技術ノート

鋼製砂防構造物について②
――接合のはなし

嶋 丈示　しま じょうじ
(一財) 砂防・地すべり技術センター
砂防技術研究所 技術開発研究室長

1. はじめに

コンクリートは、現地で型枠を作りそこに材料を流し込む、砂防ソイルセメントの場合は詰め込む、でしょうか。とにかくまだ固まっていないものを容器に入れて固めるイメージです。プリンを作るのに近いですね。大きさは全然違いますが、要はカタチは型枠で決まり、性能は材料と固め方によって決まります。同じ土木構造物を構築する材料でも、鋼材は趣が大きく異なります。鉄（鋼）は高炉や電炉から出てきた時は溶けていますが、出荷するまでに形鋼、鋼板、鋼管、線材など、鋼材としての形状と材質から特徴が決まっています。これらの鋼材を工場で所定の寸法に加工するわけですが、この工場からの工程が鋼製メーカーのテリトリーになります。

まず形鋼や鋼管などを設計図面通りに寸断し、これらを溶接で接合して部材にしていきます。ちょうど子供のころに作ったプラモデルに近い感じです。プラモデルの部品同士を接着剤でくっつける工程が溶接に相当します。最近はガンプラのように接着剤を使わず部品をはめ込むものがあります。これは鋳型の精度がよく複雑な形状の部品が作れるようになったこともありますが、一番の理由は腕や足、さらには指まで可動させるためです。くっつけて固定してしまっては稼働できませんから。これとは逆に、土木構造物では可動することを前提としているものはまれで、通常は固定することで耐久性や安定性を確保します。この固定方法によって、ラーメン構造やトラス構造といった構造系が決まります。また固定方法は、そのまま設計方法に繋がります。採用した固定方法は、部材加工や現地組立のしやすさに直結するため、信頼性や安全性に影響します。

そこで、今回はこの固定方法として、最も一般的な溶接とボルト締めについてお話したいと思います。これら溶接もボルト締めも多岐にわたりますが。ここでは鋼製砂防構造物をテーマとしているので、鋼製透過型堰堤と鋼製枠堰堤に使われている方法を対象にします。

2. 工場の溶接と現地のボルト締め

鋼材同士を連結するといっても溶接とボルト締めではだいぶ趣が異なります。例えば、紙と紙をくっつける場合、糊でくっつけるのとホッチキスで留めるのでは、同じくっつけるにしても用途が違うのと同じです。ちょうど糊は溶接、ホッチキスはボルト締めに近い感覚でしょうか。

糊は紙同士を外れないように糊しろに糊を付けますが、付けすぎると紙が伸びてしまい綺麗に仕上がりませんし、付け方が少ないとすぐ取れてしまいます。ちょうどよい頃合いがあります。溶接も溶接量が多いとコストアップにつながり、入熱量により部材がひずみ出来型にも影響しますから多ければよいというものではありません。この溶接方法には、グルーブ溶接のように開先をとって母材と一体になるように溶接するものあれば、すみ肉溶接のように板と板の角に溶接するものもあります図-1。この溶接の種類によって応力の流れ方が違うので、外力の作用方向や加工のしやすさによって使い分けます。もちろん設計照査の方法も違います。これは設計図面に溶接方法が記載されているので、設計計算書で外力の作用方法と溶接の種類が合っているかチェックしてみて下さい。

