

鋼橋の架設における設計上の留意点
—架設と設計思想の不整合がないように—

小西 日出幸

日本橋梁建設協会 設計小委員会副委員長

鋼橋架設時における 設計上の留意点

土木学会鋼構造委員会鋼構造継続教育推進小委員会
第33回基礎講座(2017.10.26)

日本橋梁建設協会技術委員会設計小委員会

鋼橋架設における設計上の留意点

内 容	
1	架設時にベント支持できない鋼桁設計時の留意点
	モーメント連結, ヒンジ連結の設計・施工上の留意点
	ラーメン橋の鋼桁一括架設時の留意点
	ポータルラーメン橋における架設手順を考慮した設計の留意点
	鋼床版桁設計時の留意点
	アーチのケーブルエレクション斜吊り工法での留意点
2	架設時の補強設計・架設時の留意事項
	送り出し工法の本体補強設計時の留意点
	大型自走台車架設時の留意点
	大ブロック架設の設計時の留意点
	多点固定形式における設計時の留意点
	現場溶接をともなう桁での留意点（現場溶接キャンバー設定）
	落とし込み架設を行う鋼桁架設時の留意点
	架設時を考慮した箱型断面の連結板の留意点

橋建協HPの技術者向け情報の技術資料として掲載されている、「施工と維持管理に配慮した鋼橋設計時の留意点」に詳細な照査方法等も示されていますので、そちらも参考にして下さい。

1. 構造解析時に留意すべき事項

◆通常は完成系にて構造解析を実施する事例が多い

前提：ベントによる多点支持

◆構造解析時に留意する必要がある架設

ベント数が少ない

ベントを早期開放する必要がある

その他、応力として最終的に残る

→結合条件（モデル）の違い、有効幅の違い

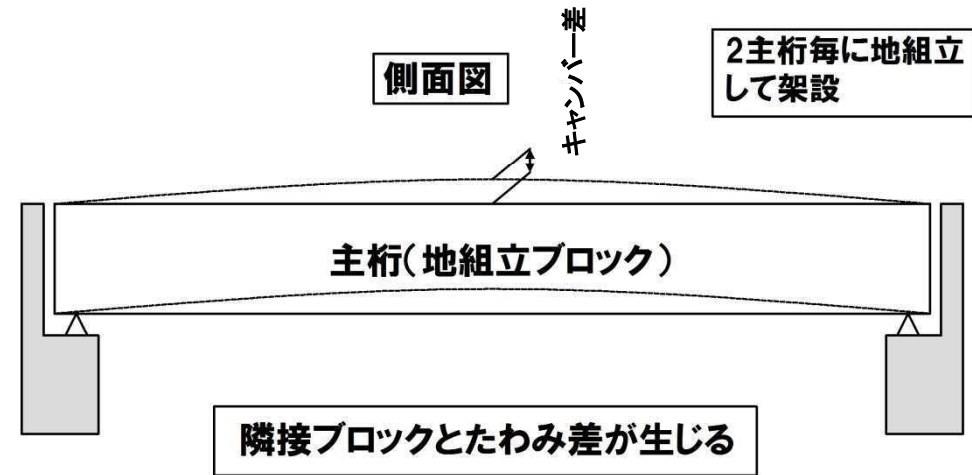
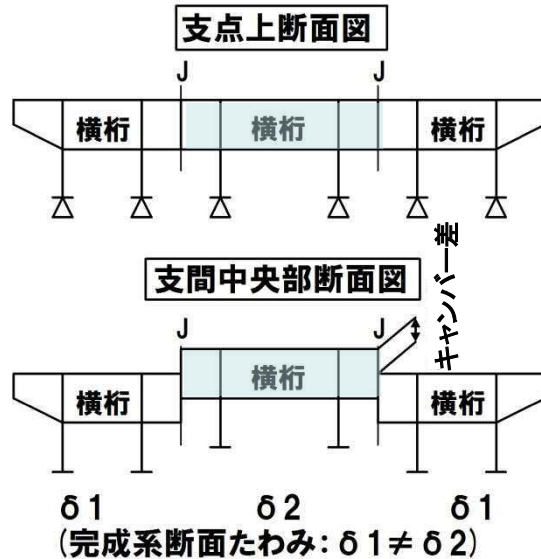


