

リベット・ボルト・溶接 そして 接着のお話

部材の組み立てと添接

2022-11

0. はじめに

橋を代表として、大寸法の近代建造物の設計・製作・輸送、そして現地での工事は、18 世紀以降、木材・石材に代って、鉄・鋼・コンクリートを構造材料とする時代になりました。鋼構造物では、工場で製作される部材単位を輸送し、現地で組み上げ(assembling)、または接合(connect)します。部材は鋼板(漢字は金偏の板)を綴じ合わせることが主な作業であって、これを添接(splicing)といいます。古い鋼構造物では、リベット(鋳:びょう)を使用しました。この文書の表題の始めに表記しましたが、ボルト、溶接、も含めて解説します。部材の接合には、摩擦力を考えた力の処理があります。高校の物理学で初歩的な説明があります。ただし、実践的な応用については詳しい解説がありません。吊橋・斜張橋・鉄筋コンクリート・PC 桁(プレストレストコンクリート)で引張り力を伝える鋼の素線を留めるソケットでの利用を支えています。コンクリートは、接着材である、との説明は耳新しいことと思います。現代は、石油製品から製造されるプラスチックに溢れています。その原理的な解説も加えました。

部材の組み立ての前段階に、大きな寸法の材料を、加工作業に向くように、適度な寸法に切り分ける処理があります。古い時代から使われてきた石材と木材の扱いがそうです。どちらも、圧縮力を支える柱材と、曲げを受け持つ梁材として使い方が主です。鉄鋼材料の場合、切り分け作業が便利になるように、板状または棒状に圧延した材料で出荷されます。それを扱う鉄鋼問屋で、加工に便利な小材料に切り分けるとき、鋸の原理で裁断する巨大な押し切装置があって、シャーリングと呼ばれています。英語の shirring のカタカナ読みであって、職業名になっています。寸法が大きくない材料、また、材質としては軟鋼の切断に使います。しかし強度の高いまた、硬い材料の剪断には向きませんので、ガスを使う溶断が使われます。鋳鋼は、ガスを使うと、全体に溶融が広がりますので、最初から加工寸法に合わせて鋳造します。切断作業には、針金を引っ張りで破断させることもあります。しかし、工業的な加工作業には採用しません。機械的な切断は、すべて、力学的には剪断で行われます。木材加工道具のかんな(鉋)やのみ(鑿)は、刃が一枚ですが、剪断の道具です。のこぎり(鋸)も、多くの刃並びを組み合わせて剪断をする道具です。お料理に使う包丁は、一つの刃で二つに切り分ける使い方をします。剪断原理ではない切断と思うでしょうが、材料が軟らかいので、剪断が意識できないのです。包丁さばきでは、包丁を滑らせるように使います。このような雑学的な知見を常識であると考え、この文書では、剪断の力学原理の解説を主題としました。

日本の木造建築は、水環境に置かれていなければ、寺社建築に見るように、千年もの耐久性があります。釘(くぎ)やかすがい(鏝)のような金属材料を使う接合法を使いません。また、全体をそっくり分解して、別の場所に移築することもあります。古くなった材料の取り換え、また古材を再利用(リサイクル)もされます。明治時代のトラス鉄道橋は、欧米から部材に分けて輸入され、リベットで組み立てました。高価な買い物ですので、組み立て部分のリベットを抜いて、別の場所で打ち直して再利用も図られました。箱根の登山鉄道に架けられている早川橋梁が有名です。

島田静雄

目 次

- 0. はじめに
- 1. 木・鉄そして鋼への流れ
 - 1.1 良質の森林資源が乱伐された
 - 1.2 鉄の時代の橋
 - 1.3 鋳鋼は簡易な支承に使われる
 - 1.4 鋼材も種類が多いこと
 - 1.5 アルミ合金の橋梁 16.1 鉄から鋼への流れ
 - 1.6 鉄筋コンクリートの鉄筋は摩擦力で留める
 - 1.7 PC ケーブル材に使う素線も摩擦力で留める
 - 1.8 エレベータの電動化はオーチスに始まる
- 2. リベット構造
 - 2.1 力の伝え方
 - 2.1.1 剪断を受けるように設計すること
 - 2.1.2 リベット継手の強度は三つの視点がある
 - 2.1.3 リベット値として設計計算に応用する
 - 2.2 リベット群の幾何学的並び
 - 2.2.1 リベットの最大間隔と最小間隔
 - 2.2.2 最大縁端距離と最小縁端距離
 - 2.2.3 引張り継手の穴配置の設計
 - 2.2.4 引張り継手のリベット列
 - 2.2.5 千鳥にリベットを並べるとき
 - 2.2.6 一列当たりの最大本数と最小本数
 - 2.2.7 継手全体としての最小本数
 - 2.3 リベット群としての設計
 - 2.3.1 全体構造に組み上げるときの注意
 - 2.3.2 直接継手と間接継手
 - 2.4 リベット作業の流れ
- 3. リベットから高力ボルトへの移行
 - 3.1 ボルトの合理的な使い方
 - 3.2 ボルトを使うときの締め付け力の計算
 - 3.3 ボルトの実用的な締め付け力
 - 3.4 ボルト一本当たりの設計耐力
- 4. 溶接構造
 - 4.1 溶接で使う専門用語
 - 4.1.1 隅肉溶接と付き合わせ溶接を理解する
 - 4.1.2 隅肉溶接とはヒレ肉溶接の意味
 - 4.1.3 突き合わせ溶接も牧畜用語から
 - 4.1.4 開先
 - 4.1.5 空気との接触を避ける潜弧溶接
 - 4.2 溶接性の課題
 - 4.2.1 溶接性という概念
 - 4.2.2 溶接が効かない場合もあること
 - 4.2.3 溶接性の良い材料への要求
 - 4.2.4 焼きが入らないようにすること
 - 4.2.5 溶接による歪み
 - 4.2.6 下向きの溶接作業にするための工夫
 - 4.3 隅肉溶接の力学
 - 4.3.1 付き合わせ溶接は製作設計に属すること
 - 4.3.2 隅肉溶接部は剪断応力で設計する
 - 4.3.3 隅肉溶接は切り欠き部分を持つこと
 - 4.4 溶接による構造の構成
 - 4.4.1 リベット構造の考え方とは異なること
 - 4.4.2 トラスの構造設計の変化
 - 4.4.3 二次元弾性問題とは
 - 4.4.4 平均的な応力度と局所的な応力度
 - 4.4.5 静的破壊と疲労破壊とは異なる
 - 4.4.6 リベット構造での疲労
 - 4.4.7 異種の継手の混用
 - 4.4.8 耐震性・耐風性・耐久性
- 5. 接着原理の概説
 - 5.1 コンクリートと溶接とは共に接着構造である
 - 5.2 二種類の接着原理
 - 5.3 構造接着と非構造接着

1. 木・鉄そして鋼への流れ

1.1 良質の森林資源が乱伐された

地球の歴史はよく分からないことが多く、神秘的です。建築材料に使う木材に関して言えば、石炭は、何億年もの古い時代に、巨大な森林資源があったことを示唆しています。歴史が下がって人類文化が発生し、ノア方舟、トロイの木馬の伝説があったことは、当時も、良質な木材が利用できたことも示唆しています。木材は圧縮力を受ける柱と、横にして曲げ材に使う場合があります。中東欧のレバノン杉は、建築材だけでなく、高さの高い木造帆船のマストに最適であったため、大航海時代にかけて乱伐されました。現在、レバノン政府は、国をあげてレバノン杉の保護と育成とに当たっています。日本は、森林資源に恵まれている国ですが、巨木は7世紀頃までに、あらかた使い尽くされてしまいました。奈良の東大寺大仏殿は、現存する世界最大の木造建築です。創建は8世紀、(752年)に大仏の開眼がされたのですが、何度も消失しました。再建に使用したい巨木の横梁(大虹梁)を既に調達できなくなっていました。大仏殿は、大仏を安置するため、幅・奥行き・高さ、ともに20m(約 6.5 丈)の空間が必要です。現代ならば、トラス構造を使えば簡単に得られる支間ですが、当時はトラスの力学が知られていませんでしたので、巨木の梁で渡し、その上に 3000 重量トンの屋根を支えました。江戸時代(1709)に再建を計画した公慶は、全国を行脚して大虹梁に使える長い 2 本の巨木を探すことから作業を始めなければならませんでした。現在する大仏殿は、創建時よりも間口が 2/3 の縮小寸法にせざるを得ませんでした。ただし、大虹梁を支える柱は、60 本の数がある柱列です。圧縮力だけを受けますので、断面寸法の小さい柱を組み合わせています。中国の首都北京にある天安門は木造です。世界中の銘木を集めて建設されました。ブラジルは、良質な木材資源の供給国として世界中から注目されるようになり、乱伐が社会問題になっています。森林の育成は百年また千年単位の長い年数が必要です。巨木として利用できるよう育成は、絶望的になりました。因みに言い添えますが、パリのエッフェル塔は、100m 支間の 4 本の柱の間がアーチ状の吹き抜けになっています。この空間に東大寺大仏殿はスッポリと納まるのです。

1.2 鉄の時代の橋

橋の歴史を語る上で、鉄橋と鋼橋との区別は理解しておきたいことです。一般の人は、鉄(iron)と鋼(steel)の区別ができませんので、一般用語では単に鉄橋と言います。専門的には、鉄で造った橋は現在では殆ど実用されていません。鉄や鋼の種類に関する用語は多く、銑鉄・鑄鉄・錬鉄・軟鋼・鑄鋼・普通鋼・高張力鋼…などと呼び分けています。鉄とは、溶鉱炉から出た銑鉄(pig iron)をあまり精製しないで利用する鑄鉄(cast iron)と、平炉で精製した錬鉄(wrought iron)とを合わせて言います。鋼とは、溶鉱炉から出た銑鉄を 1856 年にベッセマーが発明した転炉(converter)を使って鋼に変えた、当時の新素材です。これによって、鋼材料が大量生産できるようになり、価格も劇的に安くなりましたので、19 世紀終り頃からの長大橋梁の建設に繋がったのです。なお、エッフェル塔は、こだわりもあったのですが、錬鉄 7000 トンで建設されました。

