結を避けて 写真-1、図-11 に示したように 2 主桁コンクリート桁の連結部 20m を鋼箱桁の輪郭に合わせて箱断面とし、鋼桁との連結は塔の外側、側径間側 10m の位置で直接連結を考え、図-12 のように力の伝達は鋼箱桁の中に入り込んだコンクリート 0.75m の部分で行われた。コンクリートの前面は鋼箱桁内の隔壁鋼板に接し、この 0.75m 部分の 鋼箱桁の上下フランジ、ウェブと隔壁の各鋼板は頭付きスタッドでコンクリートに合成され、力はこのずれ止めでコンクリートから鋼に伝達される。この隔壁鋼板の後ろ鋼桁側 1.50m 部で偏心した軸力が縦リブによって鋼床版、ウェブ、底板に伝達される。またコンクリートに生ずる引張応力を消すために鋼桁との接合部は PC 鋼棒によってプレストレスされている。以上このような異種材料の継手部には一般に長手方向の曲げ、直角方向の曲げ、ねじれ、せん断が作用するが、これらの外力に対して PC 鋼棒、頭付きスタッド、鉄筋などの寸法と量、配置および定着の方法について次のような細部研究が必要である。

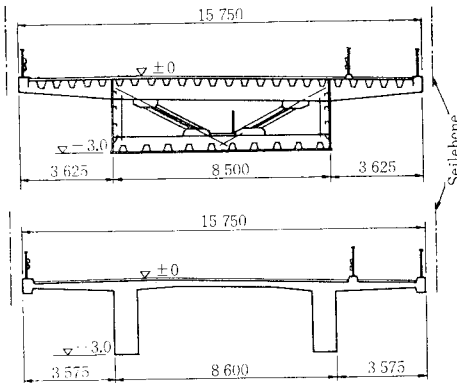
- a. 頭付きスタッドの正確な押抜き強度と引抜き強度を知るための試験方法の確立
- b. 薄肉鋼断面と厚肉コンクリート断面の継手部におけるねじれを伝達するメ

カニズム

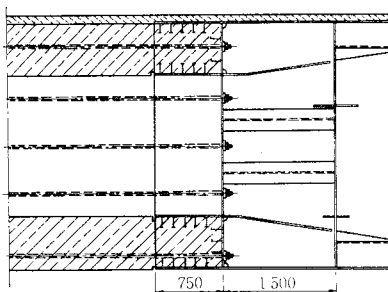
c. コンクリートのクリープ、乾燥収縮、温度差に対する継手部挙動と計算法



写真—1 Tjörn 橋のコンクリート桁と鋼桁の連結



図—11 Tjörn 橋の鋼桁とコンクリート桁の断面



図—12 Tjörn 橋の桁連結部

d. 種々の継手方法の研究、特に終局耐力と疲労に着目した研究。

このような問題について発表された研究が少なく、田島・町田ら³²⁾の基礎的な研究が報告されているにすぎない。

(2) システム最適化とシステム信頼性

異種材料部材から構成される混合システムの設計においては、部材の選択は構造全体の性能最適化から求められるべきで、最近発達の著しいシステム最適化手法³³⁾の適用が研究されるべきであろう。また混合構造システムではいくつかの破壊モードがあるはずで、これらモードは性能関数の中の共通な変数に關係するために互いに相関性がある。したがってシステム信頼性³⁴⁾から破壊の確率を求める必要がある。しかし相関性の評価について PNET 法 (Probabilistic Network Evaluation Technique)³⁵⁾ や Bi-Modal Bounds 法³⁶⁾などが研究されているが実際への適用についてはまだ十分でない。

6. ずれ止め

鋼とコンクリートの結合材としては国の内外でアーク式頭付きスタッドが広く普及している。わが国ではその材質については SM 41 相当といった規定しかなかったが、ようやく 1982 年 JIS 規格³⁷⁾が制定された。これによって、13, 16, 19, 22 mm 径の頭付きスタッドの化