紙に戻りますが、ホッチキスで留めて紙同士がバラバラにならないように一つにします。だから引っ張る

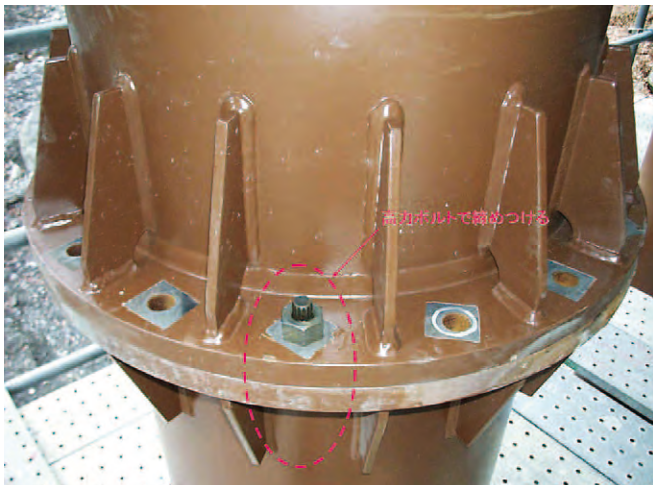


写真-1 鋼製透過型堰堤のフランジ継手

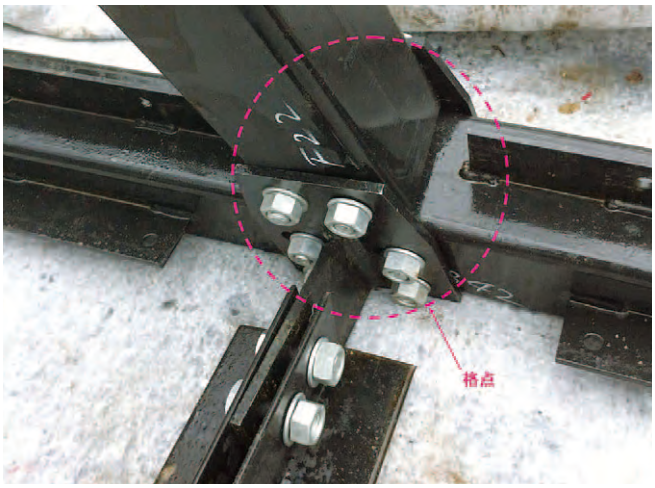
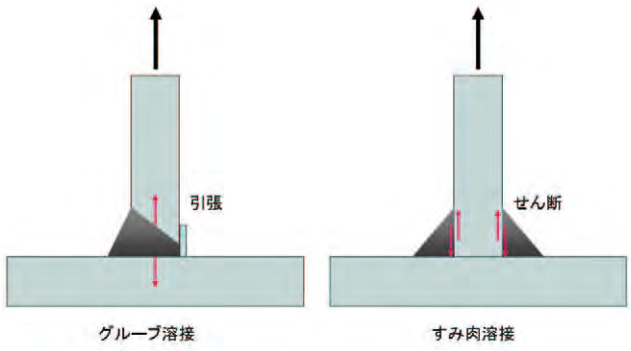


写真-2 鋼製枠堰堤の連結部

図-1 グルーブ溶接とすみ肉溶接



と外れますね。それに紙に穴を空けるわけですから、そこから破れやすくもなります。鋼製の場合、これはボルト締めに相当します。部材と部材が外れないようにボルトで締めつけるのでホッチキスよりマシですが、ボルト孔を空けるので断面欠損になります。この欠損分は設計に織り込みます。鋼製透過型堰堤のボルト締めは引張接合です。軸力を導入しているのでフランジ同士に摩擦抵抗も働いており、計算上より強固で剛性が高い連結方法です写真-1。

同じボルト接合でも、鋼製枠堰堤は軸力を導入していません。鋼製枠堰堤は、中詰材である礫のせん断抵抗によって堆砂圧などの外力に抵抗します。このため、中詰材が変形できるように、ボルト締めしている連結部の回転を許容するからです写真-2。

3. 鋼製砂防構造物の組み立て

コンクリートは、まだ固まらないコンクリートを生コンプラントから持ってくるので品質管理の面で安定しています。後は現地で打設していくので、構造物の品質と出来型は現地施工の品質管理及び工程管理にかかっています。砂防ソイルセメントは材料も現地調達ですから、ほとんどの品質管理は現地施工の出来にかかっていますが、コンクリートに比べて許容値を緩くすることで管理を楽にしています。どちらにしても現場施工が中心です。