ベッセマー以前、またその後にも、鉄の橋は建設されていました。木橋のような、横桁にして使う力学構造が難しいこともあって、吊橋構造が多く利用されました。主に鑄鉄で柱を造り、ケーブルに代る引張り材には、錬鉄を鍛造で細長い部材に加工し、両端に穴を開けたものをピンで繋ぐ使い方をしました。図 1 は、そのように作られた典型的な鉄の吊橋です。塔柱と橋門構が鑄鉄製、ケーブルは鍛造の棒をピンで繋いで構成してあります。鑄鉄で作成する桁は物騒な代物です。イギリスの鉄道橋では、今の交通事故並みに折損による落橋事故が頻発しましたので、鑄鉄を主要材料として橋を建設することを禁止する安全基準が制定されました。これが鉄橋時代から鋼橋時代への切り替わりです。日本に橋の技術が導入されたのは、鋼橋時代になった以降です。なお、東京隅田川に架かる吊橋形式の清洲橋は、マラパネ吊橋と同じ形式です。ドイツにあった橋を真似たデザインです。ケーブル部分の寸法の引張り材には、穴あけで繋ぐ、軍用であった高強度のデュコール鋼で、チェーン構造を採用しました。



図1. ポーランドにのマラパネ(Malapane)吊橋、1827 年建設で現存(筆者撮影)

1.3 鋳鋼は簡易な支承に使われる

小支間の橋梁で標準的に使用される支承沓(くつ、またはシュー:bearing shoe)は、図2に見るような鋳鋼製品です。愛称的に「亀の子シュー」と呼ばれます。鉄道橋で主に利用され、道路橋でも使います。その円柱面と、切り欠け部分を持ったソールプレートとで、回転を許す接触と同時に滑りを許します。切り欠き部の寸法を変え、4種類の支点条件に対応できます(図3)。鋳鋼製品は錆び難く、摩擦係数も小さいのが特徴です。当初、下シューの下面は平らでした。地震の無いアメリカからの技術輸入だったからです。関東大震災の時、ボルトを切って桁が水平に大きく移動した経験を踏まえ、地震や横から自動車などの衝突で簡単に移動しないように、十字形の歯型を底面に付けるようになりました(図4)。日本独特の構造と言えます。

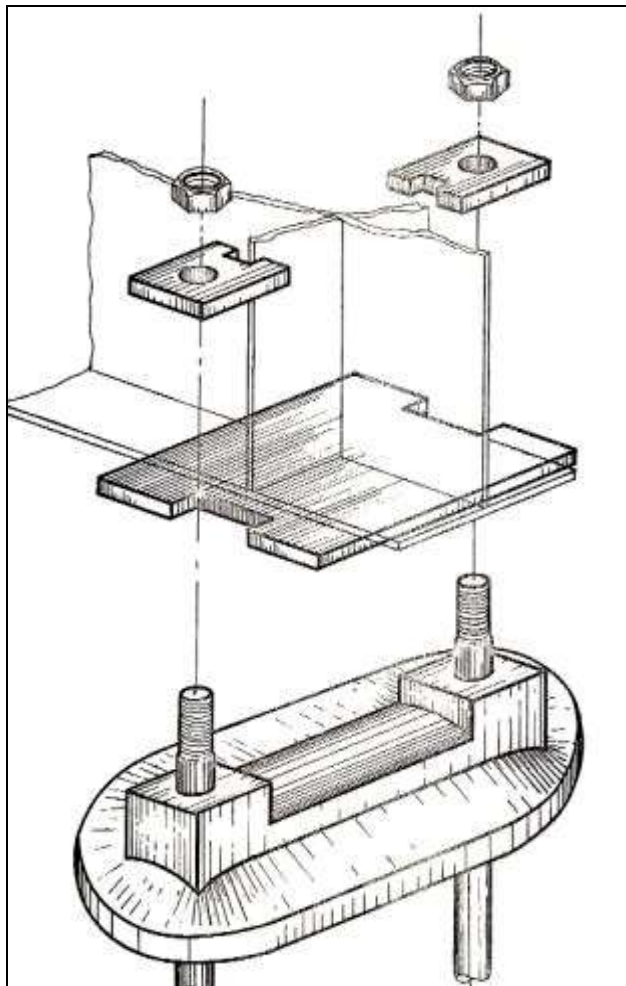


図2. 鋳鋼製の、亀の子シュー(愛称)

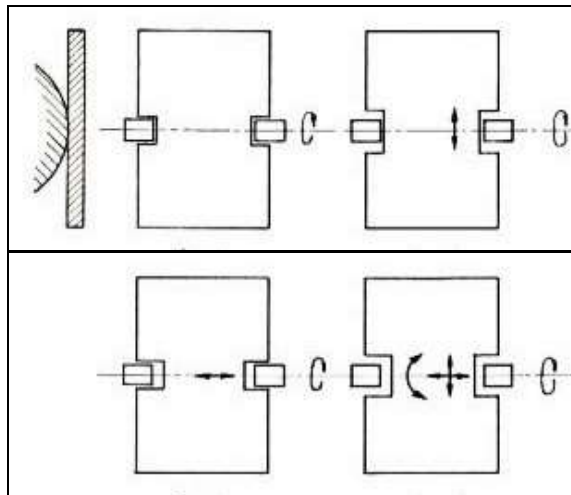


図3. 桁の回転と移動とを許す
ソールプレートの切り欠き

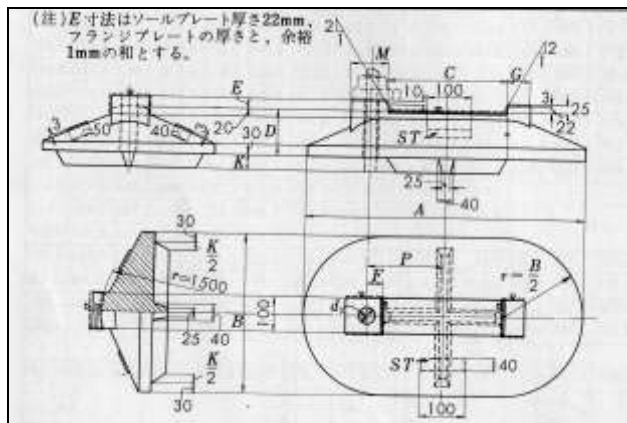


図4. シュー下面の十字型突起(参考)

1.4 鋼材も種類が多いこと

通常の鋼材は、冶金学的には純鉄と他の材料との合金です。成分によって種々の顔を持ちます。強度に関しては、特に炭素との相性が強いので、鋼と言えば炭素鋼を指します。炭素以外の成分を加えたものをまとめて**合金鋼**と言います。全体の成分を炭素の量に換算した**炭素当量**(carbon equivalent)で鋼の性質を判断する指標にします。加工性がよく、使い易い鋼材を普通鋼、または軟鋼と言ひ、炭素量は約 0.3%です。これよりも炭素量が多いと、強度は上がりますが加工性も悪くなります。構造用として利用する鋼材は、大体において炭素当量にして、0.5%止まりの材料が使われます。強度は、重量トンで約 4tf/cm^2 です。加工性が良いというのは、工場での製作に溶接ができて、曲げ変形による加工をしても、強度の低下の心配が少ないことを意味します。強度の高い鋼材を使えば経済的な橋梁ができると速断し易いのですが、強度が高ければ工場での溶接や加工が簡単にはできなくなるマイナス効果も大きくなります。実用される高強度鋼の強度は、軟鋼の約 2 倍、 8tf/cm^2 までです。PC 構造に使うピアノ線、また吊橋のケーブル素線の強度は 3~4 倍の強度で製作されています。赤熱して加工ができるのは軟鋼です。そして、この特性を利用して鋼板を綴じ合わせて部材に構成する方法として**熱間成形リベット**が利用されていました。古い鉄道の駅舎では、レールを熱して曲げ、リベット止めをした骨組みを見ることができます。工場設備が無い現場でも、曲げ加工や穴開けができますが、高張力鋼材では無理です。

1.5 アルミ合金の橋梁

主要材料に鋼材以外を使う橋梁の工夫の中で、**アルミ合金**の橋も建設された例があります。比重が鉄の約 1/3、ヤング率も約 1/3 ですので、死荷重分の応力度を下げるができます。建築材での利用が増えています。高強度のアルミ合金の強度は鋼とほぼほぼですので、主に航空機体の製作に使われます。橋梁での利用は、まだ価格の面で合いません。また、鋼材と接触する環境で併用すると、イオン化傾向の高いアルミ部分が腐食する欠点があります。アルミ構造の組み立てには、常温でのリベット接合も多用されています。設計の考え方は、鋼のリベット構造と原理的に同じです。日本のアルミ合金製の唯一の橋梁は金慶橋(1961)です。芦屋市と神戸市有馬温泉を繋ぐ芦有ドライブウェイ(株)にあります。当時の社長名の金井慶三郎を引いた橋名です。2017 年土木学会選奨土木遺産に選定されました。

1.6 鉄筋コンクリートの鉄筋は摩擦力で留める

鉄筋コンクリート構造に使われる鉄筋は、引張り応力状態になるような形状と配置を考えた設計が工夫されています。桁構造の力学設計では、プラットラスモデルが応用されています。引張り鉄筋は、下弦材、コンクリート部分は上弦材として圧縮力を持たせる構造です。全体構造は、鉄筋を籠状に組み上げます。中にコンクリートを詰める構造です。桁表面は、塗装も兼ねて、鉄筋の腐食を防ぐコンクリートのかぶり部分を持たせます。トラスの垂直材に相当するスターラップ、下弦材として鉄筋は曲げ上げて、圧縮材であるコンクリートの中に材端を埋め込む形で固定します。鉄筋端部はフック状に曲げて、簡単に引き抜けないようにしますが、特別な部品は使いません。真っ直ぐのまま使う場合には、付着に必要な長さとして、標準的には鉄筋径の 20 倍を見込み、鉄筋表面とコンクリート間との摩擦で鉄筋の引張り力を吸収させます。異形鉄筋は、コンクリートとの付着をよくするように丸鉄筋の表面に凹凸を付けた製品です。

