

鋼とコンクリートの接合構造の新技術

NEW TYPES OF CONNECTIONS BETWEEN STEEL AND CONCRETE

依田照彦*, 中洲啓太**

Teruhiko YODA and Keita NAKASU

ABSTRACT To reduce life cycle cost, steel and concrete composite structures are increasingly constructed throughout Japan. In general, it is difficult for the composite structures to transfer shear forces smoothly between steel and concrete without any shear connectors. More rational connections with potential strength, pertinent stiffness, enough ductility are expected. Under these circumstances, new types of connections between steel and concrete are proposed and verified by experimental studies. In this paper, fundamental characteristics of both conventional and new types of connections are reported and discussed.

KEYWORDS : 合成構造, 接合, ずれ止め

Composite structures, connection, shear connectors

1. はじめに

公共事業費の削減が求められている今日、土木構造物に経済性や耐久性を持たせることが重要な課題となっている。そのため、鋼やコンクリートなどの異種材料をそれぞれの利点を可能な限り引き出しつつ、合理的かつ経済的にそれらを組み合わせさせた合成構造の重要性は、今後一層高まっていくものと考えられる。しかしながら、合成構造では異種材料相互の接合部における円滑な力の伝達が難しいので、接合部の構造には最大限の注意を払う必要がある。したがって、適度な剛性・じん性・強度を中心とした合理的な性能を有し、かつ、施工の省力化による経済性にも配慮した新しい接合部の技術開発が必要となる。接合部の構造を考えるにあたっては、図-1に示すような構造物の形態、使用する材料、複合構造の程度、力学的特性などが重要な判断項目となる。ここでは、現在、実用化されている鋼とコンクリートの接合構造について整理した上で、近年、新しく提案、研究され、一部実用化されている接合構造について紹介する。

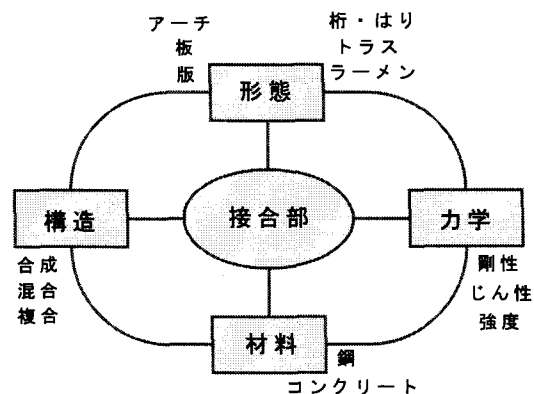


図-1 接合部の考え方

*工博 早稲田大学教授 理工学部土木工学科 (〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1)

**早稲田大学大学院 理工学研究科 (〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1)

2. 接合構造の現状

今日、鋼とコンクリートの接合部には機械的にずれを防止する頭付きスタッドが最も一般的に用いられている。ずれ止めの役割としては、基本的には鋼とコンクリートとの間のせん断力の伝達と、コンクリートと鋼の剥離の防止である。ずれ止めの使用されている箇所は、ウェブとフランジの接合部、基礎と橋脚の接合部、柱と上部構造の接合部、鋼管と充填コンクリートの接合部など多岐にわたっている。現在、実用化されている代表的なずれ止めをまとめると、次のようになる。

(1) 機械継ぎ手方式

① 剛なずれ止め

鋼とコンクリートの接触面に作用するせん断力を、ずれ止めを介してコンクリートに支圧力として伝達させるずれ止めであり、ずれ止め自身の剛性が大きいと作用する支圧力は一様分布となる。破壊形式は、コンクリートのせん断破壊かジベル前面の支圧破壊である。例としてはブロック、アングル・T形・チャンネルジベルなどがある。剛なずれ止めは終局破壊モードが壊滅的である反面、疲労の影響を被らないという利点を有する。