表—2 頭付きスタッドの JIS 機械的性質

| 降伏点または 0.2% 耐力 (kgf/mm ²) | 引張強さ (kgf/mm ²) | 伸び (%) |
|---------------------------------------|-----------------------------|--------|
| 24 | 41~56 | 20 以上 |

学成分、形状・寸法、機械的性質、試験方法が統一されて標準化されたことは複合構造発展のために喜ぶべきことである。機械的性質

の規定を示すと表—2 のようである。合成桁の頭付きスタッドの強度は、わが国では建設省土木研究所の初期の研究に基づいて道路橋示方書に規定されている。いま、スタッドの全高を H (cm)、軸径を d (cm)、コンクリートの設計基準強度を σ_{ck} (kgf/cm²) とすると、1本当たりの許容せん断力 Q_a は

$$\left. \begin{aligned} H/d \geq 5.5 \text{ の場合 } Q_a &= 30 d^2 \sqrt{\sigma_{ck}} \\ H/d < 5.5 \text{ の場合 } Q_a &= 5.5 d H \sqrt{\sigma_{ck}} \end{aligned} \right\} \dots\dots(2)$$

前者はずれ止めの破壊がスタッドのせん断によって生ずる場合、後者は版コンクリートの割裂によって生ずる場合である。また馬蹄形ジベルを主に用いる鉄道用合成桁のずれ止めに関しては、阿部の総合的研究³⁸⁾が 1975 年発表されている。以下に海外におけるずれ止めに関する研究をふり返り、そのあとで、最近の研究を検討してみる。

(1) 静的強度

1960 年初期、アメリカ合衆国リーハイ大学の Slutter

と Driscoll は多くの研究者の押抜き試験とはり試験の結果を比較し、前者のずれ止め強度は後者のものより低いことを結論し、また、ずれ止めの全強度がコンクリートの終局圧縮耐荷力に抵抗できるならば、はりとスラブ間のずれ量の大きさは、合成はりの終局抵抗モーメントに影響のないことを見出した。英国の Imperial College において 1950 年後半から 1960 年初期にわたって Chapman によって行われたずれ止めの研究結果も、リーハイ大学の研究と基本的には同じであった。また両大学のはり試験結果から、破壊の前にずれ止め間で力の塑性再配分が生ずるために、ずれ止めの等間隔配置を許してもよいという結論が得られた。シドニー大学における実物大 T 形はり試験と押抜き試験 (1970) に基づいて、Hawkins は 1965 年 AASHO の定めたスタッドの最低保証引張強度 42 kgf/mm^2 が妥当であることを示した。1971 年リーハイ大学の Ollgaard, Slutter, Fisher は普通および軽量コンクリートに適用できるずれ止めの新しい終局強度計算式を導くとともに、スタッドの強度はその高さとともに増加することを指摘した。スタッドの引抜きについては西独 Kaiserlauten 大学の Bode 研究が新しい。

(2) 疲労強度

ずれ止めの終局静的強度に関する研究に加えて、合成構造を橋梁の設計に利用するため、英米においてずれ止めの疲労強度の研究が行われた。アメリカ合衆国リーハイ大学では Slutter, Driscoll, Fisher が最初押抜き方式で (1965)、ついで小型模型ばりの一連の試験 (1967) を行った。同じ頃 テキサス大学の Toprac は実物大模型ばりについて、また英国の Mainstone は押抜きとはりの疲労試験を行った。アメリカ合衆国では、リーハイ大学の一連の体系的な試験で研究を終了し、その結果は 1967 年の AASHO の橋梁委員会によって採用されたが、疲労設計では応力範囲の概念を用いた。

(3) 最近の主な研究

a) スタッドを溶植した引張フランジの疲労²⁹⁾

全域にわたってスタッドを設けたプレストレスしない連続合成桁では、負モーメント域の鋼桁上フランジは、溶植されたスタッドの形状による応力集中と熱影響、およびスタッドに働くせん断応力の繰り返しの影響のために、その引張疲労強度が母材のそれよりも低下する恐れのあることから、前田・梶川は、はり形式と引張試験片形式について、図-13 のような疲労試験を行った。その結果、引張試験片形式では SS 41, SM 50 Y, SM 58 Q の 3 種の鋼板について、繰り返しせん断応力の影響を、繰り返し数 N とスタッドの公称引張応力振幅 σ_r の関係で明らかにした。図-14 は SM 50 Y の結果を、一例として示したもので、A シリーズは母材の S-N 曲線、

