

異種材料をつなぐ！ — 接合技術の現状，要求性能および課題 —

座長 杉浦 邦征（京都大学 教授，複合構造委員会委員長）
話題提供者 中島 章典（宇都宮大学 教授）
上田 多門（北海道大学 教授）
春日 昭夫（三井住友建設 土木本部 副本部長）
杉本 一朗（（財）鉄道総合技術研究所 鋼・複合構造研究室長）

日時 平成23年 9月7日（水）16:15～18:15
場所 愛媛大学 城北キャンパス
教室 法文学部講義棟 201

複合構造委員会

【主題】

近年、鋼とコンクリートの合成構造や混合構造を採用した数多くの複合構造物が建設されています。このような現状を振り返ると、これまで数多くの接合形式が考案され、各種実験や解析検討を行ったうえで、設計、施工されています。これらの接合部の設計、施工技術について、要求性能、荷重伝達機構、終局強度等を整理しておくことが重要となります。

そこで、機械的なずれ止め、樹脂材料による接着的な接合、プレストレスを用いた接合等の分野の学術研究権威や経験豊富な技術者から、その設計、施工事例、要求性能ならびに課題についての話題提供を頂き、今後さらなる発展に向けて討議を行います。具体的には、この討議結果を踏まえ、複合構造委員会が2009年に発刊した「複合構造標準示方書」の今後の改定作業のための有益な情報と位置づけます。

本討論会は、複合構造接合部に関する研究開発、設計、施工など幅広い分野技術者を対象に、最新の接合技術情報の共有化と残された課題を明確にすることが目的であり、未来を見据えた幅広い活動に繋がりたいと考えています。

【目次】

座 長	： 杉浦 邦征（京都大学 教授、複合構造委員会委員長） 「複合構造委員会の挑戦：異種材料をつなぐ！」	2
話題提供者 1	： 中島 章典（宇都宮大学 教授、複合構造ずれ止めの性能評価法に関する調査研究小委員会） 「鋼コンクリート複合構造のずれ止めについて」	5
話題提供者 2	： 上田 多門（北海道大学 教授、樹脂材料による複合技術研究小委員会） 「樹脂による接着接合の現状紹介、要求性能および課題について」	8
話題提供者 3	： 春日 昭夫（三井住友建設 土木本部 副本部長） 「複合橋における接合構造の現状と課題」	11
話題提供者 4	： 杉本 一郎（(財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 鋼・複合構造研究室長） 「鉄道構造物に採用されている複合構造物の紹介、要求性能および課題」	13

複合構造委員会の挑戦：異種材料をつなぐ！

京都大学大学院 杉浦邦征

1. はじめに

近年、鋼とコンクリートの合成構造や混合構造を採用した数多くの種類の複合形式の構造物が建設されてきた¹⁾。このような現状を振り返ると、これまで鋼材料とコンクリート材料の多様な接合形式が考案され、各種実験や解析的検討を行ったうえで、設計、施工が行われてきた。今後、この種の接合部の設計、施工技術をさらに発展させる上で、現状での要求性能、荷重伝達機構、終局強度等を整理しておくことは極めて重要である。

そこで、機械的なずれ止め、樹脂材料による接着的な接合、プレストレスを用いた接合等の分野の学術研究における権威者や経験豊富な技術者から、その設計、施工事例、要求性能ならびに課題についての話題提供を頂き、今後のさらなる発展に向けて建設的な討議を行うことを企画した。具体的には、この討議結果を踏まえ、複合構造委員会が2009年に発刊した「複合構造標準示方書」²⁾の今後の改定作業のための有益な情報としたい。

2. 構造物の製作に果たす接合の役割

我々の身のまわりにある橋梁、建物、自動車、船舶、貯蔵タンクなどの多くの構造物を製作する上で、原材料から素材を形成したり(固化)、素材を切ったり(切断)して部品とし、さらにそれらをつなぐ(接合)して形造る作業は、不可欠な加工工程である。構造物を使用目的に適したものに作り上げるには、安定した品質・性能が得られることが必要であり、同時に①省資源、②省エネルギー、③低環境負荷、④高性能、⑤高効率などの観点も考慮しながら、技術力の整備を図らなければならない。

この中で、接合技術は、あらゆる産業で使用され、その重要性はますます増加している。特に、橋梁に代表される社会基盤施設は、大型であるゆえ、接合方法が最も重要である。このような接合方法には、接合メカニズムで見ると、原子間の化学結合によるものと機械的接合によるものに大別できる。そして、化学結合は、原子間の結合力の強さにより、材質的結合(溶接)と化学的結合(接着)とに分類できる。すなわち、共有結合・金属結合のように解離エネルギーの大きい1次結合を用いた溶接と、ファン・デル・ワールス結合や水素結合のような2次結合による接着と、リベットやボルトなどを用い直接力学的に締結する機械的接合に大別できる。以下にその特徴をまとめる。

(1) 溶接³⁾⁴⁾

溶接の基本は、原子間の化学結合(金属結合、共有結合、イオン結合など)を達成することであり、これを実現するために加熱したり加圧したりする。接合する部材の相状態(固相、液相、気相)により細分されるが、建設分野では、一般に固相の部材を対象とすることから熔融接合が用いられる。すなわち、母材の一部を熔融・混合することにより接合を達成する。溶接接合は、継手効率が良く、構造形態をシンプルとすることができる半面、接合過程で、接合界面端部近傍に著しい残留応力の集中をもたらす、継手の強度の低下やき裂の発生原因になる。

(2) 接着⁵⁾

接着とは、材料と化学的結合性が高い高分子系接着剤を液相状態で接合界面に供給した後に固

化させて接合する方法である。通常、接着プロセスは常温で行われるが、固化を促進するために加熱することもある。接着させるには、まず接着剤が被接着材料の表面をぬらし、両者の間に何らかの結合が起こる必要がある。このような結合は、マクロな結合（アンカ効果のような機械的結合）とマイクロな結合（分子レベルでの結合）が組み合わさって達成される。接着は、常温で行われる面接合であり、被着材を劣化させることなく精度よく結合させることができるが、接合部の機械的強度が、通常の接合法に比べて低く、耐熱性能に劣るといった欠点を有する。なお、天然産の接着剤の歴史は、遠く紀元前までにさかのぼるが、合成樹脂、合成ゴムの出現が、接着剤の高性能化、大量生産化、工業利用を飛躍的に推し進め、あらゆる分野で不可欠な技術となった。特に、高強度の線材を樹脂で束ねた FRP 材料の発展は、高分子系材料の技術開発に基づいている。