1.7 PC ケーブル材に使う素線も摩擦力で留める

プレストレストコンクリート構造(PC 構造)は、強度の高い鋼線、通称で言う**ピアノ線**を使ってコンクリート全体を圧縮状態にすることで、力学的に効率の高い部材の設計ができます。部材全体は、普通鉄筋で籠状に構成し、圧縮されるコンクリートの破壊を抑えます。ピアノ線が伝える引張り力が大きいので、素線端は、**ソケット**構造で留めます。**フレシネー工法**では、12 本程度のピアノ線のケーブルを使います。素線を部材端で放射状にほぐし、円錐面を持った雌コーンと雄コーンとの間に挟みます。雌コーンはコンクリート打ち込みの際に埋め込まれます。ピアノ線を引っ張る装置は水圧ポンプです。その時に雄コーンを押し込んで摩擦力で素線を留め、さらにセメント材を注入(グラウト:grout)します。吊橋・斜張橋もケーブルを使います。素線の本数を多く使い、PC 構造で使うピアノ線と同程度の高強度材です。これもケーブル端で円錐状の内面を持ったソケットにほぐして入れ、**亜鉛合金**を溶かし込んで摩擦力で留め、このソケットで桁を支えます。

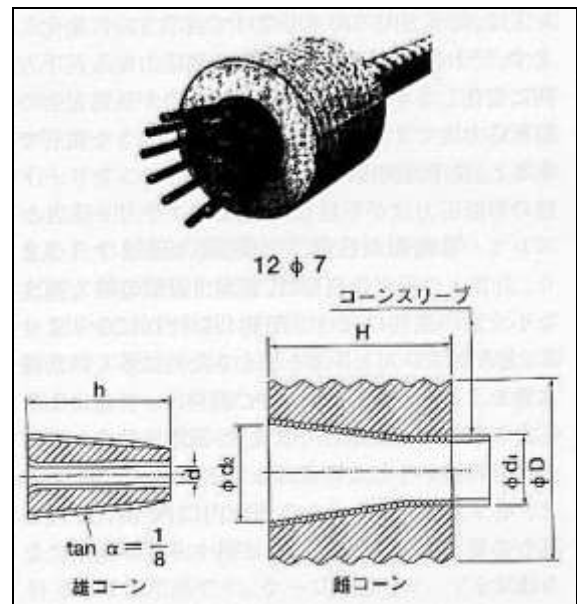


図5. フレシネー工法で採用されているソケット

1.8 エレベータの電動化はオーチスに始まる

自由に曲げて利用できる引張り材は**ワイヤーロープ**(wire rope)です。**ワイヤーケーブル**(wire cable)とも言います。後者の方は長さの長いロープの意義があります。鋼線を縄状に縀(よ)り、エレベータを電動化したのは、1859 年アメリカの**オーチス社**(創業 1853)です。それまでのエレベータは、水圧式のポンプと巨大な歯車構造を組み合わせ、籠状の乗り物を押し上げる構造でした。パリのエッフェル塔(1889)の最下層の斜めの橋脚には、水圧式のエレベータが設置されています。高層ビルは、ワイヤーケーブルを使う電動のエレベータの利用ができるようになってからです。1889 年以降に建設ラッシュが始まりました。日本では、東京製鋼株式会社が 1897 年からワイヤーロープの製作を始めました。長らく世界一高い超高層ビルであったエンパイアステートビルは、1929 年完成です。ワイヤーロープを使う吊橋や斜張橋では、ケーブル長さの精度を保ち、クリープなどの変形を抑えるため、縀りの甘いケーブルを使います。長大吊橋は、平行線のまま束ねる使い方をします。その最初の吊橋が、ジョン・ローブリングの設計によるニューヨークのブルックリン吊橋、1883 年です。

2. リベット構造

2.1 力の伝え方

2.1.1 剪断を受けるように設計すること

リベットは、主として、鋼板(鉄)を重ねて綴じあわせるように使います。リベット継手は、鉄に穴を開け、そこに棒状のリベットを差し込み、鉄の部材力を鉄と平行なリベット断面の剪断力に直して伝えます。リベットが穴から抜けないようにするため、リベットの両端に頭部を成形しますが、これはリベット径に見合った引張り力に抵抗する目的には期待できませんし、そのような力に対する設計も許していません。ボルトの方は、締め付けに使う軸力に期待した使い方をしますので、力学原理が全く異なります。そのため、リベットをボルト並みに軸力に耐えると期待した使い方をすると、頭部が飛んで、綴じた鉄材がめくれ上がるような破壊が起こり、現象としてはかなり深刻な事故を招きます。19 世紀の産業革命では、動力源には蒸気機関が使われていました。高圧蒸気の供給にはリベット造りのボイラーが必要ですが、これが非常に危険な装置であって、少なからず悲惨な爆発事故を起こしました。そのため、ボイラー用の鋼材は最も厳しい規格になっていました。ボイラーの構造では、圧力に耐えるようなリベット止めをボルトの感覚で構成すると事故になります。丸いパイプ状、または球面状に構成すると、内圧は桶のタガのように円周向きの張力で持たせられますので、この力をリベット継手に剪断力として作用するように変えて綴じ合わせます。

2.1.2 リベット継手の強度は三つの視点がある

リベット継手の設計法は、どのような破壊を示すかの現象を観察して構成したものです。鉄素材を長手方向に繋ぎたいとき、引張り力に対して設計する注意が優先します。一枚もの簡単な鉄材では直接の**重ね継手**も使いますが、力が鉄厚方向で非対称に流れますので、**添接材**を介しての対称な接続が標準です。これは、力学的にみれば、繋ぎたい鉄の鉄厚半分ごとに重ね継手になっています(図-6a)。前者の重ね継手の原理を**単剪断**(single shear)、後者を**複剪断**(double shear)と言います。力学的な構造は、穴を開けた鉄に丸い棒を差し込んで鉄の**ズレ**を止めます。強度の検査は三通りの応力度で行います。①鉄に穴を開けますので、鉄の純断面積が部材軸力を伝える強度以上あることを確認します(図6-c)。②リベットに作用する力は、部材力をリベット本数で割った等分の力を持たせると仮定します。この力は、③リベット断面に対剪断応力度(図6-a)、鉄に対しては穴の内面に作用する支圧応力度(図6-b)として、それぞれの許容応力度以内に納めるように設計します。このとき、綴じたい鉄厚と釣合いの取れたリベット径にする必要があります。鋼橋では **22 ミリ**のリベット径が標準です。建築鉄骨では相対的に薄い鉄板を使いますので 19 ミリも用いられます。異なる軸長のリベット増えないよう、また、作業性から、径の異なるリベットの混用を避けます

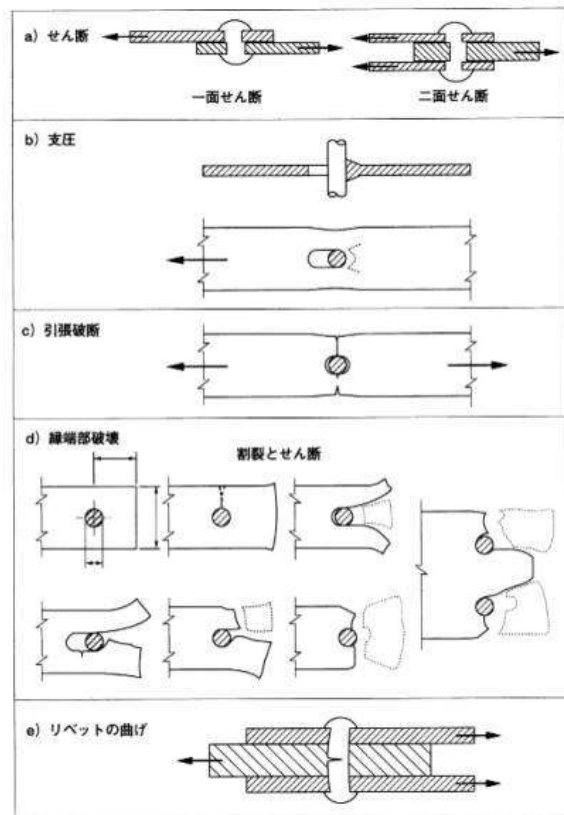


図6 リベットおよび鉄の破壊形式

2.1.3 リベット値として設計計算に応用する

リベットの本数を計算するには、リベット一本当たりの強度を求めておきます。これを**リベット値**または**鉄値**と言います。鉄に空ける穴の寸法とリベット材の径とは異なるのですが、リベット材の呼び径の方で計算します。リベット一本当たりの設計強度は、鉄厚の小さい範囲では鉄材の方の**支圧強**(図6-b)で決まり、ある鉄厚以上ではリベット材の**剪断強**(図6-a)で決まります。後者の場合には、剪断面が一つ(単剪断)と二つ(複剪断)とがあり、複剪断の方が継手としての効率が 2 倍になります。リベット時代の鋼橋の設計データブックには、母材とリベット材の許容応力度を元に、鉄厚に応じたリベット値の表が付いていて、これを設計計算で参照するのが常識でした。大体的見当を付けるとき、リベット一本当たり、**剪断強**の最大値は、単剪断で4トン、複剪断で8トンと見積もりました。繋ぎたい鉄に関しては、リベットを打つために穴を開けるのですが、穴の空け方について細部設計上の細かな注意事項があります。

2.2 リベット群の幾何学的並び

2.2.1 リベットの最大間隔と最小間隔

力を伝えることが目的ではなく、二枚以上の板を一体にする綴じの目的に使うリベットを含め、リベットは、幾何学的な**最大間隔**と**最小間隔**内に入るように配置します。リベットの位置は、図面では円断面の中心を指定しますので、穴の縁からの実効の間隔に注意します。板に開ける穴は、22 ミリのリベット径よりも 3 ミリ大きい 25 ミリ径で空けます。二つの穴の中心で測った最大間隔は 150 ミリ、最小間隔は 100 ミリが標準です。そうすると、隣りあう穴の縁の純最小間隔は 75 ミリです。最小間隔の方は、ミシン目で紙を破くような破壊が起きないようにすることと、リベット打の際、頭部の成形に使うジグ(jig, 治具: スナップと言います)が、隣りあうリベットの頭部や周辺の部材に当たらないような逃げを確保する条件を考えます。リベットの打ち込み側と抑え側とは、軸方向にジグが入るだけの空間が必要です。これは大体的見当として 30cm です。

2.2.2 最大縁端距離と最小縁端距離

板を綴じあわせるとき、板の縁がめくれないように、縁に添わせてリベットを打ちます。縁から離す最大距離はリベットの中心で測って、150 ミリを超えないようにします。**最小縁端距離**は、大体的見当として 30 ミリ前後ですが、板の力の作用軸方向に引っ張られる端部では 37 ミリ程度を持たせ、剪断で穴の幅分の縁が抜け落ちないように注意します(図6-d参照)。