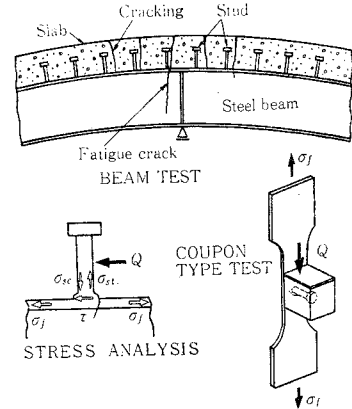


図-13 引張フランジの疲労試験のためのはり形式と引張試験片形式

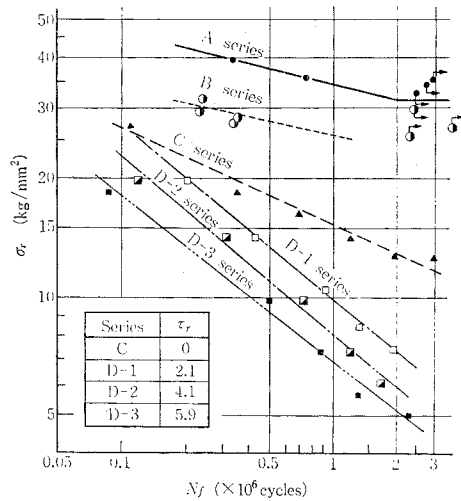


図-14 SM 50 A に対する S-N 曲線

B シリーズは溶植したスタッドを除去してグラインダー仕上げたした試験片、C シリーズはスタッドを溶植したままの試験片、D シリーズはスタッドにせん断力、鋼板に引張力を同時繰り返し繰り返し載荷し、かつ τ_r (平均せん断応力振幅, kgf/mm^2) を変化させた場合の S-N 曲線である。最近、西独 Krupp の Koger 橋梁設計部長が前田のところに資料の提供を要請してきたところを見ると、この種の実験資料が外国では少ないように思われる。

b) 押抜き試験の強度に及ぼすコンクリート打込み方向の影響

最近、ずれ止めのせん断強度を求める押抜き試験の結果が、研究者によってかなりのばらつきのあることが注目され、押抜き試験法の標準化、試験の際のスタッドに生じる曲げの影響、合成桁へ適用する際の条件、コンクリートの強度の影響などについて研究が活発になってい