(3) 機械的接合⁴⁾

リベットやボルトなどを用いた機械的接合は、一般には特殊な材料・設備を必要とせず、広く接合技術として普及している。例えば、鋼構造物の継手部では、荷重伝達機構（主に、材間接触面に生じる圧縮力と作用外力の軸線の方向の違い）により、支圧接合、摩擦接合、引張接合に分類されるが、かつては、リベットに代表される支圧接合が多用されたが、ボルトの高強度化にとともに、摩擦接合の使用実績が多くなってきた。このような機械的接合では、継手構造が複雑化し、材片数が多くなり、製作管理上の問題点が指摘される。なお、鋼材料とコンクリート材料の接合は、主にせん断力を伝達するため『ずれ止め』と呼ばれ、基本的に機械的接合に分類される。リベット・ボルトに変わる構造要素でプレストレスを導入する接合方法も同じである。構造物の部位ごとに伝達すべき断面力に対して、斬新な構造形式を考案することが技術開発となっている。

一般に、接合の役割としては、(a)同じ材質の複数の単純な素材を接合して、大きな素材・構造物を製作する（セグメントを接合して、部材を形成する）、(b)同じ材質の単純な形の部品を組み合わせる複雑な形の部品・構造物を製作する（板を接合して、I型断面とする）、(c)異なる素材を組み合わせる材質の異なる新しい素材を製作する（例えば、合成桁・混合桁）、(d)異なる材質の単純な形の複数の部品を組み合わせる複雑な形の部品・構造物を製作する（実構造物の多くがこれにあたる）、などに分類できるが、個々の接合方法の持つ利点・欠点を十分理解して使用していく必要がある。例えば、同じ材質の板を接合する場合、機械的接合および接着では、添接板として付加的な2枚の板で接合部を挟み接合されるが、溶接を用いる場合は、直接接合することも可能で、材料の節約、継手形状の簡素化、継手効率が高い、気密性に優れるなどの特徴を有する。一方で、溶接による急熱・急冷により収縮・変形を生じ、残留応力などの初期不整を形成する、材質が変化する、溶接部には欠陥が生じやすく破壊につながりやすい、品質検査上の技術的課題が多く存在する、などの欠点を有する。すなわち、『つなぐ』技術の難しさであり、面白さである。

3. 研究討論会の構成

複合構造委員会は、土木学会の基本方針に従い、複合構造に関する調査・研究を行い、複合構造工学の発展に寄与することを目的とする。この目的を達成するために、複合構造工学に関する①諸課題の調査・研究、②設計・施工・維持管理に関する指針・基準等の作成と更新、③講習会、シンポジウム、講演会、見学会等の開催、④国内および国外の学協会関係機関との研究連携、⑤刊行物等の企画編集等、また、その他目的達成のために必要な事業複合構造の調査研究、中・長期目標を設定している。特に、複合構造工学の底辺を支える活動組織として第2種委員会がある。2005年の設立時から現在に到るまで、以下の調査研究が進められている⁶⁾。

(1) 第2種小委員会の変遷

- H201 複合構造の現状調査小委員会（終了）
- H202 新材料による複合技術小委員会（終了）
- H203 維持管理小委員会（終了）
- H204 FRP 複合橋梁小委員会（終了）
- H205 FRP による鋼および複合構造の補修・補強小委員会（終了）
- H206 複合構造ずれ止めの性能評価法に関する調査研究小委員会
- H207 樹脂材料による複合技術研究小委員会
- H208 FRP 複合構造研究小委員会
- H209 FRP によるコンクリート構造の補強設計研究小委員会
- H210 複合構造を対象とした防水・排水技術研究小委員会
- H211 FRP と鋼の接合方法に関する調査研究小委員会

(2) 話題提供の内容

本討論会では、まず、小委員会活動の報告として以下の話題提供を行う。

- ①「鋼コンクリート複合構造のずれ止めについて」
H206 複合構造ずれ止めの性能評価法に関する調査研究小委員会
(委員長：中島章典・宇都宮大学教授)
- ②「樹脂による接着接合の現状紹介，要求性能および課題について」
H207 樹脂材料による複合技術研究小委員会
(委員長：上田多門・北海道大学教授)

また、小委員会での活動とはなっていないが、複合構造形式の各種接合方法の実構造物への適用に精通した実務者お二人をお迎えし、それぞれの経験に基づき現状を紹介して頂く。

- ③「複合橋における接合構造の現状と課題」
春日昭夫氏（三井住友建設 土木本部 土木設計部長）
- ④「鉄道構造物に採用されている合成構造の紹介，要求性能および課題について」
杉本一朗氏（(財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 鋼・複合構造研究室長）

4. 将来に向けて

本討論会は、複合構造接合部に関する研究開発，設計，施工など幅広い分野の技術者を対象に、最新の接合技術情報（要求性能，設計・照査方法など）の共有化と残された課題を明確にすることを目的に開催したものである。引き続き関係の皆様のご協力を頂きながら，経済的で高品質な複合構造物の未来を見据えた幅広い活動へと発展できれば幸いである。

【参考文献】

- 1) 土木学会：最新複合構造の現状と分析－性能照査型設計法に向けて－，複合構造レポート02，2008.7
- 2) 土木学会：複合構造標準示方書[2009年制定]，2009.12
- 3) 溶接学会編：溶接・接合工学の基礎，丸善，1993.3
- 4) (社)日本鋼構造協会：鋼構造技術総覧[土木編]，技報堂出版，1998.5
- 5) 日本材料科学会編：接着と材料，裳華房，1996.12
- 6) <http://www.ccn.yamanashi.ac.jp/~ssaito/jsce/fukugou/subcommittees.html>

鋼コンクリート複合構造のずれ止めについて

フェロー 宇都宮大学 中島章典

1. はじめに

鋼コンクリート複合構造は鋼材料とコンクリート材料を適切に組合せ、それぞれの材料の長所を活かし、欠点を補うことによって構造系として優れた性能を発揮させようとするものである。鋼コンクリート複合構造の優れた性能を引き出すために、鋼材料とコンクリート材料あるいは鋼部材とコンクリート部材の間で応力を適切に伝達させる必要がある。この応力伝達を達成するためにずれ止めと呼ばれる部材（部品）を取付ける場合が多く、このずれ止めは鋼材料とコンクリート材料間の変位（ずれ）を機械的に拘束することによって応力を伝達することになる。したがって、ずれ止めは鋼コンクリート複合構造において鍵となる部材であると言える。一般にずれ止めは鋼材料とコンクリート材料が接触する界面でずれを拘束することから、ずれ止め部材はせん断を受ける場合が多く、これがずれ止め（Shear connector）と呼ばれる理由である。

本稿では、実際の鋼コンクリート複合構造物に用いられるずれ止めの種類、ずれ止めの限界状態と要求性能、ずれ止めの設計・照査方法および課題について、著者の私見を交えて紹介する。