問題点：コンサルタント設計時に留意する必要がある

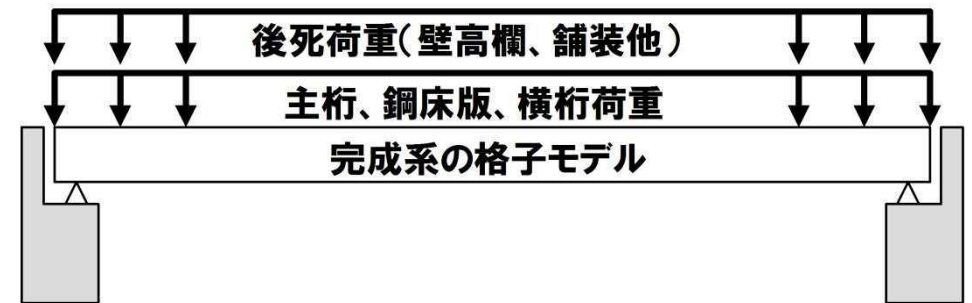
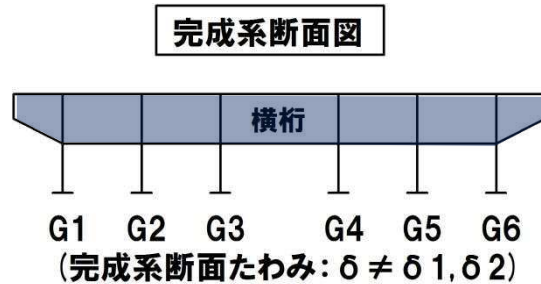
→架設方法が制約されるbut安全側の設計が望ましい
修正設計の考慮

架設時にベント支持できない鋼桁設計時の留意点

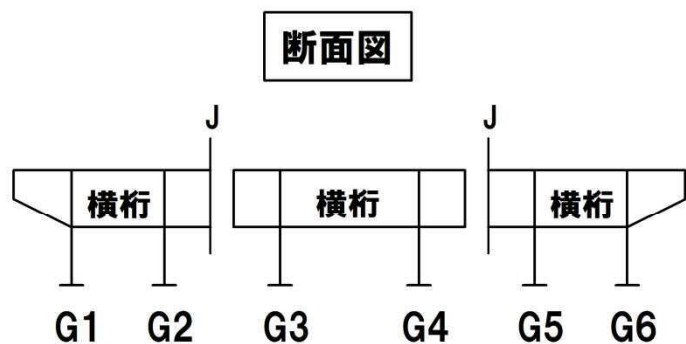
架設ステップ(ベントを設置できない跨線橋や跨道橋などの場合)



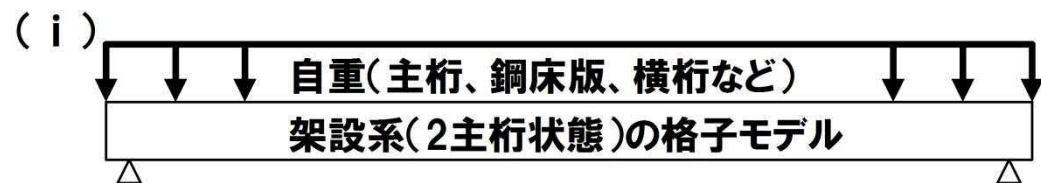
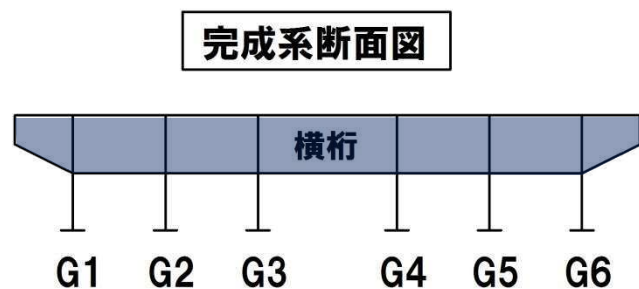
設計計算不具合(完成系断面のみで、製作キャンバー計算を実施)



架設時にベント支持できない鋼桁設計時の留意点



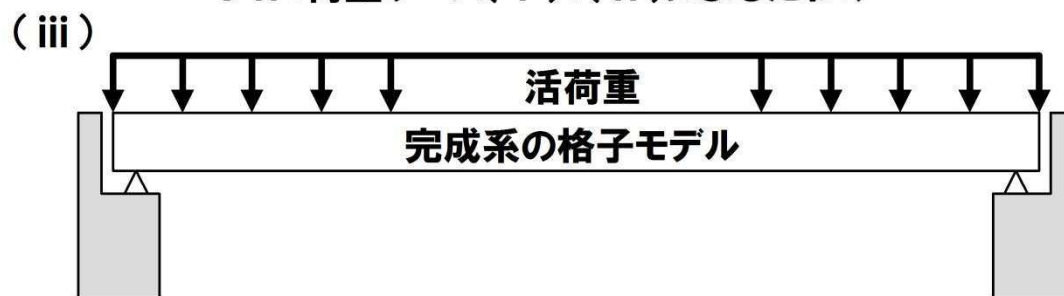
架設系(2主桁状態)における
各断面設計が必要



δi : 荷重ケース i によるたわみ



δii : 荷重ケース(i)+(ii)によるたわみ



- 各主桁の製作カンバー値 = $\delta i + \delta ii$
- 架設系断面設計 = (i) 荷重 (2主桁状態格子モデルでの断面力)
- 完成系断面設計 = (i) 荷重 + (ii) 荷重 + (iii) 荷重