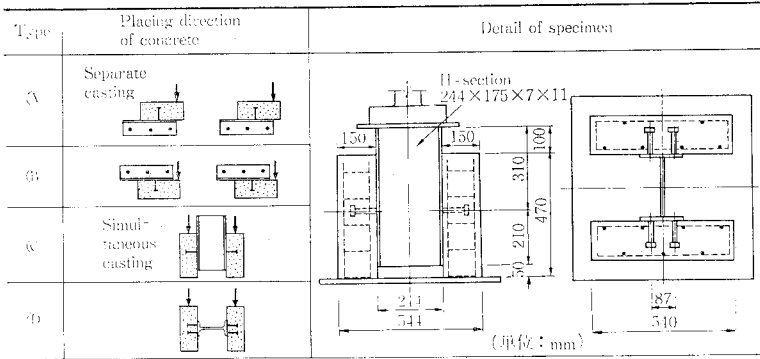


図-15 コンクリート打ち込みの方向

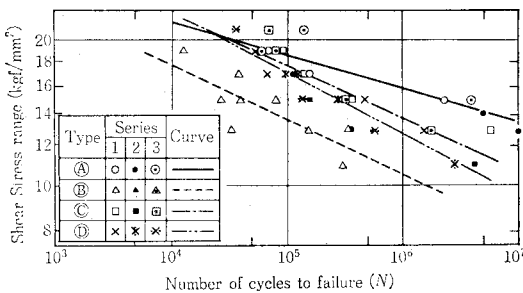


図-16 疲労試験結果

る。ずれ止めが今後種々の複合構造に利用されることを考えると、押抜き試験のみならず引抜き試験、またコンクリート中のスタッドの挙動の研究が大切になってくると思われる。平城らは⁴⁰⁾押抜き試験においてコンクリートの打込み方向がスタッドの終局せん断強度や荷重-ずれ挙動、せん断疲労強度に与える影響について研究を行っている。図-15 に示したスタッドの押抜き試験において、コンクリート打込み方向を A, B, C, D の 4 種類に変化させた場合の結果の一例を疲労について示すと、図-16 のごとくであって、無視できない影響のあることを論じている。

c) 押抜き試験結果と合成はりのずれ止め強度

英国 Warwick 大学の Johnson はスタッドの押抜き試験の評価について研究⁴¹⁾を発表した。押抜き試験と合成はりには明らかな 4 種類の破壊モードがある。すなわち、スタッドの幹部の破壊、スタッドの引抜きまたはめり込み破壊、床版の割裂および床版のせん断破壊である。この中でスタッドの幹部破壊が最大の強度を与えるので、ずれ止め設計にはこれ以外の破壊が生じないような寸法や鉄筋の配置を考えなければならない。彼は 125 の既発表と新たな 101 の押抜き試験、4 本の合成はりの試験、およびいくつかの FEM 解析によって、余盛寸法とコンクリートの割裂強度の影響の大きい事実に着目して、押抜き試験結果から合成はりに適用できる 1 本

のスタッドの幹部の破壊強度 P_{sh} を予測する式を求めた。

$$P_{sh} = K_f \bar{K} A_s f_{su} \dots (3)$$

ここで、 K_f = スタッド幹部の終局引張強度計算値に関する係数であって、かつコンクリートの圧縮強度 f_{cu} の影響にも関係した係数

A_s, f_{su} = それぞれスタッド

の幹部断面積、引張強度

$$\bar{K} = K_a K_e K_h K_l K_w$$

K_a = ずれ止めに生ずる軸力の影響を表わす係数

K_e = コンクリートのヤング係数の影響を表わす係数

K_h = スタッド幹部の高さの影響を表わす係数

K_l = 押抜き試験におけるずれ止め位置からコンクリート下端までの垂直距離の影響を表わす係数

K_w = 余盛の高さの影響を表わす係数

これら各影響係数の値を押抜き試験から求めて式 (3) によって P_{sh} を計算できる。一例として 19×100 mm 寸法のスタッドの設計終局せん断強度を示すと 図-17 の 2 つの直線 EE と FF が与えられる。EE と FF は BS 5400 の f_{su} のそれぞれ最大と最小の値に対応したものである。この図から規定の最小余盛高と最大引張強

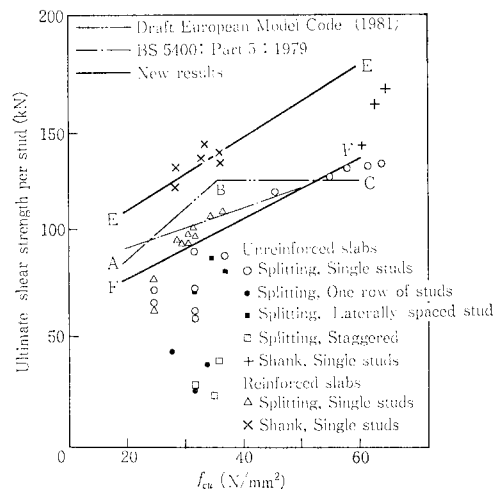


図-17 19×100 mm スタッドのコンクリート圧縮強度と終局せん断強度

度をもつスタッドの設計せん断強度は BS 5400 の規定値より 20% も高い値を与えることがわかる。同様な手法を他の寸法のスタッドに適用するならば設計に役立つスタッドの強度表ができよう。