これに対して鋼製砂防構造物は、工場と現地ではどちらの工程が重要かというと工場です。鋼材自体はJIS規格で合格したものを工場で加工しますから品質の面で問題になることはまずありません。この鋼材を加工して構造物にしていくのですが、工場では鋼材を溶接して部材を作り、現場では工場で作製された部材をボルトで連結して構造物を作ります。鋼製透過型堰堤なら鋼板や鋼管、あるいは鋼管同士を溶接し部材を作ります。鋼製枠堰堤の部材なら形鋼を所定の寸法に切断し、所定の位置にボルト孔を空けます。これら出

写真-3 格子形の工場仮組状況

写真-4 B型スリットの現地据付状況

来上がった部材の寸法が正確であれば、設計図面どおりに現地で組み立てることができます。

構造物の規模が大きく精度を要する場合でも、工場で仮組して組み立てられることを確認しますから、現地では工場で組み上げられたものをもう一度再現するだけで済みます。つまり、仮組検査が合格であれば、現地組み立てで問題が発生することはありません。ただし、仮組みの方法によっては気をつけなければならないことがあります。写真-3は格子形の仮組風景です。現地と違って横に寝かして継梁を取り除いています。現地と同様に建ててもよいのですが、安全性や手間からこの方法をとっています。横に寝かせると柱支点がフリーとなるので、仮組時に最も誤差が大きく出ることになります。ところが、現地ではここを基点に組み上げるので、ベースの誤差が大きくて公差内に収まらない場合、上部の連結された部材同士で吸収しなければならないので、現地で合わなくなる可能性があります。これを回避するには部材の精度を上げるか、誤差をあらかじめ考慮して基点の位置をずらすことが考えられます。しかし、既往の構造物では部材の製作精度がよいこともありますが、部材自体の誤差もプラスマイナスがあるので全体を組み上げると、これらが差し引きされて全体で誤差は吸収されてしまいます。

B型スリットのように、ユニットの場合には、単体のユニットさえ組めれば、後はこれらを現地で並べるわけですから精度管理に関してはとても楽です写真-4。このように全体を立体で組上げるもの、ユニットを並べるもの、どちらにしても鋼製の場合、工場の品質管理が最も重要になります。寸法さえ合っていれば、もっと極端に言えばボルト孔の位置さえ合っていれば鋼製砂防構造物は必ず組み上がります。ボルト孔が合っているということは、部材端部の接合部同士が合っているということを意味します。仮組みをしない場合、まれに合わないときがありますが、これは設計自体が間違っているか図面の表記ミスです。

鋼製砂防構造物が現地で組み上がっていれば、部材同士の誤差は許容範囲内ということになりますから、据え付け時のベースの位置さえ合っていれば、組み上がった時点で出来型は合格圏内です。しかし、検査は必要ですから行いますが、見るとしたら鋼製部とコンクリート部の位置関係と、鋼製部なら塗装くらいです。大雑把ですがそんなところでしょう。

接合に関しては工場では溶接、現地ではボルト締めが作業の中心になります。部材の精度がよいほど、現地の組立精度の管理は楽になります。このため、鋼製砂防構造物で最も気を遣う部材加工は、品質管理がしやすい工場で行います。つまり、コンクリートも砂防ソイルセメントも現地施工が中心になりますが、鋼製は工場が中心になります。