図-1.1 荷重載荷概要図

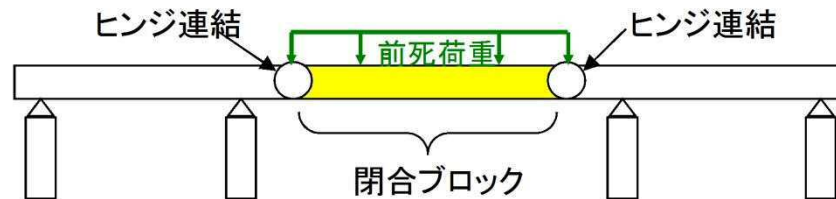
モーメント連結、ヒンジ連結の設計・施工上の留意点

架設計画(閉合部がヒンジ連結となる)

①閉合前の構造系



【閉合時】

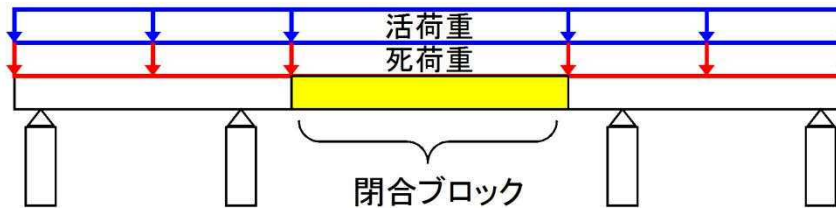


②閉合以降の構造系



完成形=①+②

設計計算(完成形モデルで断面力、応力度、製作キャンバー計算を実施している)

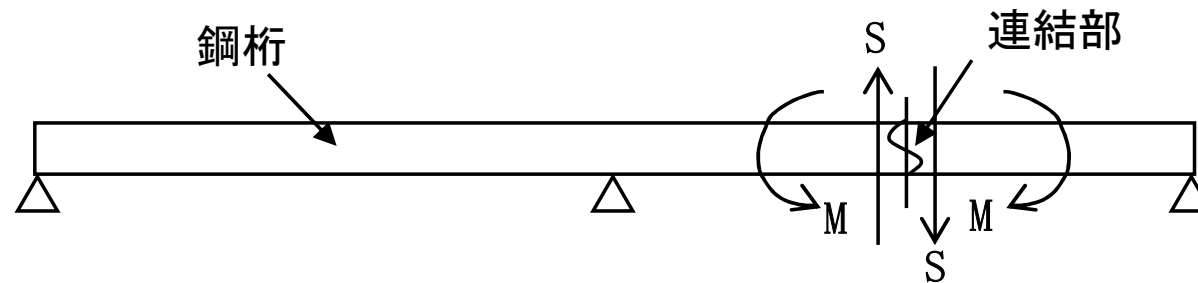


モーメント連結、ヒンジ連結の設計・施工上の留意点

モーメント連結とヒンジ連結について

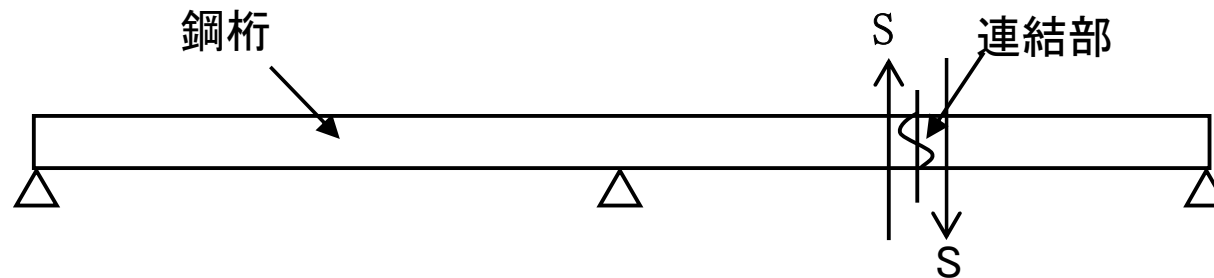
①モーメント連結:

連結部に連結後の桁自重によるモーメントおよびせん断力が生じる。



②ヒンジ連結:

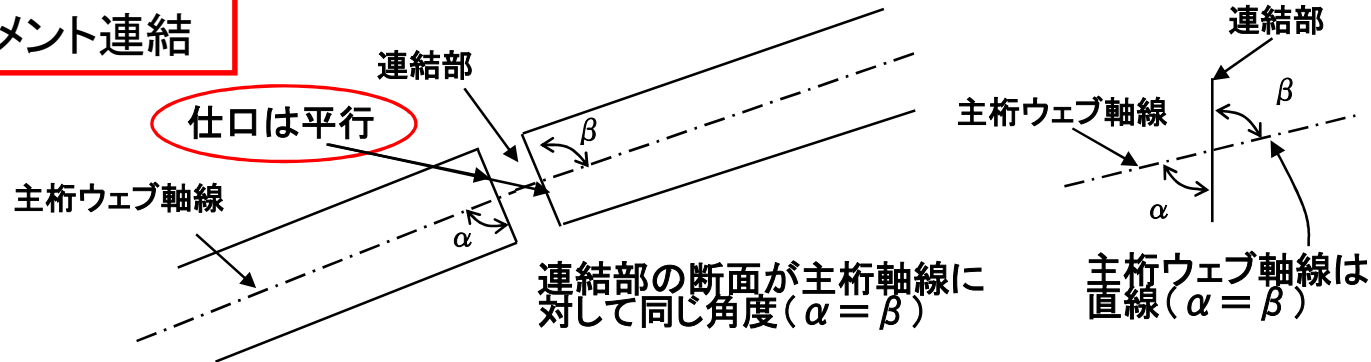
連結部に連結後の桁自重によるせん断力のみが生じる。



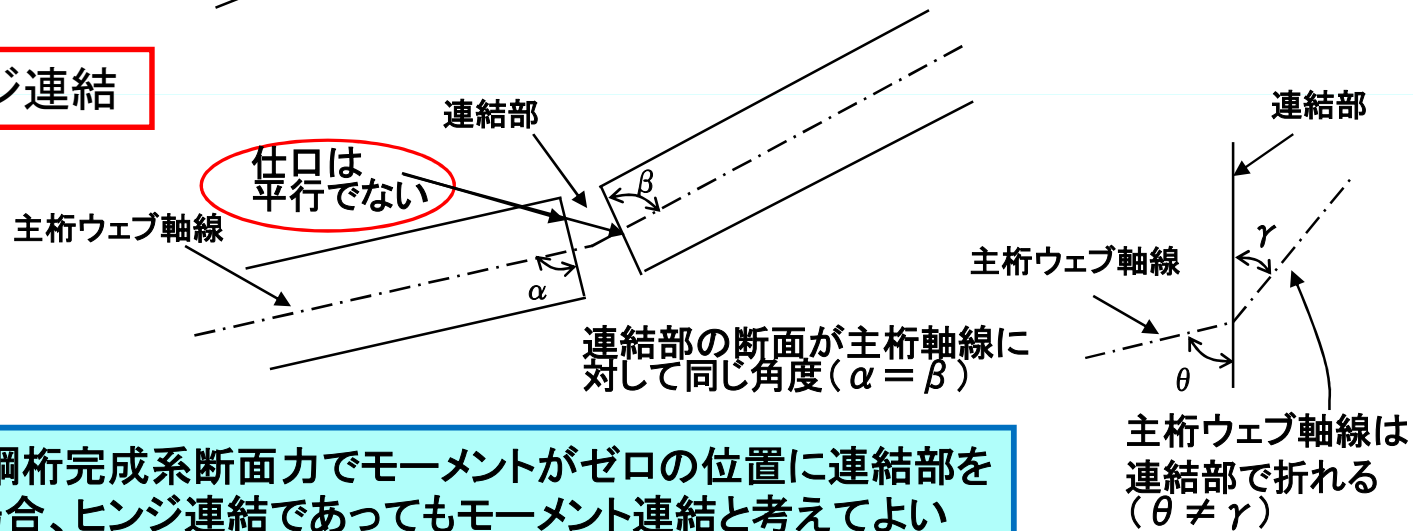
モーメント連結、ヒンジ連結の設計・施工上の留意点

製作時の仕口角度