2.2.3 引張り継手の穴配置の設計

穴を開けた板は、ミシン目を入れたような状態になりますので、引張り応力の場合では、穴がある分だけ板の純断面積が減ることを見込みます。リベット径に 22 ミリを利用する場合には、工作上、板は 25 ミリで穴を開けますので、75%の純断面を残すためには、並列するリベット列の横間隔は 100 ミリ以上が必要です。引張り応力に直交する断面に穴が並ぶと、穴を伝って最小断面で破断しますので、千鳥にリベットを配置して穴の集中を避け、また継手全体の寸法を小さくまとめます。実用計算方法は、以前、鋼橋の設計基準に載っていました。

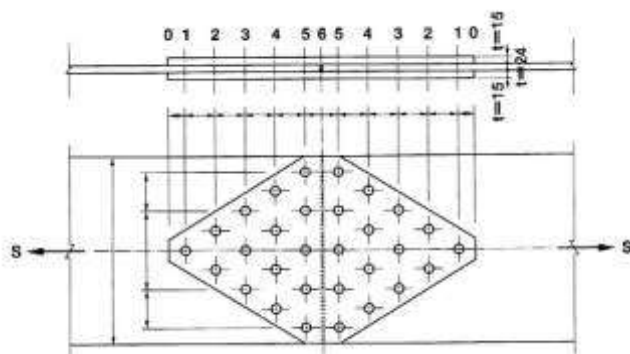


図7 有効断面の減少を抑えるようにした引張り継手のモデル

圧縮力を受ける継手では、継ぎたい板同士の接触で力が伝わる(メタルタッチ)が期待できますので、特に千鳥の配列にはしません。リベットやボルトの継手を外から観察して、その配置が千鳥になっていれば、その場所が引張り応力の場合で設計したことが分かります(図 7.1、表 1)。

2.2.4 引張り継手のリベット列

図7は、引張り力を受ける板で、リベット穴を開けることで純断面積が減少することを最小限に抑えるようにした、説明用の継手の図です。軸力に直角方向のリベット列は、5列です。一列当たりの本数は1本から始まって順に増やします。全部で 15 本のリベットは等分に力を伝えるとします。第1列は一つのリベット穴分を引いた純断面で板の応力を計算しますので、5%の応力度増加になります。第2列では、二つのリベット穴分を控除するのですが、部材力が 14/15 に減少しますので、母材純断面での応力度の増加を2%に抑えることができます。同じように3列目ではリベット穴が三つ空きますが、部材力は 12/15 に下がります。このようにして、リベットを介して添接材に部材力を伝えて行くようにすると、リベット穴の控除の影響を最小限にすることができます。一方、2枚の添接材の合計板厚は、リベット穴を5個控除した断面積でも部材力を伝えるだけ十分な寸法にします。この計算をまとめたものが表1です。

表 1 引張り材の純断面における応力度(断面1で5%の増加で納まった例)図 7 参照

断面番号	6	5	4	3	2	1	0
母材の伝達力 ($\times S$)	0	0.33	0.6	0.8	0.93	1	1
純断面の母材応力度 ($\times \sigma$)	0	0.43	0.74	0.93	1.02	1.05	1
添接板伝達力 ($\times S$)	1	0.67	0.4	0.2	0.07	0	0

2.2.5 千鳥にリベットを並べるとき

山形鋼の脚部のような狭い場所に、なるべくリベットの本数を多く納める方法として、千鳥にリベットを並べる配置も使います。この方法は、一列に並べるリベット間隔を 150 ミリにして、リベット列間隔を 75 ミリ程度に狭めて、全体を千鳥に並べます。こうすると、部材力と直角方向にリベット穴が集中しませんので、引張り力を受ける部材の添接で利用されます(図7)。部材の軸力と直角方向の断面にリベット穴を並べるとき、ミシン目で紙を破くように、穴を伝わって部材が破断します。しかし、千鳥のように穴の位置を前後にズラしてあると、強度の低下が少なくなります。これは斜め後ろにあるリベット穴が、全部ではなく、何割か小さく影響すると考えます。設計実務では、実験結果を元にした実用式が提案されています。ただし、表1ではこれを考慮しないで計算してあります。

2.2.6 一列当たりの最大本数と最小本数

二枚の鉄を、力を伝える目的で綴じるとき、力の作用線に沿って複数のリベット列を並べます。リベット一本当たりのリベット値が計算できますので、一列当たりの所要リベット本数が計算できます。しかし、一列当たりの本数を多く使ったとしても、端にあるリベットが最も大きな力を受けます。そのため、一列のリベット力の分担を効率的にするため、一列当たりのリベット数を 2 本以上 6 本以下にします。単剪よりも複剪で継手を設計すると本数が半分で済みますので、**添接鉄**二枚で鉄を挟むような継手で設計するのが望ましいのです。なお、添接鉄のことを俗に**目鉄**とも言います。

2.2.7 継手全体としての最小本数

リベットの使用本数と配置を決めるときの考え方は二つあります。部材に作用している力を伝えることを目的とする場合と、部材の**全強**に見合った数を使う場合です。全強とは、純断面積に許容応力度を掛けた力です。鉄桁(プレートガーダー)では、リベット群として曲げと剪断とに抵抗させるように設計します。そうすると、フランジ部分は目一杯の応力が作用しますが、ウェブは応力の余裕が出ますので、全強に必要な本数よりも少なくなります。対傾構や水平構のような部材は、設計実応力が小さいので、部材断面の全強の、少なくとも 75% が伝えられるように本数を決めます。本数を必要としなくても、最小本数として 3 本使います。

2.3 リベット群としての設計

2.3.1 全体構造に組み上げるときの注意

リベット継手全体の強度は、繋ぎたい元の部材の強度よりも下がります。弾性範囲での応力解析の問題としては穴の空いた鉄の二次元応力状態などを扱います。しかし、実際の継手が最終的に破壊するときは、材料が塑性域に入り、応力の再配分が行われます。単純に引張り力を受けるときは全本数のリベットが一定の力を受けます。したがって、リベットの幾何学的な配置を対称にし、部材の重心とリベット群の重心とを、なるべく一致させます。アングル(山形鋼)やチャンネル(溝型鋼)の接続では、重心位置がずれますので、継手の箇所でも局部的に曲げを受けます。アングルやチャンネルは、なるべく対に使ってこの局部的な曲げを打ち消すように使います。リベット群を全体構造的に観察すると、力の伝達で不都合になることも起こります。リベットは剪断力が作用するように使う必要があります。リベット軸方向に引っ張られるような使い方をしてはなりません。図8にまとめたものは、これらの注意事項を説明するための図です。

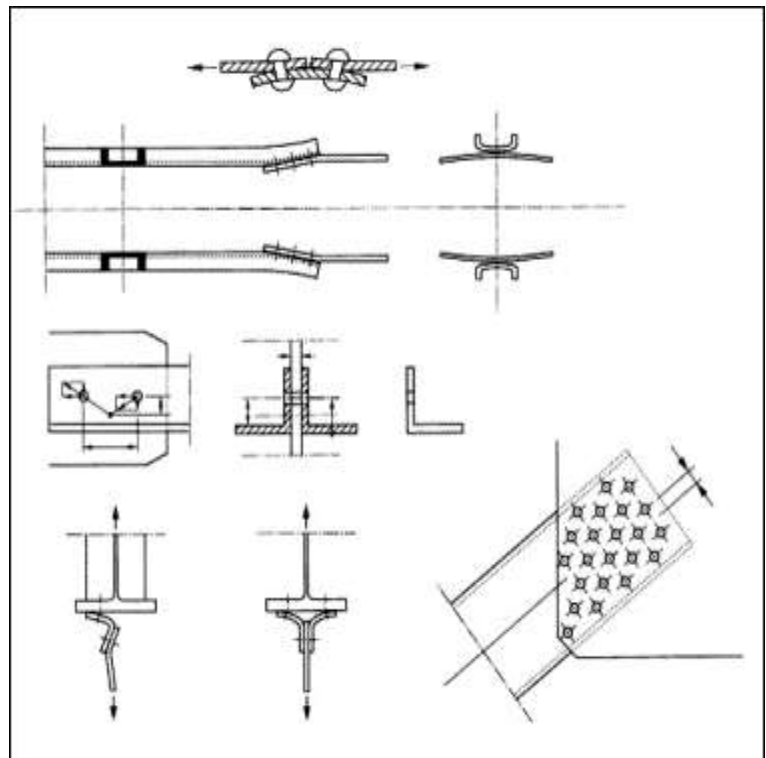


図8. 偏心または曲げを受ける
リベット群の配置を避ける

2.3.2 直接継手と間接継手

接続させたい二枚の鋼板を直接重ねてリベットで繋いで引張り力を加えると、リベット群が板の接触面で弾性的な剪断変形をすることが予想されます。継手の箇所に添接板を使い、力を添接板に移して接続させると、剪断変形を生じる面が二面になりますので、この変形は二倍になります。重ね継手を**直接継手**とするなら、これに対して添接板を使う継手は**間接継手**になっています。重ね継手で、二枚の板の間に板を挟むとき、その板を**填材**と言いますが、これも剪断変形を生じる面が二面になりますので、間接継手になります。填材を二枚挟めば剪断面が三面になります。この面数の差を間接度の段数と言います。直接継手と間接継手とを一緒に使うと、伝える力のバランスが崩れ、力は直接継手の方に集中します。この偏りを防ぐための実用的な解決は、間接側で必要とするリベットの本数を、一段の間接に対して 50%増しにして剛度を増します。