7. 荷重係数設計法または限界状態設計法

1973 年アメリカ合衆国の AASHTO が道路橋示方書の鋼橋（合成桁を含む）の設計に、許容応力度設計法のほかに、新たに Load Factor Design（荷重係数設計）法を採用して以来、世界の構造設計研究者はこのアメリカ合衆国流の荷重係数設計法またはヨーロッパ流の Limit State Design（限界状態設計）法の確立をめざして研究を続けてきた。その結果欧米各国⁴²⁾で、確率論に基づいた安全性概念の定義と終局強度レベルを用いた新しい設計法が、合成構造を含む橋梁の示方書や指針の中に導入されるに至った。

上記 AASHTO はさらに 1977 年の示方書の中で、「Service Load Design Method—Allowable Stress Design」と「Strength Design Method—Load Factor Design」の 2 つの方法を明確に定義し、その詳細な規定を設けた。英国では 1980 年橋梁の統一規準、BS 5400 を発表した。第 1～第 10 部から成り、第 5 部は合成橋梁を扱い、各種合成桁と合成柱の設計指針を与えている。この指針作成の中心研究者は Warwick 大学の R.P. Johnson 教授であった。限界状態設計法に基づいたものである。西独のドイツ鋼構造協会 DAST の合成桁の設計・施工指針も限界状態設計法に基づいたもので、近く DIN の規定として改訂の予定である。さらに西ドイツでは合成柱の新しい DIN の規定も発表された。スイスとカナダにおいても同じような規準が発表された。特に興味をひくのは、ヨーロッパにおいて CEB, ECCS, FIP, IABSE が共同で 1979 年合成構造のモデル指針（案）²⁰⁾を発表し、Euro-Code の一つとして、橋梁と建物用の柱・桁・版に用いる合成構造の設計・施工の共通の規定を設けたことである。

最近、アメリカ合衆国では鋼橋の設計のための終局限界状態レベルを高める目的で、アメリカ合衆国流の荷重係数設計法の拡張として自動応力設計法⁴³⁾が提案されている。ノンコンパクトな断面に対してもモーメント再配分に期待して余剰耐荷力を利用する方法である。

国内では、関西道路橋調査研究委員会の合成構造専門委員会が、この種の新しい設計法の適用について研究²⁰⁾を進めている。

8. あとがき

以上各種合成プレートガーダー、合成箱桁、合成柱、混合構造システム、ずれ止め、限界状態設計法に関する

学術的な研究を主として、過去の研究のレビュー、現在の主な研究の紹介、将来の研究課題について論述してきた。この分野の研究は、特に外国の文献にきわめて多数発表されており、見落とししたものもあると思うが、著者の非力とご寛容願いたい。ただ、合成床版にふれなかったのは、合成床版の研究を軽視したわけではなく、コンクリート充填鋼格子床版以外のものは主として会社などの開発製品であって、その優劣を論ずることは公平を欠くと判断したからである。また、本論文は State-of-the-Art Report ではないので、個々の研究の文献、特に古い研究については省略し、重要と思われる研究の文献を末尾に挙げたことを断りたい。

複合構造は、現在、鋼とコンクリートの異種材料または異種部材をずれ止めによって合成したもの、またはずれ止めを用いないで混合した構造であるが、合成の場合には当然自由な変位がずれ止めで拘束されるために、相互に拘束の影響を与え合う挙動を示すことが特色である。完全合成か不完全合成か、どの程度の拘束ならば最適性能が期待できるか、合成桁でさえまだ基礎的な多くの研究課題を残しているし、また将来新しい研究も期待されている。その主なものをまとめてみると、

- 1) スタッド押抜き試験の標準化、および押抜きせん断強度の部材間ずれ止め作用への適用、
 - 2) 合成箱桁の終局限界状態に至るまでの挙動、および橋軸直角方向ずれ止めの分担せん断力、
 - 3) 合成プレートガーダーの終局限界状態モデルの設定、
 - 4) 合成構造の限界状態設計法の部分安全係数の決定、
 - 5) SRC の柱とはりの大型モデル試験、特にせん断力の伝達と動的挙動、および終局強度の解析、
 - 6) 混合構造システムの連結部の強度（クリープなどの影響を含む）と疲労、
- などであろう。