2. ずれ止めの種類

複合構造物に用いられるずれ止めとしては、頭付きスタッド（以下、スタッドと呼ぶ）、ブロックジベル（馬蹄形ジベル）、孔あき鋼板ジベル、形鋼シアコネクタ、アングルジベルなどがある。スタッドはアークスタッド溶接装置を用いて、大電流により短時間で簡単に溶接ができ、低コストであることから、合成桁や合成床版などに最も一般的に用いられてきている。これに対し

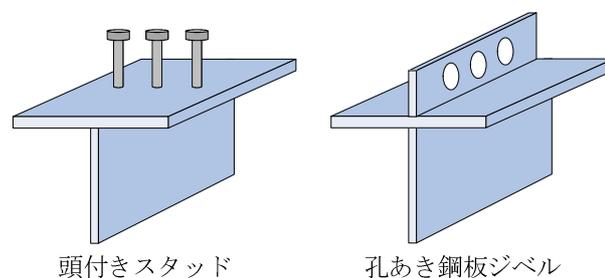


図-1 ずれ止めの一例

て、スタッドの疲労強度に対する懸念から、鉄道用合成桁ではブロックジベルに輪形筋を溶接した馬蹄形ジベルも用いられている。また、プレストレスコンクリート箱桁の自重低減などを目的としてウェブを波形の鋼板に代えた波形鋼板ウェブ橋においては、スタッドよりも高い耐力を期待したアングルジベルも用いられている。一方、形鋼シアコネクタは、逆L型あるいは逆T型の形鋼を鋼板に溶接しコンクリート版の片面あるいは両面に配置したサンドイッチ版などに用いられている。施工中における薄鋼板の補剛も兼ねるためずれ止めとして形鋼シアコネクタが用いられている。近年、鋼板に孔をあけてそこにコンクリートが充填されることによってずれ止めとなる孔あき鋼板ジベルが用いられるようになってきており、合成桁、合成床版の他、鋼コンクリート複合ラーメン橋剛結部、混合桁の鋼桁とPC桁の結合部、合成土留め壁など広範に用いられている。以上のようにずれ止めには種々のタイプがあり、それぞれの特徴を考慮して実際の複合構造物に用いられている。

3. ずれ止めの限界状態と要求性能

鋼コンクリート複合構造物のずれ止めには、両者の間でずれがほとんど認められず完全に一体である状態、鋼とコンクリート間のずれが大きくなりずれ止めが変形してほとんど補修が不可能なずれ止めの破壊状態、前述の完全一体の状態と破壊状態の間でずれ止めが受ける力は耐力までには至っていないがずれ止めには有意な残留変形が生じる状態などが限界状態および対応する要求性能として考えられる。また、鋼材の腐食などの観点から不都合な鋼とコンクリートの界面に隙間が生じる状態、さらに、繰返し作用によるずれ止めの疲労による破壊なども限界状態になる。ずれ止めを有する複合構造物では対応する作用に関連させてこれらの要求性能を満足させるようにずれ止めの設計を行うことが必要である。特に、複合構造物内のずれ止めはコンクリートによって囲まれていることからずれ止めの破壊や大きな残留変形が生じている場合、周辺のコンクリートが健全であればずれ止めの状況を確認することは難しい。したがって、ずれ止めの補修や復旧への対応を含めて、周辺の鋼材やコンクリ

一部分の要求性能とも関連させてずれ止めの要求性能を考える必要があると言える。

4. ずれ止めの設計・照査

複合構造物内のずれ止めを設計・照査する場合、鋼材およびコンクリートと同様に全体系を有限要素法などにより詳細にモデル化し、それぞれの材料強度のみを規定することによってずれ止めの限界状態を確認するのが理想である。この場合、特にずれ止めが受ける応力作用状態を推定する必要もない。しかし、ずれ止め付近の接触条件や拘束効果の影響のために、このような詳細解析によってもずれ止めの正確な挙動を再現することは難しい。また、弾性限界を確認することは可能であると考えられるが、ずれ止めの破壊などの限界値の設定は必ずしも容易ではない。そこで、ずれ止めを除く鋼材やコンクリートのモデル化は前述の詳細解析と同等にモデル化を行うとしても、ずれ止めの力の伝達をばねなどのマクロモデルに置き換え、ずれ止めの挙動を確認する方法が一般的に用いられる。ただし、ずれ止めをマクロモデルとして取り出す場合には、まず、実際の複合構造物内部におけるずれ止めの応力作用状態を適切に推定する必要がある。そして、このマクロモデルの挙動を再現する少数個のずれ止めを配置して応力作用状態を再現した要素試験を行い、ずれ止めの挙動をマクロモデルに置き換えた場合に必要となる耐力などの限界値やせん断力-ずれ変位関係を確認する。これらの関係を構造物全体系解析モデルのずれ止め部分に組み込み、マクロモデルに作用する応答値を求め、これを要素試験で求めた限界値と比較してずれ止めの照査を行うことになる。

しかし、ずれ止めの寸法や材料強度あるいは応力作用状態などずれ止めの挙動に影響を及ぼす影響因子が変化した場合、個々に要素試験を実施してずれ止めの限界値やせん断力-ずれ変位関係を確認することは容易ではない。そこで、平均的あるいは理想的な応力作用状態のずれ止めを対象とした要素試験を行い、この試験結果を用いてマクロモデルの挙動に及ぼす影響因子を確認する方法が用いられる。このような要素試験がずれ止めの挙動を確認する標準試験と呼ばれるものになると考えられる。

例えば、スタッドについては押抜き標準試験方法¹⁾が定められているが、この標準試験方法は、おもに合成桁（合成梁）に使用されるスタッドのせん断耐力やせん断力-ずれ変位関係を求めるものである。統一した試験方法による信頼性のあるデータを得るために、押抜き試験体の形状寸法、製作方法、荷重載荷方法、あるいは計測方法、データ整理方法などを規定している。そして、数多くの押抜き標準試験の結果に基づいて、スタッドのせん断耐力の評価式やせん断力-ずれ変位関係の定式化も行われている。

ただし、標準試験において確認されるスタッドの挙動あるいは限界値やせん断力-ずれ変位関係は、実際に構造物内の個々のずれ止

めの挙動を必ずしも完全に再現しているものではない。しかし、標準試験で確認されたずれ止めの挙動を構造物全体系のずれ止めのマクロモデルに組み込む際には、平均的に捉えているという観点から、個々のずれ止めの挙動が標準試験の挙動と完全には一致しない場合があることも勘案してせん断耐力やせん断力-ずれ変位関係を用いればよいと考えられる。もちろん、応力作用状態の差異が標準試験のそれと大きく異なり、標準試験の結果を利用することが難しい場合には、別に、個別の要素試験を実施することが必要になる。