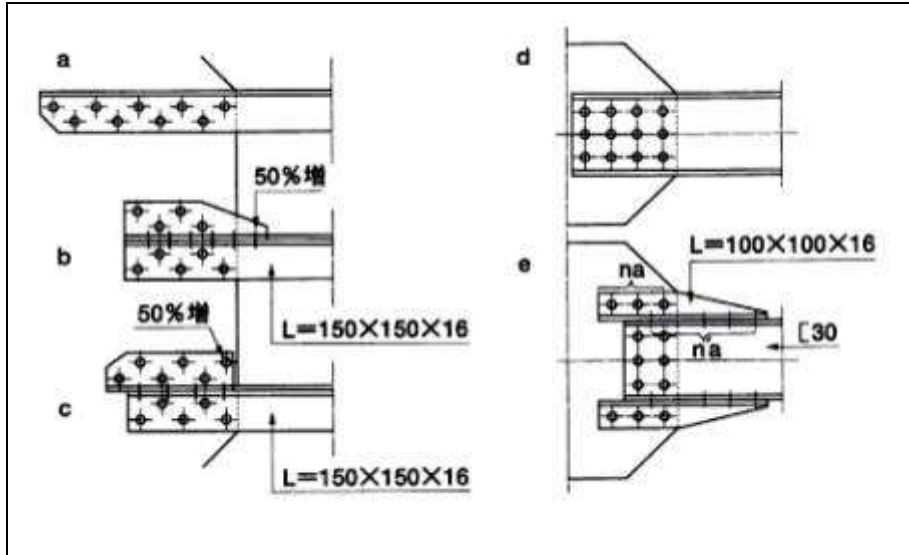


図9 直接継手と間接継手が組み合わさった例

間接継手が比較的目に触れるのは、アングル(山形鋼)やチャンネル(溝形鋼)をガセットプレート繋ぐときです。例えば、山形鋼は直交する二つの板面がありますので、一つの板面だけでガセットプレート繋ぐと、一列のリベット本数が増えてしまいます。そこで、一列のリベット本数を減らすため、それと直交している直立した板面を一旦添接用の山形鋼で受けて、間接的にガセットプレートに繋がります。つまりこの直立した板面を間接継手で繋がります。このとき、添接に使う山形鋼のリベット本数は、一方を 50%増しにします。この例を図9に示しますが、この設計の意義が理解できれば、一級の技術者です。また、構造物のリベット継手を見れば、丁寧な設計であるかどうか分かります。

2.4 リベット作業の流れ

リベット材は、軟鋼製の 22 ミリの棒鋼から頭部を熱加工して所定の長さに造った生リベットで準備します。生リベットを赤熱し、部材に空けたリベット穴に通し、材料が軟らかい間に反対側の頭部を成形します。このとき、リベット穴全体をリベット材が隙間なく埋め、また、リベットが冷えて収縮することで、しっかりと綴じあわせができます。原理的には単純ですが、部材に穴をあけ、綴じる処理で変形も入り、長い部材では元の寸法より伸びたりしますので、作業の経験的な知識も重要です。工場での部材組み立て作業には油圧を使う鋲締め機を使い、板材全体も圧着させることができます。現場は作業条件が悪くなりますので、空気圧を使う**鉄砲**などを使って頭部だけを成形します。これが騒音公害として嫌われました。したがって、リベットの設計強度は、**工場リベット**と**現場リベット**とを区別しました。1960 年頃から、リベットに代えてボルトを使うようになり、現在では現場での部材の接合は殆どがボルト継手です。稀に溶接も現場で利用されています。最初からボルトを使えば良さそうに思うでしょうが、穴を隙間なく塞ぎ、緩みが起きない綴じの目的にはリベットが勝っています。ボルトは、ボルト軸と穴との接触を原理的には考えません。

3. リベットから高力ボルトへの移行

3.1 ボルトの合理的な使い方

古くからある和語の縄(なは)と綱(つな)は、繊維を縊(よ:漢語)り合わせて、引張り用材としての使い方が標準です。金属材料を使うロープも、或る程度、自由に曲げることができる部材です。二つの離れた位置にある部品を離れないように引張り力で繋ぐ使い方をします。一方、ボルト(雌ネジ:bolt)とネジ(雄ネジ:screw)とは、ネジが切られた棒状の部材です。欧米から学んだ部品ですので、カタカナ用語で使います。ただし、ネジは、日本語に捩じるがありますので、英語の screw の意義で使います。漢語は螺子と書き、ネジと訓読みで使います。ボルトは、頭の部分とナットとの組みで二つの部材を押し付けて繋ぎます。鋼橋で利用してきたリベットに代えて、外見がほぼ同じボルトを利用するようになりました。ボルト群全体を均一な締め付け力にするため、トルクレンチが使われ、締め付けの順序に基準を決めて作業に当たります。橋梁本体の鋼材も、許容応力が軟鋼よりも大きくなりましたので、リベットでは継手強度が不足するようになりました。大きな圧着力が得られるボルトが必要です。これを高張力ボルトまたは高力ボルトと言います。生の材料の引張り強度は、構造用普通鋼の2~3倍あります。ネジを切る加工をしたうえで、熱処理、つまり焼き入れをして強度を高めることもできます。強度の高い材料を使いたくなるには人情ですが、しかし、強度を上げると、脆(もろ)くなりますので、ポッキリ折れる破断の危険が増します。機械部品で、疲労や衝撃などの動的な環境で使いたいとき、この脆さが多くの問題を起こします。結論から言うと、ボルトそしてネジも、相対的に見て、なるべく細長い部材に製作します。軸長が短いと、動的な環境に在ると、耐久性が悪くなります。適度な弾性的な伸び代(のびしろ)がないと、締め付けの力は、僅かな軸長の変化でも、緩むか、破断するか、予測のできない大きな力の変化が起きます。ワッシャーを挟む使い方は、これを解決する一つの方法です。

3.2 ボルトを使うときの締め付け力の計算

鋼橋は、工場での溶接で部材が製作されますが、現場架設は、鋸を綴じる部材にリベットに代えてボルトを使うようになりました。熱間成型リベットでは、継手の強度を上げることができないからです。ボルトを使って間接的に鋸の内力を伝える原理は、綴じ合わせる盤面間の摩擦力です。高張力ボルトは、その摩擦力が利用できるように、圧縮力を作用させます。這りが生じる強度は、摩擦角で決まり、常識的には圧着力の30%です。設計強度は、安全係数として、更に、2程度を見込みます。原理的には、ボルトは、孔の内面に接触していないと仮定します。この全体を高張力ボルト摩擦接合継手と言います。この継手の強度試験をすると、或る強度で静止摩擦が切れて、鋸がズレて、ボルト軸と孔面とが接触する支圧状態に移ります。この瞬間に大きな音が出ますので、この時の荷重をボン荷重と言うことがあります。改めて、リベット構造と同じ原理の強度が残りますので、信頼性の高い継手構造です。

3.3 ボルトの実用的な締め付け力

鋼橋の継手に使うボルトの径は、リベット径を踏襲して22mmですが、有効な軸長は、5cm程度ですので相対的に見れば伸び代の小さい材料です。橋梁は、想像している以上に動的な環境にあります。強度を高めた軸長の短い高張力ボルト群は、全体を均一な締め付け力状態に管理することが難しくなります。突然脆性破断するボルトがあって脱落し、ボルト穴が残る事故が頻発しました。これを遅れ破壊と言います。この対策は、弾力的な伸びに余裕が残るように、ボルトの高張力強度を抑えた材料を使います。生のボルト材料の強度は、母材の鋸の強度に2倍程度に抑えます。吊橋のケーブルのように、長い素線で使う場合には、3~4倍に強度を上げた材料が利用できます。

3.4 ボルト一本当たりの設計耐力

リベット継手の設計をするとき、リベット用鋼材の強度ではなく一本当たり何トンまでの力で計算するかの数値をリベット値と言います。継手構造として力の伝え方の原理はリベットとボルトとは違います。設計計算上は、リベット値と同じようにボルト一本当たりの設計耐力を使って継手強度の計算をします。力の伝え方を区別する用語があります。リベットの力学では、リベットの方に視線を向けた単剪断・複剪断の区別をします。摩擦継手では鋸の方に注目して一面剪断・二面剪断の用語区別があります。リベット値の場合には、鋸の重ね方との関連で剪断強・支圧強のどちらで耐力が決まるかが面倒です。高力ボルトではこの区別がありませんので、計算が単純になります。ボルトの幾何学的な配置などの細部設計の方法は、リベット継手の方法をそのまま応用します。したがって、リベット構造の設計知識は必須です。

4. 溶接構造

4.1 溶接で使う専門用語

4.1.1 隅肉溶接と突き合わせ溶接を理解する

二つの金属材料を接合する方法には種々の種類があります。ここでの説明は鋼構造物に使う鋼材の冶金(やきん)学的な溶接に限定します。繋ぎたい個所に別の鋼材を溶かし込んで一体化し、あたかも最初から連続した構造の性質が得られるように製作したいのです。しかし、いつもそうはできませんので、溶接の知識が必要です。この知識は、大別して二つです。一つは溶接作業と関係し、もう一つは設計を考えるときです。

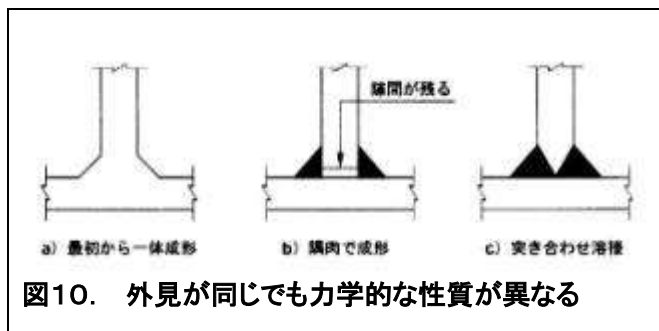


図10. 外見が同じでも力学的な性質が異なる

溶接では材料を溶かすという冶金学的な処理があり、高熱が必要です。その熱源として二つあります。一つがガスの炎を使う**ガス溶接**、二つ目が電気の火花を飛ばす**アーク溶接**です。充填材料は溶接棒または線材として供給されます。初期のアーク溶接は、炭素棒を電極として母材との間にアークを飛ばし、その熱で別の溶着材料を添えるようにして溶かしましたが、現在では溶接棒自身を電極にします。力学的には、溶接の形態を、大別して**隅肉溶接**(すみにく: fillet welding)と**突き合わせ溶接**(butt welding)とに分けます。見掛けが同じでも力学的な性質が違います。突合せ溶接は、部材を一体化させる溶接ですので、設計計算の必要性はありません。ただし、溶接で追加される材料は、母材の強度よりも高くなるような注意が払われます。