今や、複合構造が各種陸上構造物のみならず、洋上フローティング構造物⁴⁴⁾にまで使用されるなど、その応用範囲がますます拡大する機運にあることを考えると、この分野の研究がコンクリート構造と鋼構造の研究と同じレベルで発展することを期待したい。

参考文献

- 1) 鋼・コンクリート合成構造の現況、土木学会誌 1981 年 9 月：特集コンクリートと合成構造、コンクリート工学、Vol. 21, No. 12, 1983.
- 2) 前田・佐伯・日種・梶川：鋼道路橋の合成桁の設計——合成作用の取扱いについて、道路、1972.7.
- 3) 有住・浜田・梶田：不完全合成桁の有効幅、土木学会論文報告集、273 号、1978.
- 4) Heins, C.P. and Fan, H.M.: Effective Composite Beam Width at Ultimate Load, J.S.T. Div., ASCE,

- ST 11, 1976.
- 5) Committee on Metals : Composite Steel-Concrete Construction, J. ST. Div., ASCE, ST 5, 1974.
 - 6) 大阪市土木局・関西道路橋調査研究委員会：旧神崎橋の耐荷力に関する研究報告書，昭和58年3月。
 - 7) 浜田・有住：不完全連続合成桁の有限要素解析，土木学会論文報告集，265号，1977。
 - 8) Ansourian, P. and Roderick, J.W. : Analysis of Composite Beams, J.ST. Div., ASCE, ST 10, 1978.
 - 9) Heins, C.P. : LFD Criteria for Composite Steel I-Beam Bridges, J.ST. Div., ASCE, ST 11, 1980.
 - 10) Hansell, W.C., Galambos, T.V., Ravindra, M.K. and Viest, I.M. : Composite Beam Criteria in LRF, J.ST. Div., ASCE, ST 9, 1978.
 - 11) Bachelor, B. deV., et al. : Investigations of the Ultimate Strength and Fatigue Strength of Deck Slabs of Composite Steel-Concrete Bridges, USA Transp. Res. Record, 664, Bridge Eng. Vol. 1, 1978.
 - 12) Berwanger, C. : Transient Thermal Behavior of Composite Bridges, J. Str. Eng., ASCE, Vol. 109, No. 10, 1983.
 - 13) Johnson, R.P. : Composite Construction; Codes and Research, ASCE New York Convention, Preprint 81-070, 1981.
 - 14) Heins, C.P. and Kuo, J.T.C. : Composite Beams in Torsion, J.ST. Div., ASCE, ST 5, 1972.
 - 15) 昭和57年度首都公団委託，鋼とコンクリートの合成構造に関する調査研究報告書，第II編合成箱桁，土木学会，昭和58年3月。
 - 16) 谷口・市川・岡村：長大合成桁の模型実験，土木学会第36回年次講演会，I-54, 1981.
 - 17) Moffatt, K.R. and Dowling, P.J. : The Longitudinal Bending Behavior of Composite Box Girder Bridges Having Incomplete Interaction, The Structural Engineer, Vol. 56 B, No. 3, 1978.
 - 18) 上記論文に対する討議，The Structural Engineer, Vol. 57 B, No. 2, 1979.
 - 19) Roik, K. und Wagenknecht, G. : Ermittlung der Grenztragfähigkeit von einbetonierten doppelsymmetrischen Stahlprofilstützen aus Baustahl, Bauingenieur, Vol. 52, No. 3, 1977.
 - 20) CEB, ECCS, FIP, IABSE, Composite Structures, The Construction Press, 1981.
 - 21) Lachance, L. : Ultimate Strength of Biaxially Loaded Composite Sections, J.ST. Div., ASCE, ST 10, 1982.
 - 22) Roik, K. und Wagenknecht, G. : Ermittlung der Grenztragfähigkeit von ausbetonierten Hohlprofilstützen aus Baustahl, Bauingenieur, Vol. 51, No. 5, 1976.