2009年に発刊された複合構造標準示方書²⁾においては、このような観点から、スタッド、孔あき鋼板ジベル、ブロックジベル（馬蹄形ジベル）、形鋼シアコネクタに対して、耐力の評価式ばかりでなく、これまでに公表されているデータに基づいてせん断力とずれ変位の関係式も規定している。そして、おもに合成桁などを対象とした各ずれ止めの一般的な使用に対して、これらの設計値が参考とされて

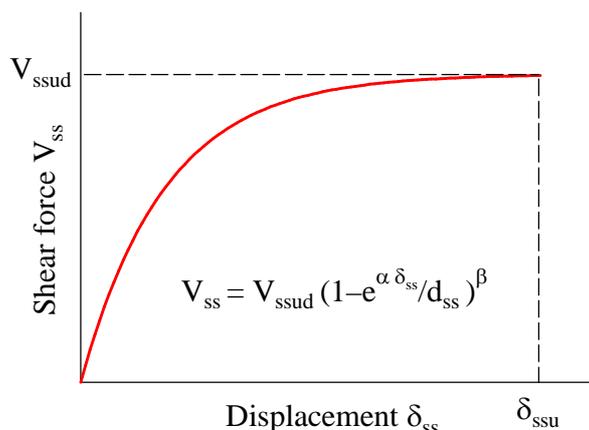


図-2 スタッドのせん断力-ずれ変位関係

おり、また、他の構造形式への使用に際してもこれらの設計値が準用されている状況である。

5. 今後の課題

上述の既に標準試験方法案が提案されているスタッドについても、試験に用いる押抜き試験体の設置の点などから必ずしも十分な標準化がなされていないとの報告³⁾もある。また、その他のずれ止めについては今のところ標準試験方法が確立されていないので、それぞれのずれ止めの平均的な挙動を再現できる汎用性のある標準試験方法を確立することも必要である。また、各種鋼コンクリート複合構造物内でのずれ止めの配置状況によっては2方向からのせん断力を受ける場合や、鋼材料とコンクリート材料の界面に垂直方向の力を同時に受ける場合もある。そのため、実際の複合構造物内部で個々のずれ止めが受けている応力状態に対応させて、マクロモデルに組込むことができる耐力やカー変位関係を確認しておくことが望まれる。

標準試験方法の確立とともに、標準試験と異なる応力作用状態のずれ止めの挙動を評価できるデータの蓄積、さらに、実際の複合構造物内のずれ止めの挙動を正確に把握することも必要であり、実挙動の確認と要素試験あるいは標準試験との対応が取れるようにこれらの行為を繰返すことが必要であると考えられる。

以上に述べたような複合構造物内のずれ止めの要求性能、設計・照査あるいは関係する事項をまとめた一覧を図-3に示す。複合構造委員会の中で活動している「複合構造ずれ止めの性能評価法に関する調査研究小委員会」では、これらの問題点を明らかにし、種々の複合構造物内のずれ止めの挙動を確認し、それぞれの状況に対応したずれ止めの性能を適正に評価する設計・照査法を改善するために調査研究活動を進めている。

6. 参考文献

- 1) 日本鋼構造協会：頭付きスタッドの押抜き試験方法(案)とスタッドに関する研究の現状, JSSCテクニカルレポート No. 35, 1996.
- 2) 土木学会：複合構造標準示方書[2009年制定], 2009.
- 3) 島弘：頭付きスタッドのせん断力とずれ変位およびスタッド軸方向挙動との関係に及ぼす試験方法の影響, 土木学会論文集A1, Vol. 67, No. 2, pp. 307-319, 2011.

複合構造物内のずれ止めの設計・照査

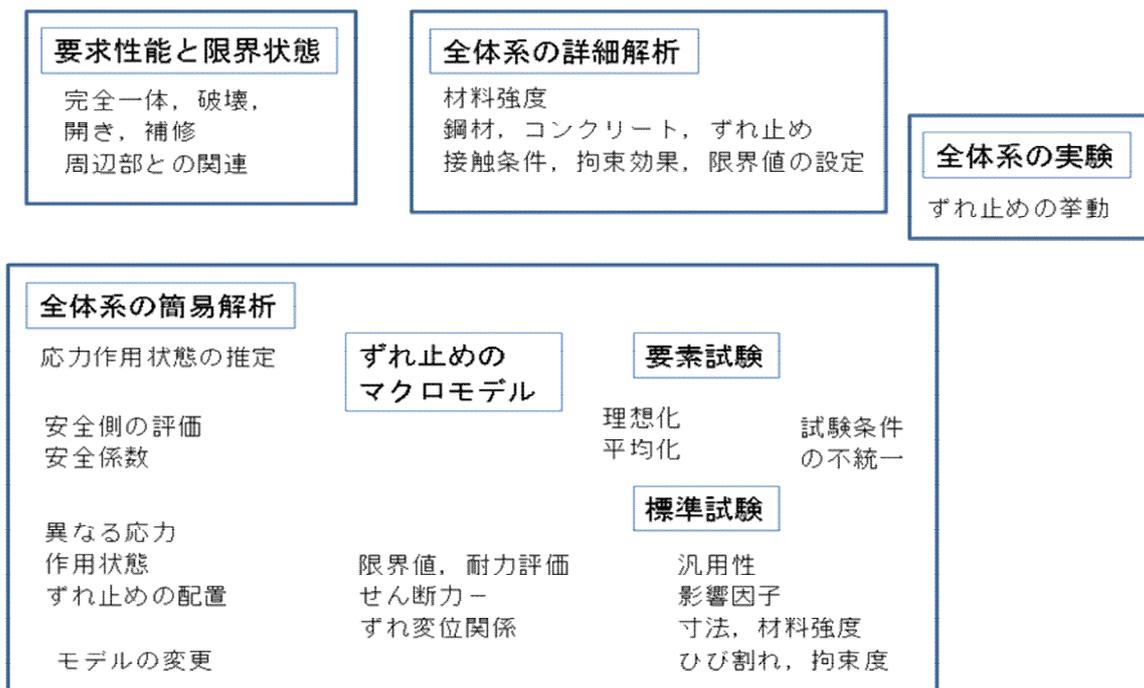


図-3 複合構造物ずれ止めの要求性能および設計・照査の考え方

樹脂による接着接合の現状紹介，要求性能および課題について

フェロー 北海道大学 上田 多門

1. はじめに

異種材料をつなぐことによって、それが同じ断面内であれば合成部材であり、それが異種部材間であれば混合構造である。それらを総称する複合構造は、まさに「異種材料をつなぐ」ことより成り立っている。異種材料のつなぐ方法として、樹脂を用いることは、複合構造でよく行われており、典型的な適用法として以下の3つがある。