4.1.2 隅肉溶接とはヒレ肉溶接の意味

日本語の環境で隅肉と言う用語は直感的に分かりませんが、英語の fillet を意識したものです。fillet は、日本語でヒレ肉と呼び、ヒレカツなど使われていますが、大多数の日本人はヒレ肉がどの部位の肉を意味するのかわかりません。しかし、これは英語環境の職人の用語です。彼らにとって fillet は食生活と密着した用語として理解されています。ヒレ肉とは、牛や豚を解体して肉を切り分けるとき、背骨を中心として左右にある良質の骨なし肉の意味です。この部分はさらに細かな部分名称が使われていて、サーロインは上等のステーキ用肉の名称です。ヒレ肉部分とは、日本人の感覚で言うと、魚を三枚におろしたときの切り身で、背中側に近い部分に相当し、英語でもこの部分を fillet と言います。この肉部分は、牛、豚、魚の胴体を輪切りにして見れば、隅肉溶接と似た構造であることが理解できると思います。ヒレ肉と魚の鰭(ヒレ)とは全く関係がありません。隅肉溶接の断面が三角形に近いので、三角形の魚のヒレと誤解することもあるようです。

4.1.3 突き合わせ溶接も牧畜用語から

牛や羊が喧嘩をするときは、頭突きで攻撃します。この用語が butt です。日本語の訳語では、頭突きの意義を改めて強調しなくても理解できます。技術に関する専門用語には、現場の職人さんが使う用語を利用したものが多くあります。外国語の場合も同じですが、これを日本語に訳すときに、対応する言葉が無いことも少なくありません。日本に技術を輸入するとき、ハイカラぶったカタカナ用語を使ったり、無理な漢語を当てたりすることも少なくありません。現場で使う技術用語は、職人さんが耳で聞いて分かるような訓読みの言葉が勝ります。

4.1.4 開先

この用語も不思議な造語であって、重箱読みにして「かいさき」と言います。元の英語は溝の意味を持った groove です。突き合わせ溶接は、接続したい断面全体を溶けた鋼材で繋ぐため、溶けた材料を流し込む場所を、樋、または溝のように加工します。繋ぎたい場所で、鋸の端が構成する溝の形を**開先**と言います。この端の、鋸厚方向の断面形状によって、I 形、V 形、X 形、U 形、レ形、K 形、J 形、などの区別があります。どの形状に加工するかは、製作現場の溶接担当者の裁量に任せられ、設計段階で指示を出すことは、しません。隅肉溶接は、接続させたい部材の接続面の角度を 90 度にして溝の代わりとし、開先の加工をしない溶接です。溶接作業では、材料が溶けて部分的に高温になりますので、冷えて固まる過程で種々の影響が出ます。第一が収縮による局所的な歪みが出ること、第二が冶金学的に材料が変化することです。前者は、溶接によって寸法が変化することも見込みます。後者は、分かり易く言えば部分的な焼き入れが起こり、その結果、部分的に脆くなって亀裂が出ることがあります。開先の形状選定は、この熱影響も勘案します。

4.1.5 空気との接触を避ける潜弧溶接

鉄は酸素と水分がある環境では直ぐに錆びます。空気中の酸素との化合は温度が高いほど早く進みます。鉄が溶けた状態になると、火花を出しながら酸素と反応し、溶着部の表面が傷みますので、溶接箇所を部分的に空気と遮断します。この方法に、空気以外の不活性ガス(炭酸ガス、アルゴンガスなど)の雰囲気を作る方法もありますが、鋼構造物の溶接作業には溶けた**スラグ**が溶着部分を覆う状態になる方法を使います。空気との遮断を実現させるため、溶接部分をスラグ材料の砂で覆い、これが部分的にアークの熱で溶けて溶接部分を覆うようにします。アークの電極が砂の中に埋め込まれ、火花が外から見えないことから、これを**潜弧溶接**(submerged arc welding)と言います。溶接作業を眼で見て確認できませんので、溶接電流を制御に使った**自動溶接**で行なわれ、手で作業するよりも格段に溶接の品質も作業性も上がります。この自動溶接装置を開発した会社名を付けて、ユニオンメルト溶接とも言います。溶接作業と言うと、青白い強烈な火花が出ることを想像しますが、これは手溶接の場合です。

4.2 溶接性の課題

4.2.1 溶接性という概念

理屈では簡単にできそうでも、いざ実行してみると困難な問題が多くあって、簡単には行かないことがあります。工業の製作作業においては、この難易さを表す用語を**作業性**(workability)と言います。もともと、この概念は日本語の環境には無かったものです。吉田徳次郎がアメリカで学んだコンクリート工学を日本に紹介したとき、和訳をあきらめてウオーカビリティーと呼びました。溶接の場合には weldability のような造語が使われ、「**溶接性**が良い・悪い」のように言います。日本語になじみ難いのは、この用語が定量的な実体を表すのではなく、感覚的・抽象的な概念を表しているからです。工業での製作では、芸術的な制作とは異なって「手が掛かり過ぎるか、強度などの要求性能に信頼性が低いか、費用が嵩むか」などのことをまとめて、作業性が悪いと言います。溶接構造では、溶接作業が実用の作業環境でできることと、溶接部の強度に信頼が置けることの全体を含めて溶接性が良いと言います。

4.2.2 溶接が効かない場合もあること

鉄であれば、鋳物から鋼材まで、何でも普通に溶接ができると考えると間違えます。これは鉄分子の結晶構造が温度によって異なることと、鉄と炭素との化合物であるセメントイトとの共晶の割合が材料によって違いがあるからです。つまり、結晶構成レベルでの接触の相性が、必ずしも良くないのです。また、成分の多少によって融点異なります。溶接によって強度が伝わるような接続を可能にするためには、接合面で相互に材料が部分的に溶けて、分子レベル、もしくは結晶レベルで交じり合う必要があります。一般的な傾向として、炭素の成分が少ない軟鋼は溶接が易しく、成分が多くなると材料の強度が上がると共に溶接が難しくなります。そのため、炭素の成分に代えて他の合金材料を加えて、溶接性を保証した材料の系列にSM材が規格化されています。例えば、鋳物は融点が高いので簡単に溶けますが、相手側材料の融点が高ければ、結果として溶接接合が成立しません。

4.2.3 溶接性の良い材料への要求

鉄鋼材料は種々の化学成分の割合と熱処理とで微妙に性質が変わります。特に、炭素の含有量の多少が、鋳鉄から軟鋼までの性質を幅広く支配します。軟鋼は炭素の含有量が 0.3%程度ですが、炭素の量を増やすと強度が高くなり、伸びも小さくなり、同時に**溶接性**が悪くなります。溶接性を高めるには、炭素成分の量を減らし、別の化学成分に置き換えることで鋼材の性質を改良します。他の化学成分を炭素の成分に換算した量が**炭素当量**です。

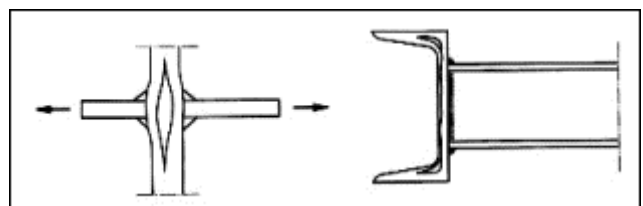


図11. ミクロに見て板厚方向に層状になっている圧延材料の溶接に注意すること

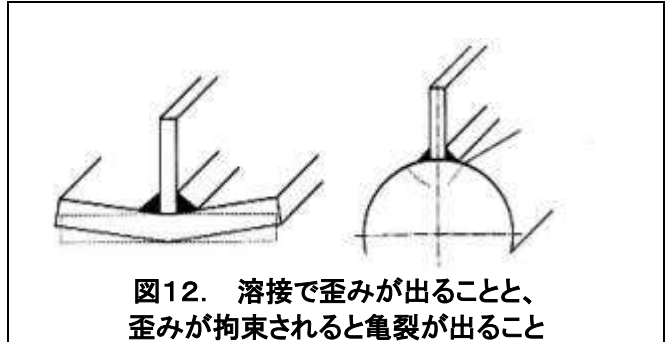
SM材は、強度が高く、伸びも充分大きく、溶接部分での強度が保証できる構造用圧延鋼材を指します。一般構造用圧延鋼材は**SS材**と言います。これは用途が広く、溶接性も悪くはないのですが、ミクロに材料を見ると、板の厚み方向に成分などの性質が一定ではありません。圧延された材料は表面の仕上がりがよいのですが、焼き煎餅のようなミクロの構造になり易く、板厚の中心で二枚に剥がれるような破壊が観察されることがあります(図11)。橋梁の構造設計では、例えば、桁の腹板を挟んで、引張り力を受ける横桁のフランジを突き合わせるように溶接する構造を避けます。

4.2.4 焼きが入らないようにすること

溶接ができると言っても、溶接は、部分的に鉄を溶かして材料を接続させますので、冷えるとその部分が収縮し、これが余分な変形や応力を発生させます。また、溶接箇所の温度が急に下がると、化学成分の種類と量次第では**焼き入れ**と同じ現象が起こり、部分的に硬く、また脆くなり、その結果溶接部分に亀裂が発生することがあります。刃物は、焼き入れをすることで硬度が上がります。これには二つの要素があって、焼き入れの効く材料を使うことと、熱処理です。炭素成分の少ない軟鋼は焼き入れに向きません。強度を高くしたい材料は炭素の成分を増やしますが、そうすると熱処理によって性質が変わります。溶接は注意深い熱管理が必要です。炭素当量が大きく、強度の高い鋼材の溶接では、溶けた鉄と、接合させたい部分との温度差を小さくさせるため、その部分全体を**余熱**します。その温度が 300℃以上になるようでは、実用的な作業性の面からみて、溶接性が無いことになります。

4.2.5 溶接による歪み

溶接は、部材の一部が溶けて固まり、その部分が収縮しますので、様々な影響が現れます。薄い板材は収縮によって**引きつれ**のような変形や曲げを受けます。プレートガーダーのフランジとウェブとを単純に隅肉溶接をすると、フランジ板が溶接歪みで山形に変形しますので、その変形を打ち消すように逆の山形に加工して溶接する、などの注意が払われます。高さの低い T 字形の形鋼を製造しておいて、これをフランジに使うと、この歪みに気をを使う必要がなくなります。



薄いウェブの片面に補剛材を溶接するとき、これを反対側から見ると腹板が波を打った様に変形することがあります。このようにになった現象を俗に「**やせ馬**」と言います。痩せた馬は肋骨が脇腹の部分に浮き出ることの類似でこう呼びます。湯タンポで表現することもあります。現物を殆ど見なくなりました。逆に、厚みの大きい板に部分的に溶接をすると、溶接部分の収縮に逃げ場がなくて、溶接部分やその周辺に亀裂が出ることもあります。部材の断面設計では、このような製作上のことを一通りの常識として弁えておき、広く溶接性と解釈します(図12)。