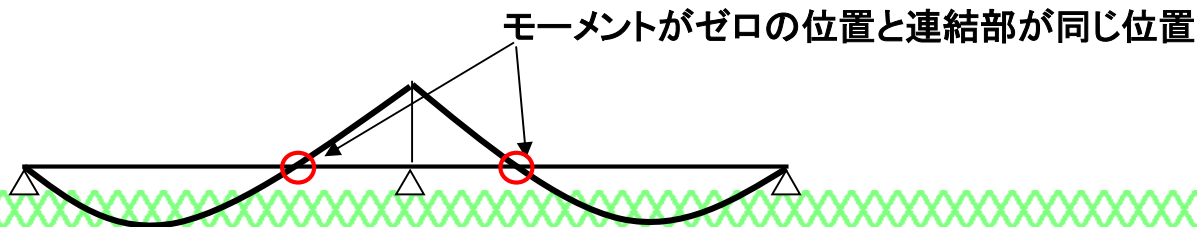
①モーメント連結



②ヒンジ連結



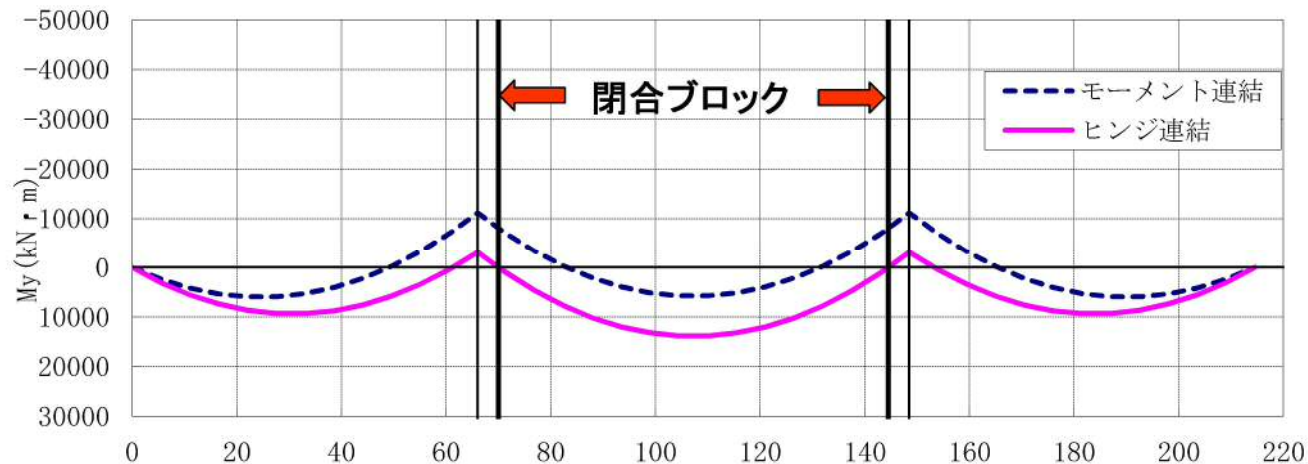
ただし、鋼桁完成系断面力でモーメントがゼロの位置に連結部を設けた場合、ヒンジ連結であってもモーメント連結と考えてよい