- 接合用樹脂
- 表面被覆用樹脂
- 複合材料用樹脂

接合用樹脂は、正しく異種材料をつなぐ目的で樹脂を適用する場合である。表面被覆用樹脂は、表面被覆材料を基盤材料につなぐ目的で樹脂を適用する場合であり、表面被覆材料自体が樹脂である場合も多い。複合材料用樹脂は、複合材料内の異種材料をつなぐ目的で適用される樹脂である。3つの場合で、つなぐための力学的あるいは幾何学的条件が異なるものの、異種材料をつなぐという点で樹脂が使われているのは共通している。

ここでは、このうち、接合用樹脂を主体に、その現状を簡単に紹介するとともに、接合用樹脂の要求性能と課題について、樹脂材料による複合技術研究小委員会での議論と私見に基づいて報告する。

2. 複合構造に適用されている樹脂の種類

異種材料をつなぐために、建設分野で我々がよく目にする樹脂として、エポキシ樹脂があるが、実際には多種多様な樹脂がある。いろいろな区分の仕方があるが、以下はその一例である（カッコ内は、主な用途例）。

- エポキシ樹脂（ライニング材，塗料，補修材）
- ウレタン／ウレア樹脂（ライニング材，塗料，接着剤）
- 不飽和ポリエステル樹脂／MMA樹脂／ビニルエステル樹脂（FRPマトリクス，ライニング材，複合材の結合材）
- アクリル樹脂（目地材，表面被覆材，含浸剤，補修材）
- シリコン／ポリサルファイド樹脂（シーリング材）
- フッ素樹脂（耐候性の上塗り塗料，離型剤）
- フェノール樹脂（難燃材）

これらの樹脂は、強度や剛性といった力学的特性、物質の浸透性といった耐久性に関する特性、温度依存性、樹脂自体の環境作用に対する耐劣化性、施工性（硬化時間など）、といった特性が異なる。また、各成分や構成比率を変えても、特性は変わる。

これまで、樹脂のユーザーである建設技術者は、樹脂の持っている特性にあまり関心を示してこなかった。例えば、典型的な接合用樹脂である、接着工法に適用されている樹脂の力学的特性を知っている技術者は少ない。

3. 複合構造物への要求性能

複合構造をはじめとした土木構造物に対して、性能規定型（性能照査型）の設計コンセプトが適用されるようになってきた。性能規定型とは、要求性能を明示し、それが供用期間にわたって満足されていることを、何らかの方法で提示することである。ただし、要求性能を照査する方法は、こうでなくてはならないという規定はない。この点は、従来の設計コンセプトと異なる点である。土木学会の複合構造標準示方書においても、土木構造物共通示方書、コンクリート標準示方書、鋼・合成構造標準示方書と同様に、性能規定型が導入されている。複合構造標準示方書では、性能照査法を具体的に示す要求性能として、次のものを掲げている。

- 安全性
- 使用性
- 復旧性（修復性）

なお、耐久性は、上記の要求性能が設計供用期間にわたって、満足されるように、環境作用に対する抵抗性を保有していることとしている。

複合構造の一部である異種材料をつなぐ樹脂も、他の建設材料と同様に、構造物が要求性能を満足するために必要な特性というものが自ずと定まってくる。ただし、性能の照査法（もしくは、性能の達成法）は何であってもよいので、樹脂もその達成法によって、必要な特性が異なってくる。

4. 接合用樹脂への要求性能

複合構造物として要求性能を達成するために、その中で使用されている接合用樹脂が必要な特性が定まる。ここでは、この必要な特性を接合樹脂への要求性能と呼ぶことにする。接合用樹脂は、異種材料を力学的につなぐものであるため、必要な大きさの力を伝えるため、あるいは、異種材料間でのずれを設計で想定されている水準以下に抑えるため、強度と剛性が必要であるのは言うまでもない。また、通常の建設材料と同様に、環境作用に対し耐久的でなくてはならないことも自明である。

ここでは、従来考えられていない視点で、接合用樹脂への要求性能について述べてみる。

(1) 修復性の視点からの要求性能

接合用樹脂は、元々別個に存在していた異種材料を、接着面を通してつなぐもので、万が一過大な荷重などによって損傷した場合、被接着体である基盤材料部が損傷する場合より、接合面で損傷した方が、損傷個所が限定され修復しやすい場合もありうる。その場合、被接着体より接着用樹脂の強度を小さくする、もしくは、接着面での剥離が基盤材料内の破壊より先に生じるように、接着用樹脂の力学特性を選択するとよい。

(2) 接着界面の力学的視点からの要求性能

接着界面での終局限界状態は剥離である。研究成果¹⁾によると、基板材料がコンクリートの場合、コンクリートの表層を含んだ薄い層内での剥離となるが、剥離耐力を大きくするためには、接着用樹脂の接着層のせん断剛性を小さくするとよいことが知られている（図-1）。だとすると、接着用樹脂のせん断剛性を小さくするか、樹脂層を厚くするとよいことになる。

鋼材や超高性能繊維補強コンクリートなどのように、基盤材料の強度が大きくなり、剥離が接着用樹脂層内での破壊となる場合は様相が変わってくる。この場合は、接着樹脂層のせん断剛性の影響は顕著ではなくなり（図-2）、樹脂の強度や破断時のひずみに支配されるようになる。

5. 今後の課題

接着用樹脂を含め、複合構造に使用される樹脂の耐疲労性や環境作用に対する耐久性に関するデータが十分ではない。例えば、接合面が外環境に直接触れないような状況の場合でも、被接着体がコンクリートの場合、何らかの理由で発生したひび割れなどが理由で、接着面に水が滞留するような場合もありうる。外からは直接観察することができないので、接着用樹脂の湿潤環境下での耐久性は重要となる。

接合用樹脂は、ユーザーである建設技術者は、メーカーから与えられた樹脂をそのまま使用する傾向が従来強かった。本来は、コンクリートや鋼材のように、建設材料として必要な特性を我々が明示し、メーカーに我々が望む樹脂を作ってもらわなければならないべきであり、今後はこの方向が強まることが望まれる。

6. 参考文献

- 1) Tamon Ueda and Jianguo Dai: Interface bond between FRP sheets and concrete substrates: properties, numerical modeling and roles in member behaviour, Progress in Structural Engineering and Materials, Vol.7, No.1, pp.27-43, January-March 2005.