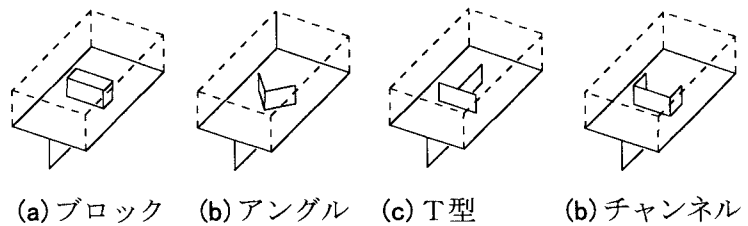


図-2 剛なずれ止めの例

② 柔なずれ止め

ずれ止め自身の曲げ剛性が小さく、ずれ止め自身が変形しながらせん断力に抵抗するので支圧力の分布は一様にならない。使用例としてはチャンネル・Z形ジベルやスタッドがある。中でも、スタッドの場合、断面が円形で支圧力に方向性が無く、鋼板への溶接が容易であることから今日広く用いられている。終局破壊モードが円滑で壊滅的でない点は望ましいが、疲労の影響を受けやすいという欠点がある。

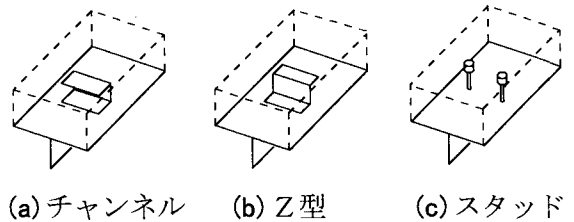


図-3 柔なずれ止めの例

③ 剛なずれ止めと鉄筋の併用

ずれ止めの部分に応力が集中し、ひび割れが発生するのを防ぐため、ずれ止めとともに鉄筋を配置し、応力集中の緩和を図るものである。例としては、アングルとフック筋、ブロックとループ筋、ブロックとフック筋などの組合せがある。

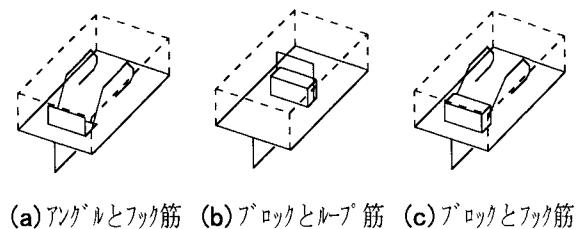


図-4 剛なずれ止めと鉄筋の併用

(2) 付着方式

平鋼との自然付着力を期待するものと突起付き鋼板を用いて付着面積の増大を図り、積極的に鋼板の付着強度を活用するものがある。

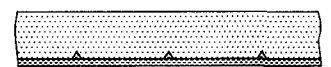


図-5 付着方式

(3) 接着方式

接着剤を用いて鋼とコンクリートを接合させるもので、接着剤の例としてはエポキシ樹脂がある。機械継ぎ手方式と比べると連続的に接合できるので、接着面積が広くとれ、大きなせん断耐力が得られる。しかしながら、鋼とコンクリートの剥離に対する抵抗力が弱いため、機械的なずれ止めなどと併用して用いられることが多い。

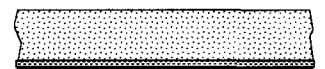


図-6 接着方式

(4) 摩擦方式

高力ボルトを用いる方法が最も一般的で、ボルト軸力によって導入される摩擦力により接合する方法である。高力ボルトにかなり高い軸力が導入されるのでコンクリートのクリープによる軸力の低下が問題となる。

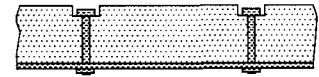
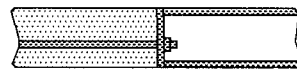


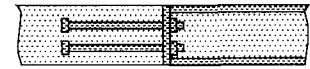
図-7 摩擦方式

(5) 定着方式

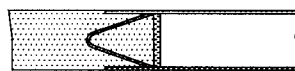
コンクリート中に埋め込まれた鉄筋やアンカーボルトなどの軸方向付着力を活用して定着させる方式である。杭とフーチング、橋脚とフーチングとの接合によく用いられる。十分な定着力を確保する必要がある場合にはアンカーフレーム（鋼製枠組）が用いられる。



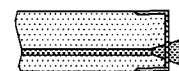
(a) P S アンカー



(b) アンカーボルト



(c) 鉄筋アンカー



(d) くさび

図-8 定着方式

これらの接合方式は、接合部に何らかの加工を施すことにより、接合部への力の作用に対して、それぞれ、せん断力、支圧力、付着力などの形で力を伝達する伝達機構を持っている。これらの接合部の力学的挙動や破壊形態を考える場合、この力の伝達機構に注目することが重要である。また、接合部の設計においては、力の伝達が完全になされるよう、支圧力、付着力などの接合部に発生する力に対して、十分耐えうるようにする必要がある。伝達機構に関与する力について表-1 に、各種接合方式を実際の構造物における適用箇所の観点から分類したものを表-2 のに示す。