4.2.6 下向きの溶接作業にするための工夫

部材を溶接で組み上げるとき、鋼材料に溶接棒を使い、大電流の**アーク**(arc: 電弧)を飛ばし、その熱で溶接棒の先端から溶けた鉄を供給することで部材を一体化させます。溶けた鉄を定められた箇所に貯めるため、溶けた鉄を無理なく受けるような向きにして作業します。溶接は、溶けた鋼材を流し込む作業です。鋼材の溶接は、接続させたい鋼材で流し込む場所を樋の形(開先)に成形します。溶けた鋼材は直ぐに冷えますが、溶接作業が下向きになるように計画して溶けた鉄がこぼれないように溶着部を保ちます。そのため、部材全体を回転できる架台に載せて回転させる(図13)、などの方法が取られます。自動溶接は、長い溶接線に沿って連続的に行わせます。

現場では必ずしも溶接作業を工場溶接並みに理想化できませんので、特別な場合以外は現場での溶接作業を避けます。部材寸法が大きいときなど、工場であっても、いつも向きや場所を自由に換えられるとは限りませんので、自動溶接を補う**手溶接**で横向きや上向きの溶接作業が必要になります。このとき、溶接したい箇所を目で確認できて、手が入る最小限の作業空間を確保できるようにする注意が必要です。例えば、トラスの弦材は閉じた箱断面で設計するのが理想ですが、成形は箱の外側から板を溶接します。箱を閉じる前に、隔壁などの内側部材の取り付けを手溶接で補います。しかし部材連結箇所は、箱の内側に手が入るように開いた断面を工夫しないとボルトの締め付け作業ができません。



図13. 下向きの溶接作業に使う回転枠

4.3 隅肉溶接の力学

4.3.1 付き合わせ溶接は製作設計に属すること

任意の形状をした鋳部材が必要であるとき、製作の考え方が二つあります。一つは幅の広い大きな鋳から切り出すこと、もう一つは小さな鋳素材を突き合わせ溶接で繋ぎ合わせて一体化することです。後者の場合、溶接個所で強度が下がらなければ、どのような繋ぎ方をしても構いません。また、溶接した個所が目立たないように仕上げをして、あたかも大きな鋳から切り出したのと同じに扱うことも行なわれます。これは、材料を合理的に使う知恵ですので、製作現場での裁量に任せられます。つまり、突き合わせ溶接は構造設計の段階では強度の検証をしません。しかし、溶接個所の周辺では眼には見えなくても材料が乱されますので、なるべく溶接線が集中しないようにします。この問題に関して実践的な細かな注意事項がありますが、ここでは省きます。

4.3.2 隅肉溶接部は剪断応力で設計する

隅肉溶接は、溶接線に平行な面に剪断応力が作用するように使うのが基本です(図 14)。隅肉溶接は、直角三角形の直角を挟む二辺を介して母材に剪断応力で力を伝えます。この辺の長さを**脚長**と言い、設計図にはこの寸法を記入します。理論的には隅肉溶接部は直角三角形と仮定しますが、溶接作業は幾らか丸みを付けます。これを**余盛り**と言います。この余盛りの寸法を無視した最小断面で剪断応力が最大になりますので、この厚みを**喉厚**(のどあつ)と言い、ここでの剪断応力度が許容剪断応力度を超えないように脚長を決定します。

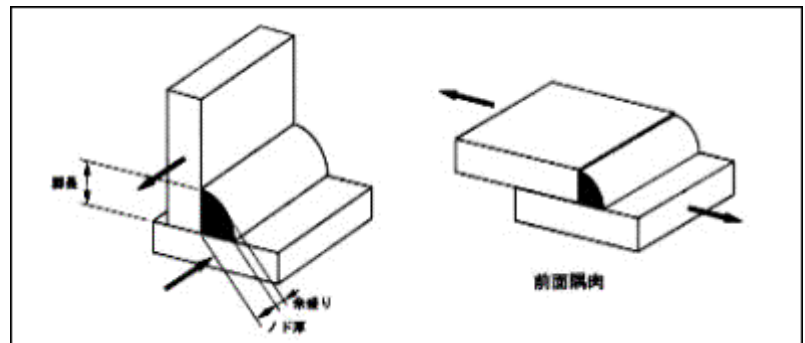


図 14. 隅肉溶接の力学モデル

プレートガーダーのウェブとフランジ部分の溶接に隅肉溶接を使うのが最も典型的な使い方です。一方、引張り力を受ける細長い鋳を溶接でガセットプレートに接続させるような設計をするとき、引張り力の方向と平行になる鋳の側面を隅肉溶接します。このとき、全体を一周するように、鋳の前面と、鋳の背面にも隅肉溶接をしますが、これを**前面隅肉**と言います(図 14b)。この場所では引張り力が隅肉部の剪断応力度として伝わるとします。応力度の性質は図4aの場合と異なりますが、計算上は、ここも最小断面の剪断応力度で検証します。この約束は、鋳の縁を一周する溶接線の全長に喉厚を掛けた断面積を使うので、鋳の引張り応力に抵抗させる剪断応力度の計算が簡単になります。

4.3.3 隅肉溶接は切り欠き部分を持つこと

隅肉溶接は、鋳素片を簡単に接続する方法として鋼構造物の製作では多く用いられます。図 14b のような前面隅肉状態で力を受けるとき、鋳の全断面積で決まる全強分の力を伝えるには、隅肉部の断面積が不足します。したがって、計算上で隅肉部の剪断応力度が大きくないと確認できない場合には、なるべく、前面隅肉状態になる部材設計を避けます。最初に説明に使った図10 の断面設計は、プレートガーダーでは多く見受けられますが、フランジを介して上下方向の荷重を受ける個所では採用しないのが普通です。床桁などを介して間接的に上下方向の荷重を受ける個所では、垂直補剛材を添わせ、これをフランジと一体化した柱のように溶接して、隅肉溶接に垂直方向の力が作用しないようにします。図10b の断面では、部材の内部にスリット状の隙間ができます。これを内部切り欠きとも言い、繰り返し引張り荷重を受ける場では疲労亀裂の出発点になる危険があります。図10 で示した3つの構造は、外見で判断すると区別できない場合があります。したがって、製作完了後の溶接検査にはX線を使った透視写真を使います。

4.4 溶接による構造の構成

4.4.1 リベット構造の考え方とは異なること

鋼構造物は、基本的に小さな素材から順々に大きな部材に、そして全体構造に組み上げて構成しますので、溶接構造で部材を製作しても、現場ではボルトでの組み立てが必ず必要になります。リベット構造の場合、組み立てや架設の手順を考えて、工場で締付けるリベットと、現場で締付けるリベットとを区別して管理しなければなりません。設計製図では、現場で打つリベットは黒丸で描く約束になっていました。溶接構造が主体になって、工場ではリベットを素材の組み立てに使わなくなり、リベット締めは現場での架設にだけ利用され、さらに、それもボルトの使用に代りました。

4.4.2 トラスの構造設計の変化

リベット構造から溶接構造の時代に移行するときに、設計の考え方が革命的に変わったのは、主にトラス構造です。構造力学の単位で考えると、トラスの弦材は端部を格点に集めるようにします。そのため、トラスの格点では大きな飯(ガセット:gusset plate)を介して部材端を集めるように接続させます。格点の個所は部材が立体的に交わりますので、力の伝達に無理がないように、ガセットの組みで格点の構造を考えておいて、そこに部材端を差し込むような継手を工夫しました。したがって、リベット構造の時代、格点はリベットの現場継手の個所でした。溶接構造を採用するようになって、複雑な格点構造の個所を工場で一体に溶接で製作しておいて、部材の継手を格点から離れた個所にずらすようになりました。トラスの格点では、斜材や垂直材をガセットに取り付けることもあります。ガセットは、独立した単独の飯にする必要がなくて、水平な弦材の腹部の飯と連続した外見に構成することができます。ただし、素材としては、幅の広いガセット用の飯と、部材の腹部に使う細長い飯とを、突き合わせ溶接で構成するのが普通です。こうすると、トラスの弦材の工場製作は架設の段取りに便利な長さの単位で切り分け、理論的なトラス部材の長さ単位に製作しなくても良くなりました。

4.4.3 二次元弾性問題とは

平面的に広がった連続体の応力の性質を扱う分野を二次元弾性問題と言います。これは、材料力学や土質力学などの広い分野に関係し、現象としては二次元の流体力学とも似た面があります。と言うのも、連続体の中を伝わる主応力度の性質が、平面的な形状をした水路を流れる流速分布の性質と似たところがあるからです。例えば、流路(断面積)が狭ければ流速(応力度)が増し、角度の付いた流路(ラーメンの隅角部など)での解析が難しいなどの問題がそうです。したがって、二次元弾性問題は溶接に固有する課題ではないのですが、溶接では自由な形状の飯構成ができますので、橋梁工学では溶接と関連して二次元弾性問題が取り上げられます。リベット構造の場合にも、穴の空いた飯周辺の応力分布についての解析が典型的な二次元弾性問題です。溶接構造で部材を構成する場合、鋼飯を種々の形状に加工ができますので、飯の二次元的な応力の性質を解析して、設計に応用しなければならない事例が多くなります。溶接構造の場合には、溶接個所での温度の影響や収縮歪みのような局所的な問題も絡みますので複雑に見えます。そこで、まずは一般的な二次元の弾性問題だけの性質の理解が必要です。

4.4.4 平均的な応力度と局所的な応力度

構造部材の設計では、静的な応力度の大きさを検証して、これが或る許容値を超えないように断面の形状と寸法を決めます。この検証に使うマクロの計算仮定の代表が、部材断面の平面保持の仮定です。部材断面の急変を避ける実用的な構造は、三角形のヒレ状の部材を余分に付けて断面の急変を緩和する構造にします。コンクリート構造でのハンチがそうです。鋼飯の形状も同じようにしますが、凹みのある個所は丸く仕上げます。断面形状が変化する個所は、実際はもっと複雑な応力分布をするはずである、として取り組む次善の理論が、部材を二次元、または三次元の連続体として解析する理論です。この扱いを工学的・技術的・実践的に処理する方法として、マクロの計算仮定の応力度と連続体としての理論応力度との差で考え、これを局部応力度とします。その応力度の呼び方の一つとして、応力集中(stress concentration)の用語があります。この問題を理論的に扱うには微分方程式の境界条件を考えて解くのですが、解析解が得られるのは幾何学的な境界条件が理論的に扱い易い場合ですので、FEM が実用される以前は、光弾性試験を使う実験的方法しか応力解析ができませんでした。