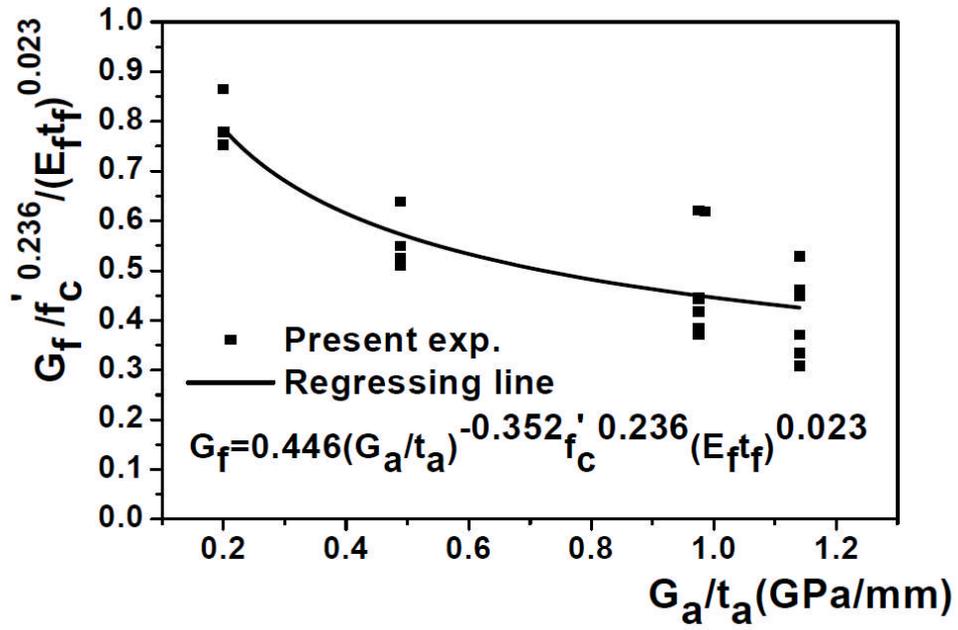


図-1 接着用樹脂の接着層のせん断剛性と剥離破壊エネルギーとの関係¹⁾

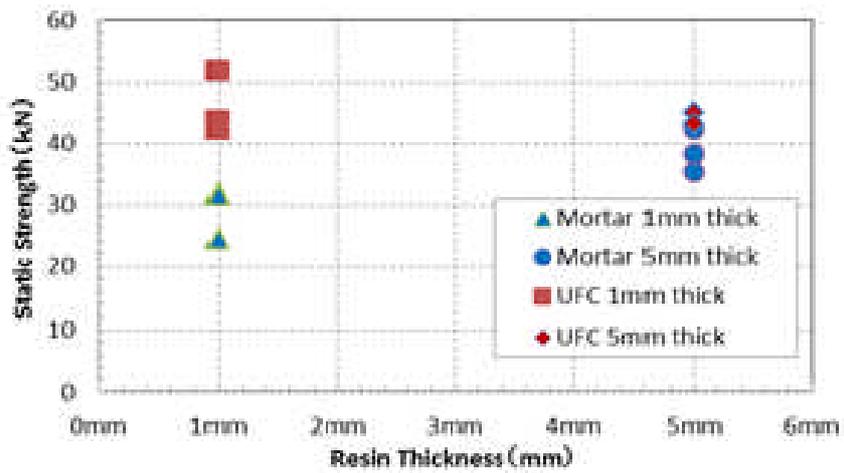


図-2 接着用樹脂の接着層の厚さとせん断剥離耐力との関係

複合橋における接合構造の現状と課題

三井住友建設(株) 春日昭夫

1. はじめに

近年、国内における複合橋の発展には目覚ましいところがある。そして、波形ウェブ橋、複合トラス橋、混合橋などそれぞれの材料の利点を活かした構造が多く出現している。しかしながら、複合橋のひとつである合成桁は古くから採用されてきた。合成桁はコンクリート床板と鋼ウェブを合成し、線状の接合部が水平せん断を伝えて構造を成立させる。一方で、波形ウェブ橋はそれに加えて、ウェブが面外剛性を持つことで横方向にも抵抗する。さらに複合トラスは、点支持である鋼斜材の接合部が軸力や曲げを伝達するもので、そこには非常に大きな力が集中して作用することになる。

接合部は、複合橋の構造が成立するための非常に重要な部位である。したがって、他の部材よりも高い強度と耐久性を有しなければならない。また、鋼とコンクリートの弾性係数が7～8倍違うことによる解析モデルへの配慮や、コンクリートのクリープ（相対的にコンクリートの剛性が低下する）により応力が鋼部材へと流れていく挙動など、設計時に十分考慮する必要がある。以下に、代表的な複合橋である波形ウェブ橋と複合トラス橋に関して、接合構造の現状とその課題について論じる。

2. 波形ウェブ橋におけるコンクリートとの接合構造

波形ウェブ橋は、国内の実績がすでに130橋を越え、その最大支間長は160mになろうとしている。波形ウェブ橋のコンクリートと波形鋼板の接合部において、床板部と並んで重要な部位のひとつが柱頭部である。柱頭部に配置される波形鋼板は、終局時に床板にひび割れが発生すると波形鋼板にも曲げが作用するようになり、同時にせん断も負担しなければならない。文献1)には、波形ウェブ橋の破壊までの実験結果が示されているが、終局時には柱頭部に埋め込まれた波形鋼板が一部切断している。この実験では波形鋼板を柱頭部に埋め込んだ接合構造のために曲げを負担できるが、柱頭部も床板と同じようにジベルで接合した場合、ジベルが引き抜かれる方向に働く曲げを負担することができない。荷重としては終局荷重よりも大きなレベルではあるが、接合部の要求性能を明確にした的確な接合構造を選択する必要があるといえる。

3. 複合トラス橋における格点の接合構造

古典的なトラス理論では、格点はピン結合として全体構造を解いてきた。一方、近年国内でも建設がおこなわれるようになってきた複合トラス橋では、格点を剛結として解析している例が多い。複合トラス橋では、古典的なトラスと違って斜材の長さが短いものもあり、本来ならば軸力部材である斜材の二次曲げが無視できない場合もある。文献2)には、接合構造の異なる2タイプのトラス斜材の回転性能の実験結果が示してある。図-1に示すように、圧縮側は剛結の場合と同じ回転性能だが、引張側は接合構造によって剛結の1/4～1/8の回転ばね定数になる。このことはトラス材に発生する二次曲げに大きく影響を与え、回転ばねを解析モデルに考慮する必要性を示唆しているといえる。