表-1 力の伝達機構

作用力	接合部に発生する力
せん断力	せん断力・付着力・摩擦力
圧縮力	圧縮力・付着力・引抜き力
支圧力	支圧力・付着力
引張力	引張力・付着力・引抜き力

表-2 鋼とコンクリートの接合構造の分類

種類	接合構造	適用（接合部）
機械継ぎ手方式	スタッド ジベル 差込鉄筋	基礎と柱（橋脚） 基礎と主塔 柱とはり ウェブとフランジ 鋼床版とコンクリート床板 鋼桁とコンクリート桁
付着方式	表面突起 開孔 波形形状	鋼管と充填コンクリート ウェブとフランジ
接着方式	接着剤	せん断キ
摩擦方式	横締め	床板
定着方式	アンカーボルト くさび	基礎と柱（橋脚）
支圧方式	支圧板	基礎と主塔

3. 新しい接合構造

以上に述べたずれ止めは、力学的特性を考慮した優れたずれ止めではあるが、経済性と合理性をさらに追求していくと、これら以外にもいろいろなタイプのずれ止めが考えられる。現在、研究されている新しいタイプのずれ止めは、鋼板に何らかの加工を施し、コンクリートとの付着力の強化を目指すものが多い。これらを大別すると以下のようなになる。

(1) 孔開き鋼板によるずれ止め

鋼板に孔を開け、コンクリートをその上から打ち込み、孔の中にコンクリートジベルを形成するタイプのずれ止めである。従来のスタッドが鋼フランジに1つ1つ溶植する必要があるのと比較すると、このずれ止めは、鋼板に孔を開けるだけであるので施工が容易である。さらに、このような孔を用いたずれ止めでは通常の使用時には、ずれの少ない剛な性質を有し、疲労の影響を受けにくく、終局時には程良い延性を示すといわれており、剛なずれ止めと柔なずれ止めの両者のメリットを兼ね備えたものとして注目されている。破壊形式としては、孔の内面からの支圧力によるコンクリートの破壊、コンクリートジベルのせん断破壊、孔の中心線に沿った鋼板のせん断破壊が知られている²⁾。

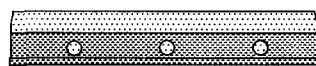


図-9 孔によるずれ止め

(2) 鉄筋によるずれ止め

鋼板に孔を開け、その孔に鉄筋を通し、鉄筋がその軸と直角方向のせん断力に対して抵抗するタイプのずれ止めである。単に鉄筋によるずれ止めというと、鉄筋を通すことのみを目的として孔を開けたものを指すが、鉄筋径よりも大きな孔を開けて、孔の中にコンクリートジベルを形成させることにより、(1)で述べた効果を期待することが多い。この場合、鉄筋が孔の中のコンクリートを横方向に拘束する効果も期待できることから、より合理的な構造となる。鉄筋によるずれ止めでは、耐荷力は鉄筋のせん断耐力に大きく依存し、終局時にも粘りのある挙動をすることが知られている。

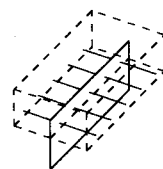


図-10 鉄筋によるずれ止め

(3) 波形形状によるずれ止め³⁾

鋼板を波形に加工してその形状をずれ止めとして利用するものである。底鋼板にとりつけるジベル型鋼板やウェブに波形鋼板を用い、コンクリートフランジを上から打ち込み、ずれ止めとする方式がある。鋼板を折り曲げるだけでよいので施工性がよい。しかしながら、波形鋼板は軸力および曲げモーメントに対して容易に変形するので、波形の形状を維持し、ずれ止めとしての機能を保証するためには、鋼板や鉄筋を用いて変形を拘束する必要がある。