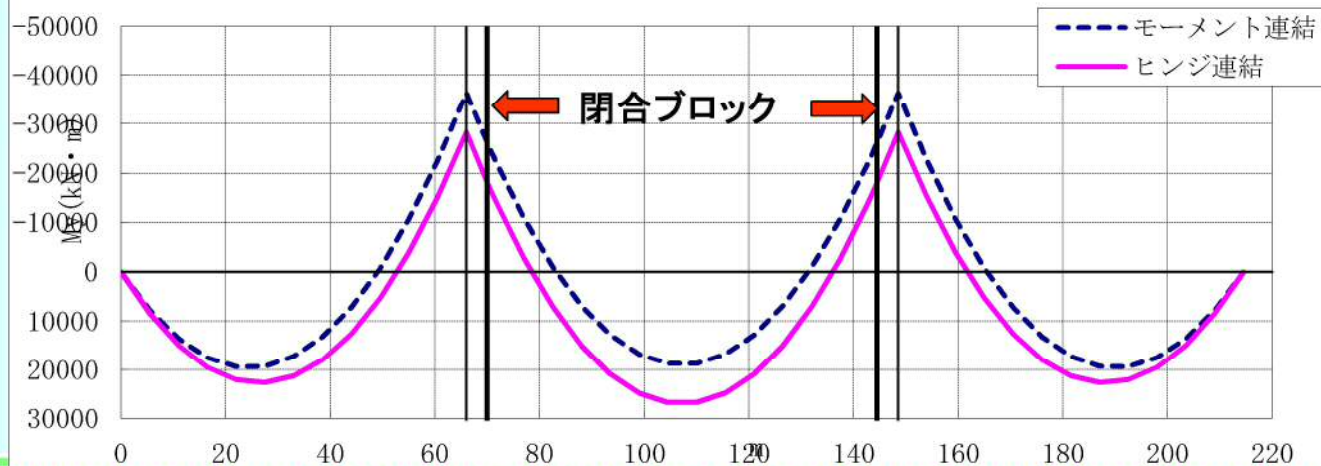
モーメント連結、ヒンジ連結の設計・施工上の留意点

3径間連続非合成箱桁の例

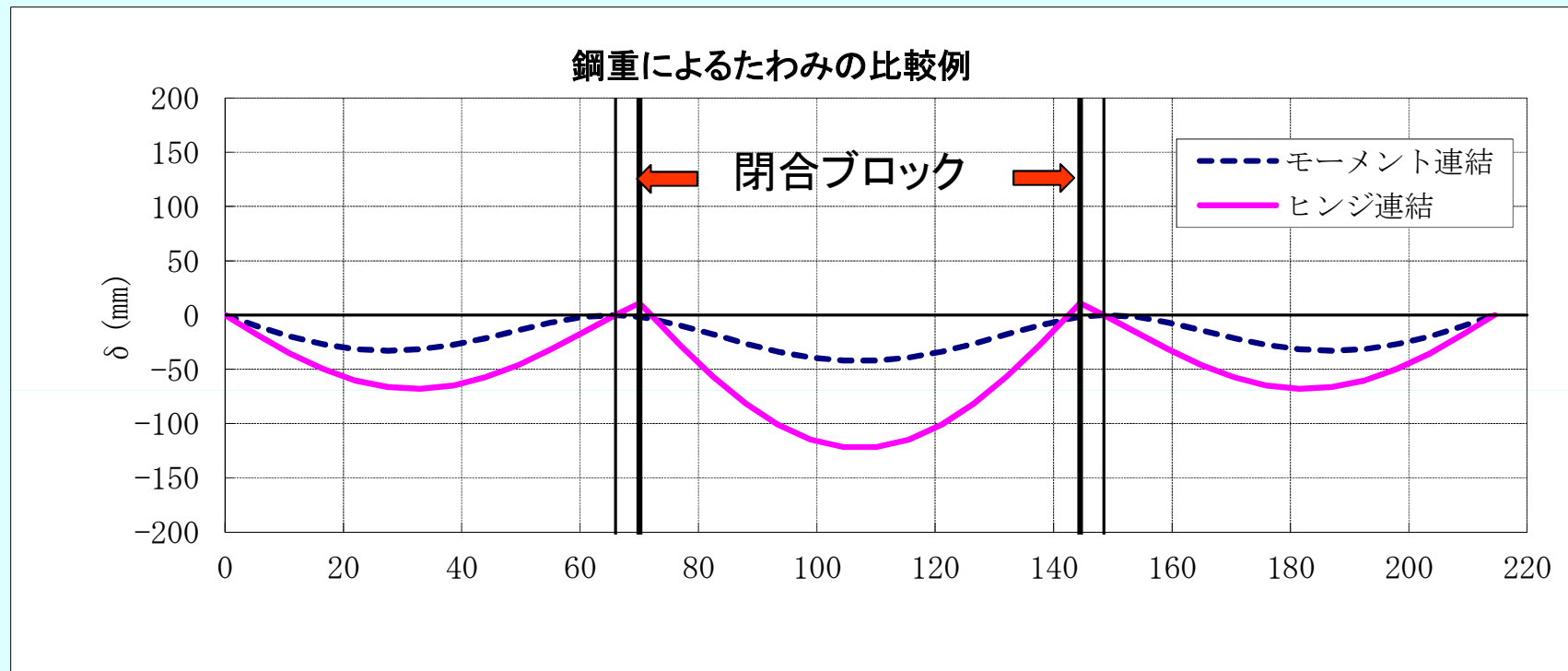
鋼重による曲げモーメントの比較例



全死荷重による曲げモーメントの比較例



モーメント連結、ヒンジ連結の設計・施工上の留意点

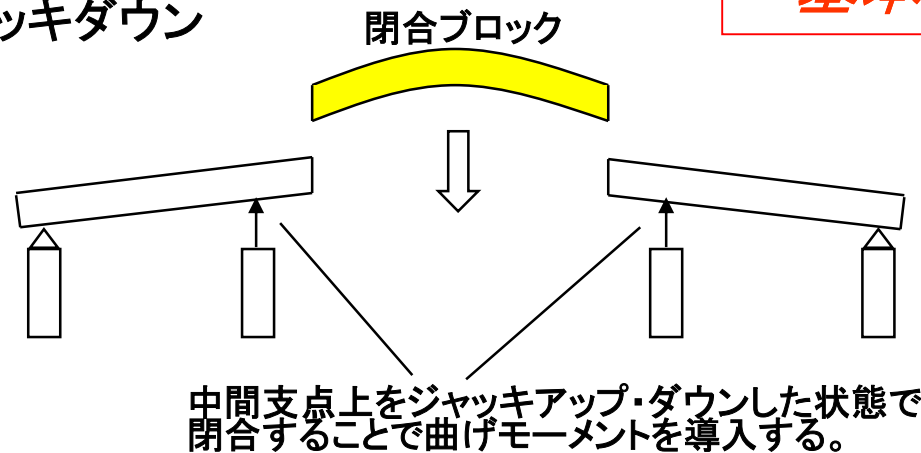


モーメント連結、ヒンジ連結の設計・施工上の留意点

閉合ブロックの連結部に曲げモーメントを導入する代表的な方法

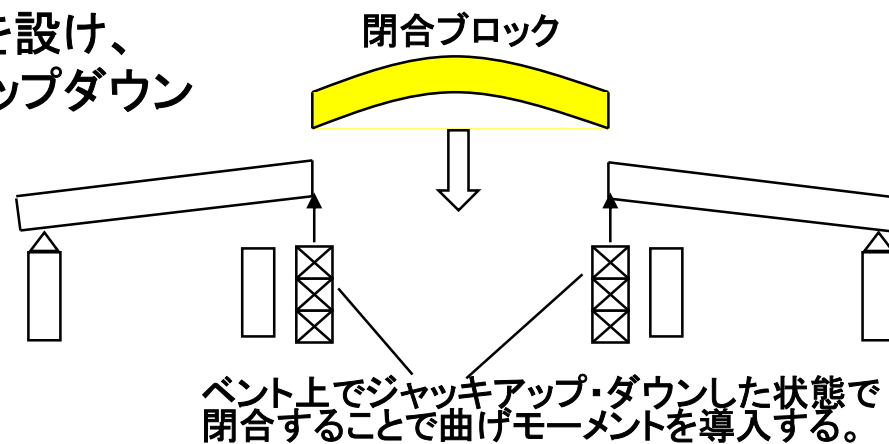
中間橋脚上でジャッキアップにより