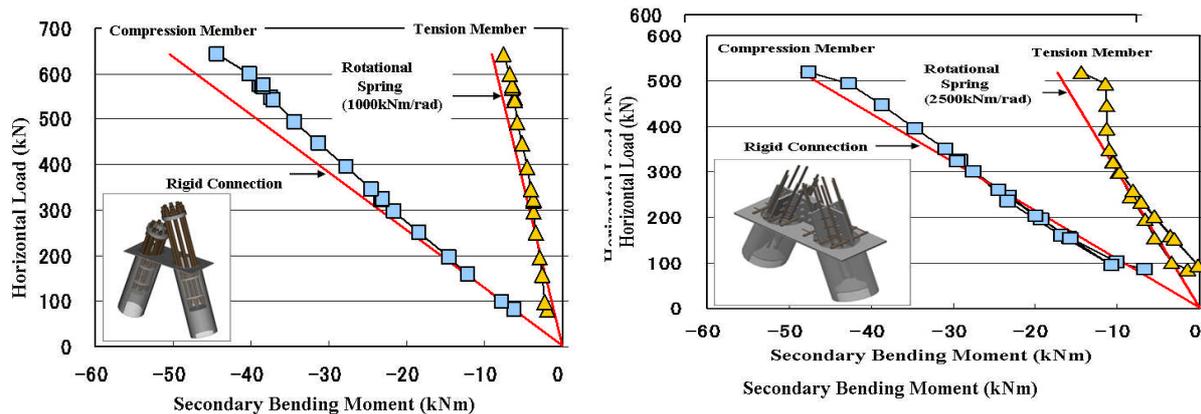


図-1 複合トラスの格点部の挙動²⁾

4. 設計における課題

複合橋を道路橋示方書³⁾によって設計する場合、鋼の部位とコンクリートの部位では設計手法が少し異なる。基本的には両者とも許容応力度設計法であるが、コンクリートは終局時のチェックをおこなうため、荷重係数とその組み合わせが規定されている。

接合部は複合構造の要であるため、その強度は他の部位よりも安全度を大きくする必要がある。このとき重要なのが、設計荷重時に接合部をどのような状態にするのか、また、終局時にはどのレベルまで許容するのか、ということ在设计者が決めなければならないということである。頭付きスタッド等の従来の接合構造以外の新しい接合方法を採用する場合、破壊実験を行ってその挙動を十分把握する必要があるが、このとき今のところコンクリート橋編に示されている荷重係数を目標に接合部の強度を決めるという手法がとられることが多い。しかし合理的な接合部の設計をおこなうには、接合部の要求性能を明確にし、各々の接合構造に合った抵抗係数や荷重係数のさらなる研究と規準化が望まれる。

5. おわりに

接合部の応力を伝達するものとして、頭付きスタッド、鉄筋、PC鋼材、アングルジベル等様々なものが開発されてきた。近年開発されてきた新しい複合橋は、単純にせん断だけでなく曲げや軸力が作用する部位にも接合部が存在する。つまり、複合橋の接合部は、部位ごとに最適な構造と様々な材料の組み合わせが存在する。また、接合部は局部的な応力に支配されるために、三次元 FEM などの特殊解析が必要になるケースが多い。今後、接合部の要求性能を明確にし、その検証方法を定めることで複合橋のさらなる発展が大いに期待できるものと考えられる。

参考文献

- 1) 前田、飯島、浅井、春日：波形鋼板ウェブエクストラード橋の斜材定着構造および曲げ挙動に関する研究、土木学会論文集 No. 794/I-72、pp227-238、2005年7月
- 2) 浅井、諸橋、永元、吉野：斜材定着部をともなう複合トラス接合部に関する実験的研究、第6回複合構造の活用に関するシンポジウム、土木学会、pp40-1~40-6、2005年
- 3) 道路橋示方書 IIIコンクリート橋編、道路協会、平成14年3月

鉄道構造物に採用されている複合構造物の紹介，要求性能および課題

鉄道総合技術研究所 杉本 一朗

1. はじめに

鉄道では，昭和 30 年頃から複合構造物が用いられている．当初は，単純合成桁，鉄骨鉄筋コンクリート構造（SRC 構造）が主であったが，その後，施工性や耐震性等に優れていることからニーズが増え，近年では，コンクリート充填鋼管構造（CFT 構造），複合トラス，および，複合ランガー橋などが新たに開発され，適用の拡大が図られている^{1,2)}．複合構造物は，鋼とコンクリートが一体となって挙動することにより耐荷性や耐震性を発揮することから，ずれ止めが重要な役割を果たす．一般に鉄道の複合構造物では，ずれ止めとして馬蹄形ジベル，頭付きスタッド，孔あき鋼板ジベル等が用いられている．

ここでは，鉄道における複合構造物の概要³⁾と，これらの構造物に用いられているずれ止めの特徴を紹介するとともに，ずれ止めの要求性能や設計上の課題について述べる．

2. ずれ止めを用いた複合構造物の紹介

(1) 合成桁^{4,5)}

合成桁は，鋼桁とコンクリート床版を一体化した構造で，狭隘な箇所や足場の設置が困難な箇所をはじめとして適用されている（写真 1）．合成桁は，昭和 29 年架設の高屋川橋りょうに用いられて以降，単純合成桁が多数適用されてきたが，現在では連続合成桁も適用されており，優れた施工技術も開発されている．



写真 1 合成桁

合成桁の基準としては，昭和 38 年に鉄道で初めての合成桁の設計標準となる「合成桁鉄道橋設計示方書案」⁶⁾が発刊され，以後，現在に至っている．

合成桁のずれ止めには，馬蹄形ジベル（写真 2）が多数用いられている．近年の連続合成桁では，正曲げ区間に馬蹄形ジベル，負曲げ区間に孔あき鋼板ジベル（写真 3）が用いられている．これらは，いずれもせん断剛性が高く，剛なずれ止めである．頭付きスタッド（写真 4）は，最近では少数主桁の合成桁等に用いられている．



写真 2 馬蹄形ジベル



写真 3 孔あき鋼板ジベル



写真 4 頭付きスタッド

(2) SRC 構造^{4,5)}

SRC 構造は、形鋼または溶接組立された鉄骨のまわりに鉄筋を配置してコンクリートを打設した構造であり、駅部のラーメン構造物や桁高制限の厳しい箇所に適用されている(写真 5)。SRC 橋脚は、昭和 37 年架設の品鶴貨物線の二階建て区間に用いられて以降、新幹線の仙台、長岡、盛岡等の駅部において多数適用されている。

SRC 構造の鉄骨とコンクリートの境界部は、一般にはずれ止めは設けないが、コンクリートの剥離が懸念される場合には頭付きスタッドを設けている。

(3) CFT 構造¹⁾

CFT 構造は、円形あるいは角形の鋼製閉断面に材軸方向に沿って全体にわたりコンクリートを充填した構造で、急速施工や狭隘箇所での施工において有利な構造である(写真 6)。CFT 構造は、15 年ほど前に秋田新幹線の高架橋の柱⁷⁾に用いられて以降、主に駅部の高架橋や営業線近接部等において多数適用されている。