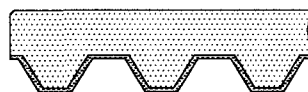


図-11 波形形状によるずれ止め

(4) 突起付き鋼板³⁾

熱間圧延時に溝付きのロールを用いることにより、鋼板の表面に突起を付けたもので、突起形状には線状、点状あるいは縞状のものがある。この突起の存在により、鋼とコンクリートの間のせん断付着力を向上させることができる。破壊形式には、突起からの支圧力によるコンクリートの破壊、突起上面に沿ったコンクリートのせん断破壊が考えられる。

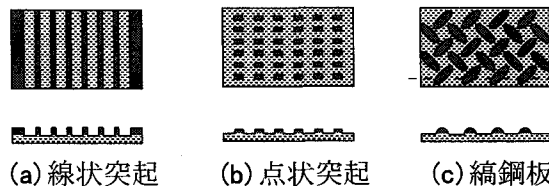


図-12 突起付き鋼板

(5)極太異形鉄筋⁴⁾

大型の鋼棒に突起を付けて、付着力の強化を図ったものである。J I Sでは、鉄筋コンクリート用の異形棒鋼としてD 6 ~ D 5 1が規定されているが、これらよりもさらに太いD 5 7やD 6 1の極太異形鉄筋がつくられている。極太異形鉄筋を使用すると、大型の構造物における施工の効率化が実現できるばかりでなく、鋼棒にスタッドを溶植できるなど、設計における自由度の向上にもつながる。



図-13 極太異形鉄筋

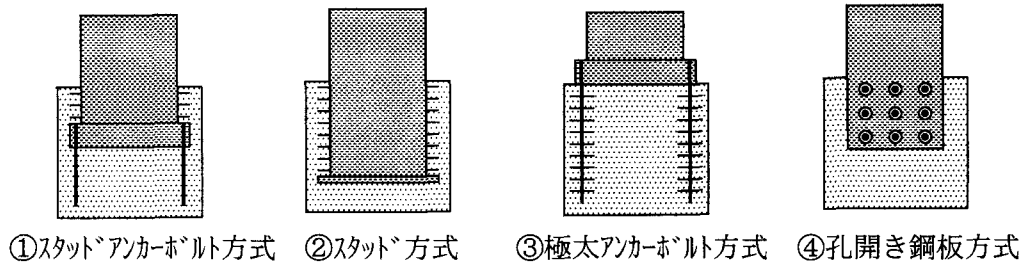
4. 実構造への応用

ここでは、接合箇所の特性に応じてこれらのずれ止めを使い分けたり、組み合わせたりすることによる実際の構造物での適用例を紹介する。

(1)基礎と柱の接合

鋼製橋脚とコンクリートフーチングとの接合部では、従来、アンカーフレームを用いるのが一般的であった。しかし、より施工が容易で、力の伝達機構が明確な接合構造として、図-14 に示すようなスタッド、

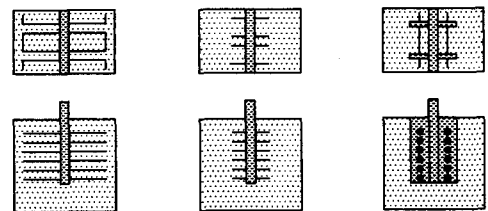
アンカーボルト、孔開き鋼板などを組み合わせ合わせたものが提案され、実験が行われている⁴⁾。



①スタッドアンカーボルト方式 ②スタッド方式 ③極太アンカーボルト方式 ④孔開き鋼板方式
図-14 コンクリートフーチングと鋼製橋脚の接合

また、斜張橋（鶴見つばさ橋）では、コンクリート基礎と鋼主塔の接合部の構造として次のような方式が考えられた。実験の結果、以下の3つの中では、差し込み鉄筋が最も良好であった⁶⁾。

- ⑤差し込み鉄筋：鋼板に開けた孔に鉄筋を差し込む方法
- ⑥スタッド方式：鋼板にスタッドを溶植する方法
- ⑦はしご鉄筋：鋼殻に溶接された鋼板に孔を開け、はしご状に鉄筋を配置したもの



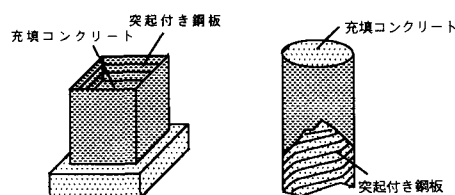
⑤差し込み鉄筋 ⑥スタッド方式 ⑦はしご鉄筋
図-15 コンクリート基礎と鋼主塔との接合