仕口を合わせ、ジャッキダウン

基本はモーメント連結



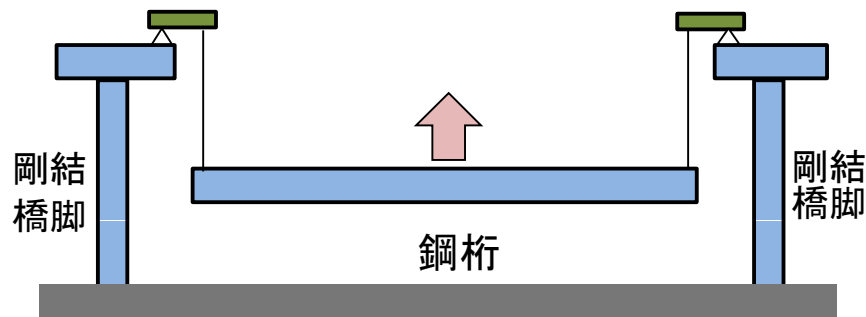
閉合部の仕口の向きにより、端支点をジャッキアップダウンをする場合もある。

連結部近傍にベントを設け、
ベント上でジャッキアップダウン



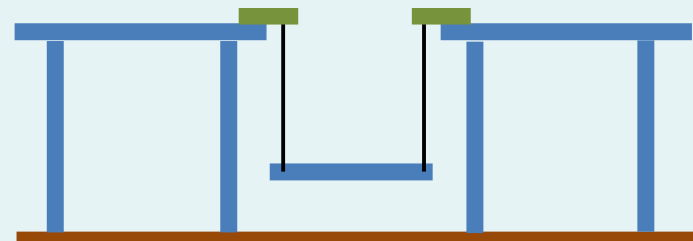
ラーメン橋の鋼桁一括架設時の留意点

【架設イメージ】



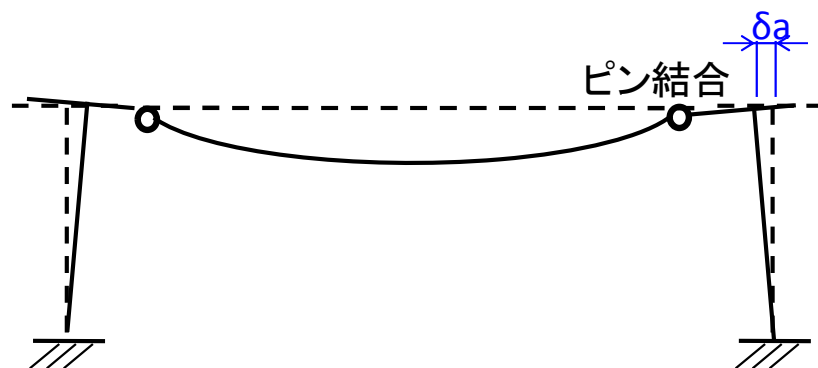
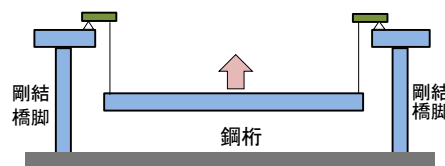
橋脚柱が左図のように単柱のみの状態で上部工架設を行う場合に特に留意する必要がある。