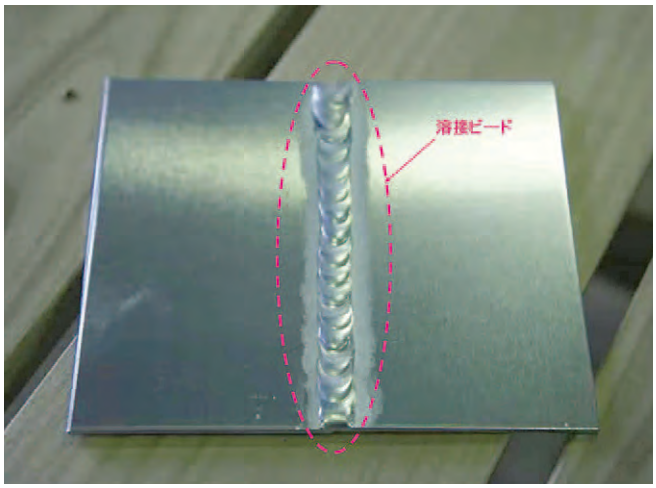
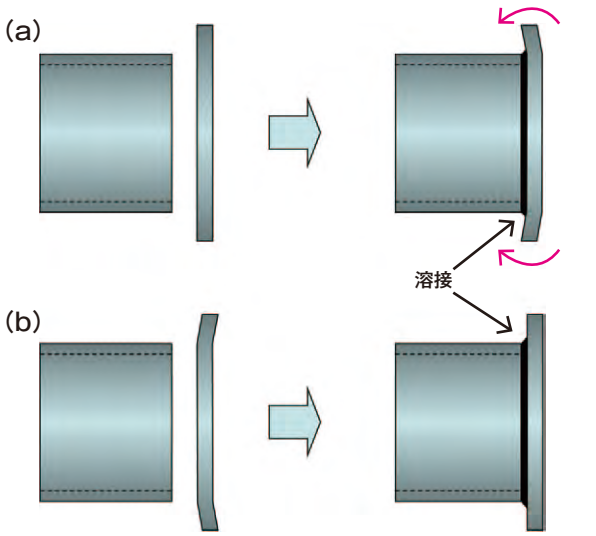


写真-5 溶接ビード

図-2 フランジ継手の組立



4. 溶接による接合

溶接したところは母材と溶剤が完全に溶け込むため、母材と同等の強度を有します。ただし、ここに溶接欠陥が入り込む可能性があります。この溶接欠陥は表面に最も多く現れます。このため、溶接の検査は表面の傷を目視で見つけることが最も簡単で一般的です。カラーチェックは色水をふりかけることで傷を目で確認しやすくします。ただ、カラーチェックや目視は表面の欠陥しかわかりません。

磁粉探傷試験は部材を磁化し、ここに磁粉をふりかけることで表面近くの内部欠陥を浮き上がらせ発見しやすくする方法です。「鋼製便覧」では、まず目視で表面を確認し、疑わしい場合には磁粉探傷試験を行います。ただし、これも奥深くの欠陥を見つけることはできません。その時はX線で欠陥を探りますが、これも部材系形状によってはフィルムを当てることができない場合があります。

ただ、ありがたいことに溶接の欠陥は表面付近に最も多く現れるので、表面付近に欠陥がなければ内部もないであろうと考えられます。それ以上に溶接ビード写真-5が綺麗だと、まず傷はありません。溶接ビードが綺麗ということは溶接の上手い人が行っており、それだけで信頼性が高いと判断できます。外観が綺麗だと中まで綺麗、人と同じで肌つやがいい人は健康であろうというのと同じです。

溶接欠陥はなく溶接自体が合格でも、溶接するとき鋼材が熱せられるので変形します。このため溶接の方向によってあらかじめ部材を歪ませ、溶接が終了し冷却した後の形状が所定の寸法になるよう工夫します。図-2はフランジ継手の模式図です。鋼管と鋼板を溶接してフランジ継手を製作しますが、溶接すると熱によって図-2aのように変形します。ですから、鋼管にフランジプレートをそのまま溶接すると反ってしまってボルトで締めても隙間ができることになります。そこで、あらかじめプレートに変形する方向と逆にひずみを付けておきます図-2b。そうすると溶接後にはまっすぐな形状になります。このひずみが残っていても、ボルト締めするのでフランジはぴったり付きます。このようにどれだけ歪ませるかなどは工場のノウハウになりますが、どちらにしても出来上がり寸法が許容誤差に収まっていれば合格です。