(2)鋼管（杭、柱）と充填コンクリートの接合³⁾

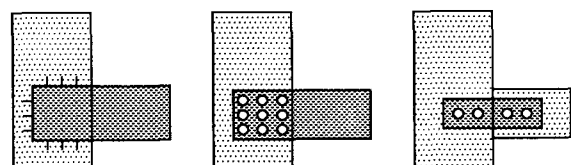
鋼管の内面に突起付き鋼板を用いることにより、図-16 に示すような合成効果のより優れた合成柱あるいは合成杭が開発されている。

(3)柱とはりとの接合⁷⁾

柱とはりの間の接合についても、図-17 に示すような新しい方式が提案され実験が行われている。



(a)柱 (b)杭
図-16 鋼管と充填コンクリートの接合



(a)スタッド方式 (b)孔開き方式 (c)孔開き+方式
図-17 はりと柱の接合

(4) ウェブとフランジの接合

鋼ウェブとコンクリートフランジとの接合構造は、今日、最も盛んに研究が行われている項目である。以下のような新しい方式が提案され、実用化に向け、実験や解析が行われている。埋込接合のように実際の橋梁に適用された例もある。

①孔開きリブ方式

鋼の上フランジに孔の開いた縦リブを溶接し、コンクリートフランジをその上から打ち込み、孔の中にコンクリートジベルを形成するタイプのずれ止めである。さらに、孔に、横方向の鉄筋を通すことにより周囲のコンクリートを拘束するとともに、せん断抵抗力を向上させることができる。

②逆T形方式

鋼上フランジを用いず、鋼板ウェブに直接孔を開けて、貫通鉄筋を通し、これをコンクリートフランジ中に埋め込む方式である。溶接の必要がなく、施工性、経済性に優れている。

③埋込接合^{8)~12)}

逆T形方式において、ウェブに波形鋼板を用いた方式である。波形鋼板を用いているため、桁全体が軽量化できるばかりでなく、波形鋼板の形状そのものがずれ止めとして機能するため、非常に合理的かつ経済的な接合形式として期待されている。しかしながら、逆T形方式や埋込接合は、ウェブ直上のコンクリートに応力集中が生じるという問題がある。

④付着型のずれ止め¹³⁾

鋼フランジ上にT型钢やH型钢を配置して付着面積を増大させたものである。構造が簡単で施工が容易である。

⑤突起付き鋼板³⁾

上下のフランジプレートに突起付き鋼板を使用した突起付きH型钢があるが、突起付きH型钢の用途は今のところ限定的である。また、ウェブに波形鋼板を使用した場合に、スタッドの配置が密になるのを防ぐため、スタッドと突起付き鋼板を併用するというアイデアもある¹⁴⁾。

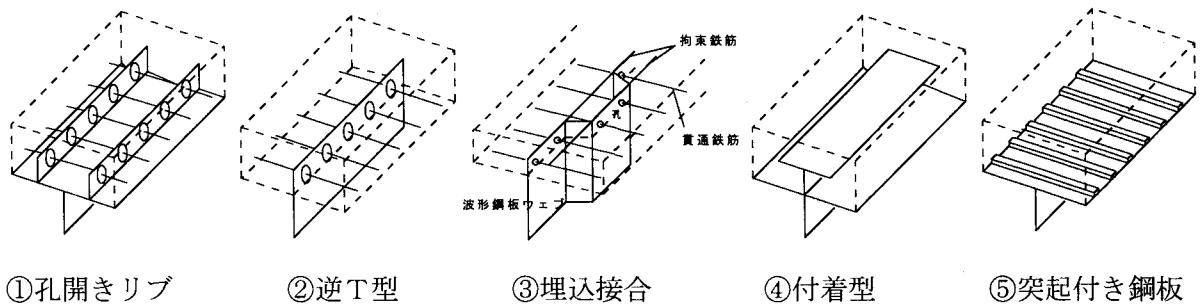


図-18 ウェブとフランジの接合

(5) 性質の異なるはり同士の接合

鋼桁とコンクリート桁との境界部やはりの性状が急に変化するような箇所でも、その接合のあり方が重要である。

①鋼床版とコンクリート床版の接合¹⁵⁾

既設のRC床版と新設の鋼床版とを接続する場合、従来は縦目地を設けていたが、車両の走行性や維持管理の問題から次のように一体化する方法が考え出された。スタッド溶接方式はコンクリート床版から延長した鉄筋をスタッドのように鋼床版のプレートに溶接する方式であり、リブ方式は鋼床版から延長した鋼リブに孔を開けコンクリート床版中に埋め込む方式である。鋼リブには、板状のプレートリブとU字型の断面をしたUリブがある。