4.4.5 静的破壊と疲労破壊とは異なる

実験室で行なう材料試験で得られる材料の強度は、静的強度と呼ばれます。荷重を加える速度を変えると強度の性質が変わります。その方法には衝撃試験と疲労試験とがあります。橋梁の場合には荷重が繰り返して作用しますので、疲労の影響を勘案して、許容応力度を低めに決める必要があるのですが、その根拠にする実験法が面倒ですし、理論的な背景も良く分りませんでした。経験的に言えば、引張り応力を受ける場では、静的な破壊と疲労による破壊とは現象として違った現れ方をします。静的な破壊は引張り応力度が最大になる個所で起こりますが、疲労による破断は亀裂の出発点から主応力方向と直角な方向に破断が進みます。どこが亀裂の出発点になるかと言うと、一般的には応力集中の個所です。部材に部分的またはミクロに亀裂があると、そこが起点になり易い性質があります。溶接をした個所は、溶接の熱影響で局部的に残留応力が大きくなること、溶接個所に亀裂が出易いこと、仕上げ加工をしないとミクロに見て亀裂の出やすい形状が残ること、などの影響があります。

4.4.6 リベット構造での疲労

古典的な応力集中の問題は、最初、リベット継手で研究されました。引張り応力を受ける鋸に丸いリベット用の穴が空いているとき、鋸の断面積が最小になる穴の周での応力度が、穴の断面積を控除した純断面積で計算した平均応力度よりも高くなる現象です。静的な設計では、この局部応力の増加分を無視して計算します。それは最終的な穴空き断面部材の強度が、純断面積で計算した強度と同じになる実験結果を踏まえているからです。ただし、この性質は、穴空き部材に伸びの大きな鋼材を使っている場合です。静的な破断は、穴が千鳥に空いていると、穴を順に結ぶような最小の断面で起こります。リベット構造の設計では千鳥に穴の配列をする場合の純断面積の計算をします。しかし、疲労による亀裂の破断線は、応力方向と直角に進む性質があり、千鳥の位置にある穴を必ずしも結ぶ線とはなりません。亀裂が始まってそれが進行するにはある程度の繰り返し回数が掛かります。材料が鋳物やガラス状の脆性材料であると、この繰り返し回数が少なく、現実の構造物では殆ど瞬間的な破断になりますので非常に危険です。軟鋼ではこの進行が早くありませんので、致命的な破断事故を起こす前に亀裂の発生を確認して適切な対策を取ることができます。実を言うと、鉄道橋で桁が疲労破断して、通行していた車両を巻き添えにした事故は殆ど起きていません。それは、亀裂が発生して破断するまでに日数的な余裕があるためであって、その間に乗客、乗務員、近所の人達が異常な音などを聞いて通報することができるため、と考えられています。

4.4.7 異種の継手の混用

第二次世界大戦の後の復興事業で、老朽化したリベット構造を溶接などで補強する工事などと絡んで、原理の違う連結方式の混用が問題になりました。しかし、力学原理の異なる構造を混在させることは、不静定構造を構成しますので、力の分担をハッキリと計算できません。そのため、設計上は、どちらか一種類だけが有効であるとして、混用で期待される協力作用を無視します。部分的に膏藥を貼るような補強は効果的ではありません。リベット継手とボルト継手のように、一見すると似たような継手であっても、信用は置けません。補強のために部材を追加すると、その部分の剛度が上がります。結果的に応力が集中することで逆効果になることがあります。この問題は古い橋梁の管理と補修とに絡んで、今後、多くなる事が予想されています。橋梁構造物は、適度な変形能と剛性とのバランスの上に構成されますので、完成した橋梁に後から補強のために部材を追加する事はこのバランスを崩すこともありますので、とかく問題を起こします。

4.4.8 耐震性・耐風性・耐久性

構造物は多くの部材の集合させたシステムです。力学的に明快で弾性的であることが理想と考えられるのですが、案外なことに、不確かであることが効果的であることがあります。東大寺の大仏殿は、全部で 60 本の柱列があり、大虹梁を介して頭の重い屋根構造を支えているにも拘わらず、耐震性に優れています。柱列の基礎構造は、地盤に直接触れないように礎石の上に載せます。礎石は、柱の地盤へのめり込みを抑え、腐食も抑えます。一方、五重の塔は、耐震性と共に、耐風性が必要です。こちらも倒壊をみません。これは、木造構造が力学的に言えば、塑性的であることに因っています。地震時には揺れを受けますが、特別な固有振動数がありませんので、共振がなく、振幅の増加がないためです。近代的な構造物は、一般的に言えば、石造、また、木造構造物と比べると、極めて弾性的です。こちらは、固有振動数を持ちますので、外部の振動を受けて、共振で振幅が増幅されることも起こります。一方、お墓の石材が地震で倒壊する現象は、弾性体の力学原理に基づく動的な振動に因るのではなく、静的な力の釣り合いが成り立たなかった事例と考えることができます。したがって、地域の震度を判断するときのデータに応用されています。

5. 接着原理の概説

5.1 コンクリートと溶接とは共に接着構造である

鉄鋼は無機材料ですが、これを溶接して連続させるのは、糊のような接着材を使う接着法の一種と見ることができますが、接着とは言いません。古くから、有機材料の樹脂、炭水化物の糊などが接着材として利用されてきました。近年は、石油から得られうる人工樹脂(プラスチック)が大量に製造され、生活環境は接着の環境に囲まれています。接着とは、二つの材料 A,B の間に 3 番目の材料 C を介して接続させます。この C を接着剤、または接着材と言います。前章で解説したリベットやボルトを使う継手も、広く考えればリベットやボルトを接着材 C とみなした接続です。原理的には力学的、かつ、機械的な引っ掛かりを応用しています。プラスチック材料を代表として、樹脂系の接着では、原理的に二つあり、熱軟化性と熱硬化性に分けます。材料 C を溶かす揮発性の溶媒があると、これを接着剤として利用できます。溶媒が蒸発すると固体に戻り接着が成功します。溶媒が逃げない密封状態になると接着効果が発現しません。木材や紙はミクロに見ると隙間だらけですので、どの接着材でも、それ自身で固まる性質があれば役に立ちます。

溶媒に溶ける人工樹脂は、一般に、熱を加えると軟らかくなる性質もあることから、熱軟化性であると言い、最利用できるリサイクル資源の扱いができます。新聞紙を代表として、紙もリサイクル資源の扱いをしますが、原理的には水を溶媒にして製造した材料であるからです。一方、例えば、ポリエチレン樹脂は、見掛けはプラスチックですが、石油類に溶けませんので、灯油などの容器に使うことができます。こちらは再利用ができません。処分したいときは焼却しなければなりません。これが環境汚染につながります。この人工樹脂は、二種の材料を別に保管しておいて、利用するときに混ぜ、化学反応を起こし、硬化させます。この化学反応のときに発熱しますので、熱硬化性であると言います。セメントは水と反応して硬化し、その際に発熱します。二度と軟らかくなりませんので、熱硬化性の接着材です。一方、道路の舗装に使うアスファルトは熱軟化性接着剤ですので、再利用が図られています。

5.2 二種類の接着原理

接着を実現させる原理には、接触する面のミクロの凹凸を使った機械的な引っ掛かりを利用する原理と、原子または分子レベルでの相性を利用する接続原理とがあります。セメントやアスファルトは、自分自身が固まることで、骨材を巻き添えにしてコンクリートが作られます。接着の主目的は骨材を繋ぐことにあるのですが、骨材は接着材料の節約を目的とした充填材の意義もあります。なるべく粗骨材を多く使うと、骨材同士の機械的な噛み合わせが効いて強度の高いコンクリートが得られます。このとき、接着材と骨材間の分子レベルでの相性が悪いと良いコンクリートができません。アスファルトコンクリートでは、骨材から水分を排除するように熱して混合するのですが、骨材は水との相性がアスファルトより高いので、防水が悪いと骨材が水とがくつついて、アスファルトと骨材の分離が促進され、結果として破壊に繋がります。分子レベルでの相性が悪い接着剤を利用するときは、表面を粗く仕上げて、機械的な引っ掛かりに期待するように接着させます。コンクリート構造物の補強や補修にプラスチック材料を使うとき、分子レベルでの相性も大きな問題です。鋼材料の溶接は、高温で溶かす同種の鋼材料を介して接着させますが、やはり相性が重要です。これには主に鋼材の化学成分が効いてきます。金属の接続に半田を使う場合、接触金属間の分子レベルでの相性が良くないと接続できません。アルミ材に半田が効かないのがその例です。接着と逆の発想もあります。例えば、壁面への貼紙禁止や落書き防止のため、特殊なプラスチック塗装をすることがあります。この塗装は水や油脂などを含め、他の材料との分子レベルでの相性が悪いので、接着させても簡単にはがれます。

5.3 構造接着と非構造接着

接着は、強度を伝えることを主目的とするように使うとき構造接着と言います。切手を貼る、手紙の封をするときの糊の使用は非構造接着です。鋼材の溶接もコンクリートの施工も、構造接着としての見方と同時に、力を合理的に伝える構造を工夫します。一般的に言うと、接着材の強度は、接着させたい元の材料の強度よりも低いので、接着部分が構造的な弱点になります。そのため、力を伝える構造としては、引張り応力度の場になることを避け、圧縮場になるような工夫をするか、接触面が広くとれる剪断応力度の場になるようにします。リベットの使い方は、剪断を受ける面が離散的に分布している接続方法を使っています。高力ボルト摩擦接合も、鋼材同士の面内に働く剪断応力が継手の直接の強度です。この応力を保証する目的で、ボルトを使って鋼材を締め付けます。この場合、摩擦が効かないと剪断応力が小さくなりますので、機械的な引っ掛かりも期待できるように、鋼材の接触面の摩擦が大きくなるように仕上げます。鋼構造物の部材断面を溶接で構成するとき、隅肉溶接は剪断応力が作用するように設計します。