5. ボルトによる接合

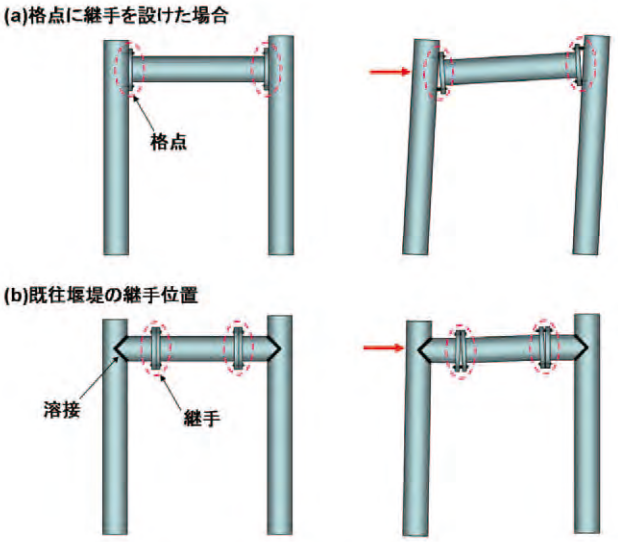
砂防工事ではコンクリートが一般的なのでボルト締めは手間がかかるような印象を持っている人もいるでしょうが、じつは簡単です。コンクリートのように現

地で寸法を合わせるものは、自由度が高いように見えて結構手間がかかるものです。例えば、着物と洋服を比べてみてください。洋服なら子供でも着れますが、着物だと着付けを習った人でないと無理でしょう。柔道着くらいは着れますが、簡単に服装が乱れます。ボタンを留めるのは位置が決まって、そこにボタンを通すだけなので簡単です。ボルトで部材同士を連結するのも同じ要領です。ボルト孔の位置さえ合っていればボルトを通して締付けるだけなのです。つまり、鋼製の現地組み立てにボルト締めを多用するのは作業が簡単だからです。

溶接はボルトと比べて強固ですから変形しにくいため鋼管と鋼管の連結部（格点）を溶接するとラーメン構造になりますが、ここを図-3aのようにボルト接合するとどうなるでしょう。格点は曲げモーメントが卓越する箇所なので、ボルト締めで剛結しようとすると母材以上の断面が必要なうえに、これが鋼管同士になると形状を相当工夫しないと難しいでしょう。仮に母材にそのままボルト孔を空けて連結しても、剛結構造とみなすには心許ないので回転を許すヒンジとして設計することになります。図-3aのように継手が極端に回転できるわけではないですが、許容応力度設計では微小変形理論を用いるので、わずかでも回転を許せばヒンジと仮定したほうがいいでしょう。このように、格点をボルトで留めて部材同士の回転を止めるにはボルトでは荷が重いのです。格点がヒンジになればトラス構造となり、外力によってはラーメン構造よりコスト的に有利になりそうです。また、柱と梁を直接現地で接合すれば、部材に突起がないので運搬時の積載量も増え効率的です。しかしそうしないのは理由があります。

土石流など不確定要素の大きい外力に対応するためにはラーメン構造の方が安全性や信頼性の面で有利です。このため格点は溶接で剛結したいところです図-3b。そこで、曲げモーメントやせん断力の発生が小さい箇所を選び、そこをボルトで連結できるように加工しています。鋼製透過型堰堤は、ボルト接合する箇所は格点ではなく、そこから少し離れたところにボルト接合の一つであるフランジ継手を設けています。

図-3 継手の位置



よく街のビル建設現場で柱に梁の一部が溶接してあって、梁同士をボルトで連結している光景を目にすることがあると思います。これと同じで、鋼管同士の複雑な部位はあらかじめ工場で溶接しておいて、そこから少し離した箇所（フランジ継手）をボルトで接合しています図-3b。