②鋼桁とコンクリート桁の接合^{3), 16)~18)}

斜張橋において桁の中央径間に自重の小さい鋼桁を用い、側径間に自重の大きいコンクリート桁を用いた合成・複合斜張橋の接合部として、連結鋼板とコンクリート床版とをスタッドを用いて直接接

合するメタルプレート方式と、鋼セルに中詰コンクリートを充填し、スタッドを用いて合成する方式がある。中詰めコンクリートを用いる方法では、前面に支圧板を配置するものと後面に配置するものがある。

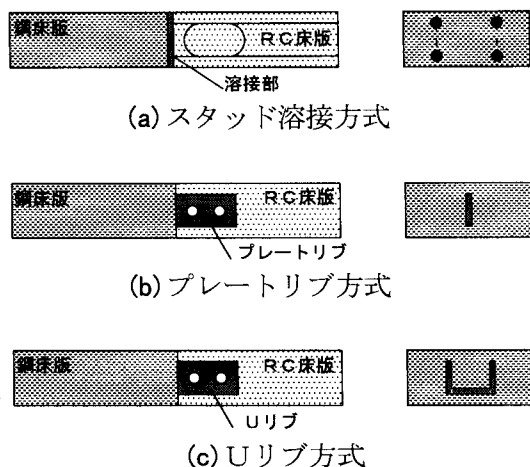


図-19 鋼床板とRC床板との接合

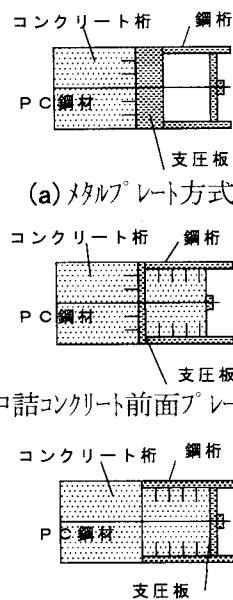


図-20 鋼桁とコンクリート桁との接合

4. まとめ

構造形式とバランスのとれた強度・剛性・じん性を持つ接合構造が橋梁の経済性と長寿命化に果たす役割は大きいと考えられる。接合構造の性能の良否は図-21 に示すように強度・剛性・じん性のバランスを取ることであり、剛性の限界である使用限界状態に達した後も、修復可能な機能保持限界まで機能できる性能を持たせることが望ましいといえる。ただし、疲労限界については図中に表示していないので、別途検討を要する。

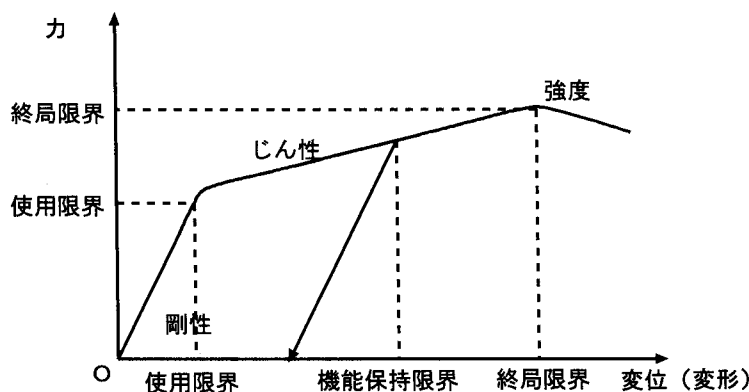


図-21 接合部の剛性・じん性・強度の概念図

現在、提案、研究されている接合構造の中には、このような剛性・じん性・強度のバランスを考慮した力学的に優れたものもあり、将来、現在実用化されている方式に代わり広く利用されるものも出てくる可能性を秘めている。しかしながら、これらの新しいタイプの接合構造は、基礎的データの蓄積が不十分であり、接合部の力学的挙動にまだ不明な点が多いこと、実際の橋梁に適用するにあたって明確な設計方法が存在しない場合も多いといった問題がある。また、力学的な性能や合理性をさらに追求していくと、この他にも接合構造のアイデアは無数にあると考えられ、今後の活発な研究、開発が期待される。