CFT 構造の鋼管とコンクリートの境界部も一般にはずれ止めは設けないが、鋼管の端部において、充填コンクリートの抜け出しを防止するためにずれ止めが用いられることがある。また、柱・梁接合部においても、一体化を図るために頭付きスタッドや孔あき鋼板ジベルが用いられることが多い。

(4) 最近の複合構造

最近の複合構造として、コンクリート充填鋼管構造を桁に用いた構造⁴⁾(CFT 桁)や SRC 床版を有する複合トラス⁸⁾、複合ランガー橋^{9,10)}などが開発され実用化されている。例えば、トラスの床組みを SRC 部材とし、縦桁を無くした構造を図 1 に示す。

これらの構造においても、鋼とコンクリートの一体化が図られている。

(5) 既設鋼橋のリニューアル構造

既設鋼橋は、供用 60 年を超えるものが多く、開床式の構造が多い。このような既設鋼橋の耐荷力・耐久性の向上、振動・騒音低減等の目的で、鉄筋コンクリートと一体化したリニューアル構造に関する技術開発が行われている。写真 7 に鋼橋と橋台を一体化した構造の検討例を示す¹¹⁾。



写真 5 SRC 桁



写真 6 CFT 構造

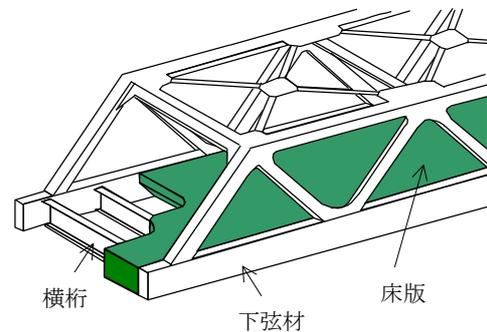


図 1 複合トラス



写真 7 既設鋼橋と橋台の一体化構造

3. ずれ止めを用いた構造物の要求性能

鉄道では、合成桁に関しては、「鉄道構造物等設計標準・同解説（鋼・合成構造物）」（以下、鋼・合成標準¹²⁾）に、SRC 構造、CFT 構造に関しては、「鉄道構造物等設計標準・同解説（鋼とコンクリートの複合構造物）」（以下、複合標準¹³⁾）に設計法を記載している。現在、ずれ止めの照査法を記載しているのは「合成桁」のみであるが、改訂中の複合標準においても、異種部材接合部等の複合構造物に用いるずれ止めの照査を記載する予定である。

ここでは、ずれ止めに着目した構造物の要求性能について、合成桁とそれ以外の複合構造に分けて記載する。

(1) 合成桁

鋼・合成標準における合成桁のずれ止めの基本的な考え方は、

- ・通常の使用状態においてずれない。
- ・想定される最大作用の状態やその繰り返しによって破壊しない。

としている。この時、ずれ止めは、鋼桁の降伏やコンクリート床版の圧縮破壊より先行して破壊しないことを前提にしているため、ずれ止めの設計耐力は相当に安全側に定めている。そのため、想定される最大作用の状態においても、ずれは微小なレベルに留められている。

(2) 合成桁以外の複合構造

複合標準の改訂において、複合構造のずれ止めの基本的な考え方は、

- ・想定される最大作用の状態において破壊しない。（破壊に関する安全性）
- ・想定される作用の繰り返しによって疲労破壊しない。（疲労破壊に関する安全性）
- ・通常の使用状態においてずれない。（使用性）
- ・想定される作用によって損傷しない、または、復旧可能な損傷レベルに留める。（復旧性）

としている。これらの考え方に関しては、個々の照査法を含めて検討中である。

4. ずれ止めの今後の課題

ずれ止めに着目した構造物の要求性能を上記のように考えているが、ここでは、ずれ止めに関する今後の課題について、鉄道構造物等設計標準をとりまとめる観点から若干私見を述べる。

- ・現状の設計法では、ずれ止めを密に配置せざるを得ないケースが多い。ずれ止めの施工性向上や製作コスト低減のために、より合理的な照査法を確立していくことが重要と考えられる。
- ・近年では、種々の複合構造物が開発されていることから、例えば、ずれ止めのせん断力等の算定法、水平 2 方向や鉛直+水平方向等の組合せ応力下でのずれ止めの耐力等の算定法を確立していくことが重要と考えられる。
- ・鋼とコンクリートが“ずれない”ことや“一体化”した状態を保証できるような評価法を確立していくことが重要と考えられる。

5. おわりに

以上、鉄道における複合構造物の概要と、ずれ止めの特徴を紹介すると共に、ずれ止めの要求性能や設計上の課題について述べた。複合構造物は、施工性、耐震性等の観点から、今後も多く適用されることが想定される、また、さらなる新しい複合構造物の開発も期待される。引き続き関係の皆様のご協力を頂きながら、経済的で高品質な複合構造物の普及に努めたい。

【参考文献】

- 1) 土木学会複合構造委員会：最新複合構造の現状と分析－性能照査型設計法に向けて－，複合構造レポート02，土木学会，2008.7
- 2) 構設史編集研究会編：鉄道構造物を支えた技術集団：日本鉄道施設協会，2009.9
- 3) 池田：鉄道における複合構造物の現状と課題，土木学会第56回年次学術講演会 研究討論会 概要，2010.9
- 4) 保坂，杉本：鉄道における最近の鋼・コンクリート複合橋梁，橋梁と基礎，2000.7
- 5) 南，奥村，横山，光木：九州新幹線（博多-新八代）における鋼鉄道橋の概要と松原線路橋の架設，第13回鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集，2010.8
- 6) 国鉄：合成桁鉄道橋設計示方書案，1963.
- 8) 大槻，川瀬，高橋，前沢：日本初のCFT構造を用いた鉄道高架橋の設計・施工，コンクリート工学，1998.6
- 7) 西村，下野，紀伊，矢島：奈良線鴨川橋梁の設計と施工－SRC床版の採用により低い床高と鋼重の低減を可能にした鉄道鋼トラス橋－，橋梁と基礎，2000.11
- 9) 川村，枝松，古道，小幡，佐藤，土井：星が浦海岸通架道橋の設計と施工，橋梁と基礎，2008.9
- 10) 井上，佐藤：第一新田川橋梁－PC複合ランガー橋－，橋梁と基礎，2002.8
- 11) 平，山野辺，三川，松尾，小林，杉本：既設鋼桁と橋台の一体化方法の検討－その1，その2－，土木学会年次講演会，2010.9
- 12) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説（鋼・合成構造物），丸善，2009.7
- 13) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説（鋼とコンクリートの複合構造物），丸善，2000.7