このように鋼製透過型砂防堰堤の部材間の接合には、昔からフランジ継手を採用しています。この継手もよく見ると二種類あることがわかります。違いはリブの有無です。昔の継手はリブあり、今の継手はリブなしです図-4。リブありからリブなしに変えた理由は、製作の手間が一気に減ることです。これを実現するために、実験によりリブなしフランジ継手の性能検証を行っています。また、リブをなくした代わりにフランジプレートを厚くしています。このため厚板の溶接管理も要求されます。これらをクリアすれば、鋼管にフランジを取り付けるだけなので溶接ロボットで簡単にできます。ロボットを使えば精度がよいうえに、時間も短縮され、結果的に製作コストを抑えることができます。余談ですが、溶接工は有資格者が行いますが、昔の溶接工は芸術的に上手い人が何人もいました。ただ、工業製品のためロボット化によって人員削減に見舞われる羽目になりましたが、これが工芸品なら手作りのよさとして生き残れたのではないでしょうか。

図-4 フランジ継手（リブ無し、リブ有り）

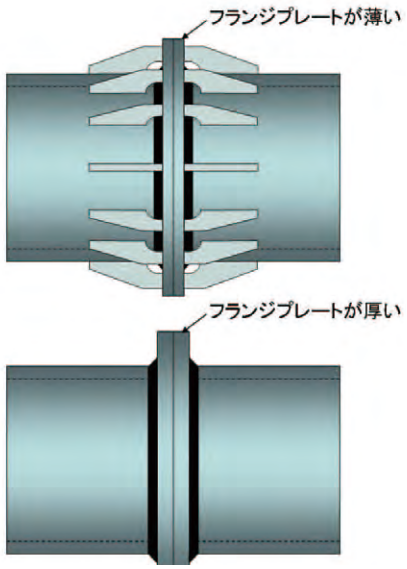


写真-6 鋼製枠堰堤の現地据付状況

フランジプレート同士をボルト接合するとき、溶接で述べたように実際にはプレートは完全にフラットではありません。逆ひずみを付けるとこで、これを締め付けるとプレート間がぴたりとふさがります。ぴたりとなると水の侵入を防ぎ、錆の進行も抑えることになります。

このように、土石流対策として活用される鋼製透過型のラーメン構造を成立させるために、格点部は溶接によって剛結し、直線部で部材同士をボルトで連結しているわけです図-3b。このことからも、溶接による形状寸法や品質の管理は工場に任せ、現地では施工の容易なボルトで部材同士を連結したほうが合理的です。

ただ、土石流対応ではない鋼製枠堰堤などは堆砂圧が外力の大半を占め、外力に対しても中詰め土砂のせん断変形で抵抗するため、格点の回転が可能なようにボルトで連結しています。また、ボルト孔の全量ではないですがボルト孔を長孔にしています。これは現地の施工精度を緩和する役目を担っていますが、この孔が大きいほど施工精度は楽になります。逆に余裕を設けないと施工できません。このボルト孔の余裕分が鋼製枠堰堤の特徴である屈撓性を発揮する肝になっています。つまり、欠点を逆に利用して長所に転換している好例ではないでしょうか。

鋼製枠堰堤の施工をみる機会がありましたが、最初は部材が多く作業員は何をしていいか戸惑っていました写真-6。ところが一段目を組んだくらいから、指示しなくても作業はドンドン進みます。作業員が部材を所定の位置に持って行って組み立ててしまうのです。部材や部品がどこに使われるかわかってしまえば、というかイメージできるからでしょう。これは子供のころプラモデルを作っているときのわくわく感と同じで、人は何かを作るのが好きな生きものなんだと感心しました。

6. おわりに

鋼材は、鋼板、鋼管、線材などいろいろな形状がありますが、これだけでは構造物にならないので、これを切り貼りして必要な形状に加工します。このとき、板と板をどうやってつければ効率よく、さらに安全なのかを考える必要があります。外力がどこから作用するのか、それをどのように受けるのか、部材をどのように組立ていくのか、など、構造物の特徴に合った接合方法があります。その接合方法を採用した理由が合理的であれば、安全性、信頼性の高い構造物と言えるでしょう。現地で出会った鋼製砂防施設をそんな目で見ると、新たな発見があるかも知れません。