参考文献

- 1) 土木学会構造工学委員会、鋼・コンクリート合成構造小委員会：鋼・コンクリート合成構造の設計ガイドライン、第一版、1988
- 2) Fritz Leonhardt et al: Neues, vorteilhaftes Verbundmittel für Stahlverbund-Tragwerke mit hoher Dauerfestigkeit, Beton und Stahlbetonbau, 1887.12
- 3) N B C 研究会編：新しい合成構造と橋、山海堂、pp. 237～245, pp. 255～266, 1996. 2
- 4) 土木学会構造工学委員会、鋼コンクリート複合構造小委員会：合成構造用鋼材の利用に関する調査研究、pp. 3～5, 1993. 5
- 5) 鋼橋技術研究会：鋼構造におけるコンクリートの活用研究会報告書、pp. 73～127, 1997, 11
- 6) 森河久、伊藤昇、森本精洋、阿部幸夫：鶴見航路橋主塔結合部に関する実験的研究、構造工学論文集、Vol. 39A, pp. 1335～1346, 1993. 3
- 7) 黒木勇人、太田貞次、香月智、石川信隆：鋼・コンクリート合成構造のはり・柱接合部の破壊挙動について、第 25 回関東支部技術研究発表会講演概要集、pp. 46～47, 1998. 3
- 8) 依田照彦、多田雅弘、中島陽、大内一男：波形鋼板ウェブを持つ合成桁の力学的挙動に関する実験研究、鋼構造論文集、Vol. 1, No. 2, pp. 57～66, 1994
- 9) 中島陽、依田照彦、大浦隆、佐藤幸一、武村浩志：波形鋼板ウェブとコンクリートフランジとの接合部の構造に関する実験的研究、第 3 回合成構造の活用に関するシンポジウム講演論文集、pp. 173～177, 1995. 11
- 10) 中島陽、依田照彦、大浦隆、佐藤幸一、武村浩志：波形鋼板ウェブを有する I 型断面合成桁の力学的挙動について、第 51 回年次学術講演会講演概要集、1996. 9
- 11) 竹下明、依田照彦、佐藤幸一、櫻田道博、志賀弘明、中洲啓太：波形鋼板ウェブを有する I 型断面合成桁の疲労試験、第 24 回関東支部技術研究発表会講演概要集、I-4, pp. 8～9, 1997. 3
- 12) 竹下明、依田照彦、佐藤幸一、櫻田道博、志賀弘明、中洲啓太：波形鋼板ウェブを有する I 型断面合成桁の疲労性状に関する実験的研究、第 52 回年次学術講演会講演概要集、CS-3, pp. 122～123, 1997. 9
- 13) 浜田純夫、高海克彦、藤井伸之、光川直宏：付着型のずれ止めを用いた合成桁の挙動について、第 3 回合成構造の活用に関するシンポジウム講演論文集、pp. 149～154, 1995. 11
- 14) 上平謙二、鈴木史郎、松野茂彦、園田恵一郎：波形鋼板ウェブ P C 橋の鋼板とコンクリート床板の合成手法に関する研究、第 52 回年次学術講演会講演概要集、CS-3, pp. 118～119, 1997. 9
- 15) 船本浩二、富永博夫、大塚秀樹、佐々木英智、町田文孝：鋼床版と R C 床版の剛結接合構造に関する実験、第 3 回合成構造の活用に関するシンポジウム講演論文集、pp. 221～226, 1995. 11
- 16) 日本構造協会編：鋼構造技術総覧、技報堂出版、pp. 388～393, 1998. 5
- 17) 鋼橋技術研究会：複合構造接合部会平成 3 年度研究報告書、pp. 3～pp. 8, 1991
- 18) 多田和夫、西本聡、山岸一彦、矢野保広：生口橋上部工の設計(下)、橋梁と基礎、Vol. 24, No. 9, pp. 33～40, 1990. 9