 - 23) Roik, K. und Bergmann, R. : Zur Traglastberechnung von Verbundstützen, Der Stahlbau, Heft 1, 1982.
 - 24) SRC 構造調査報告書，建設省土木研究所資料，1677号，昭和56年。
 - 25) 石原・中村，ほか：鉄骨鉄筋コンクリート構造体の靱性に関する研究（昭和53，54，55年度），日本道路公団試験所報告。
 - 26) 金光・大町・樋口：大型鉄骨鉄筋コンクリート設計要領・同解説（案），本四技報，No. 13, 1980.
 - 27) 金井・大塩：コンクリート充填鋼管の耐荷力（その1），建築省土木研究所資料，1728号：鋼コンクリート合成鋼管について，土木技術資料，Vol. 23, No. 9, 1981.
 - 28) 松岡和夫：SRC部材の純ねじり試験，曲げねじり試験，ねじりを受けるSRC部材の設計，構造物設計資料，No. 57, 58, 60, 1979；吉岡・小林・松本：ねじりを受けるI形鉄骨SRC部材の設計，構造物設計資料，No. 73, 1983.
 - 29) 前田幸雄：陸上複合構造物，鋼構造物および複合構造物の強度設計に関するシンポジウムテキスト，日本溶接協会，昭和56年7月。
 - 30) Kahmann, R. und Koger, E. : Die Neue Rheinbrücke Düsseldorf-Flehe, Bauingenieur, 54, 1979.
 - 31) Kahmann, R. und Koger, E. : Die Neue Tjörnbrücke, Bauingenieur, 57, 1982.
 - 32) 田島・町田・睦好：鋼部材とコンクリート部材の接合工法に関する研究，第4回コンクリート工学年次講演会論文集，1982，大友・町田・田島：鋼桁とコンクリート桁の接合工法における接合部の疲労性状に関する基礎研究，土木学会第38回年次学術講演会概要集，I-156, 1983.
 - 33) Carmichael, D.G. : Structural Modelling and Optimization, Ellis Horwood, pp. 48~68, 1981.
 - 34) Benett, R.M. and Ang, A. H-S. : Investigation of Methods for Structural System Reliability, Str. Res. Series No. 510, Univ. of Illinois, 1983.
 - 35) Ang, A. H-S., Abdelnour, J. and Chaker, A.A. : Analysis of Activity Networks under Uncertainty, J. EM. Div., ASCE, EM 4, 1975.
 - 36) Ditlevsen, O. : Narrow Reliability Bounds for Structural Systems, J. Structural Mechanics, Vol. 7, No. 4, 1979.
 - 37) 日本規格協会：JIS B 1198-1982 頭付きスタッド，昭57.
 - 38) 阿部英彦：鉄道用合成桁のずれ止めに関する実験的研究，鉄道技術研究報告，No. 961, 1975.
 - 39) 前田幸雄：Steel-Concrete Composite Constructions and Mixed Structural System—Present and Future, 2nd Conf. on Str. Eng., Bangkok, 1982.
 - 40) 前田・松井・平城：Effects of Concrete-Placing Direction on Static and Fatigue Strengths of Stud Shear Connectors, 阪大工学報告，Vol. 33, No. 1733, 1983.
 - 41) Johnson, R.P. and Oehlers, D.J. : Analysis and Design for Longitudinal Shear in Composite T-Beams, Proc. Instn. Civil Engrs. Part 2, 71, 1981.
 - 42) 前田，ほか：西ドイツの鋼合成ゲタ設計施工指針（案）について，橋梁と基礎，76-7, 昭和51年；英国におけるBS 5400 合成橋梁の新しい設計基準（案）について，上・下，同上 78-11, -12, 昭和53年；最近のアメリカにおける合成桁橋設計の動向について，同上 80-9, 昭和55年。
 - 43) Haaijer, G., Carskaddan, S. and Grubb, M.A. : Autostress Design of Steel Bridges, J. Str. Eng., ASCE, Vol. 109, No. 1, 1983.
 - 44) 吉田・判田・長谷川：コンクリート構造と鋼構造からなる合成フローティング構造物の強度に関する研究，日本造船学会論文集，148号，1980.

(1983.12.27・受付)