下図のように、鋼桁がすでに架設(連続化)されている場合には、変形量は少なくなる傾向となるが、いずれの場合も実施工計画に基づいた、解析モデル、モデル境界条件を適切に設定することが必要である。



ラーメン橋の鋼桁一括架設時の留意点

【誤った解析モデル】

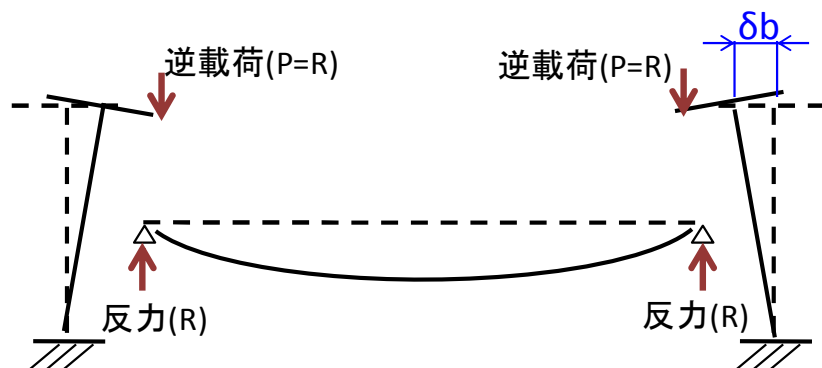


解析モデルがピン結合のため

- ・せん断力、軸力は拘束
- ・回転はフリー

左図解析モデルでは、鋼桁に軸力が発生していることになり、変位を拘束しているため、橋脚の倒れ量が小さく評価される。

【正しい解析モデル】



$$\delta a < \delta b$$

δa : 誤った解析モデルでの変形量

δb : 正しい解析モデルでの変形量

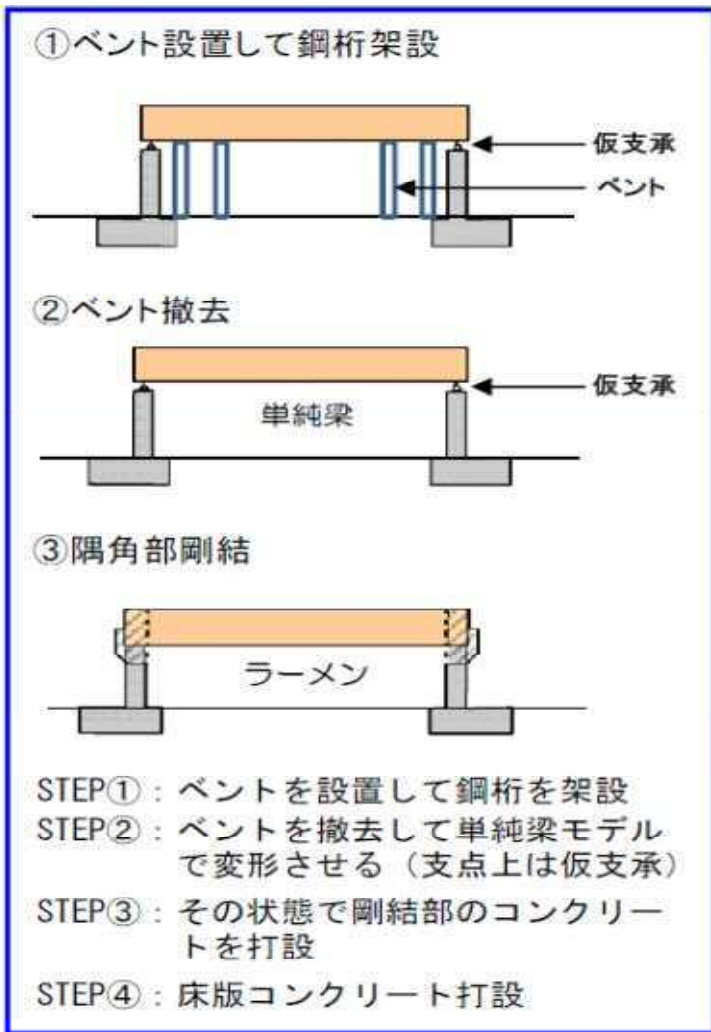
設定継手隙間量: δ

$\delta > \delta b$ と設定する必要がある。

実施工と構造解析を整合させるためには、鋼桁部の反力を橋脚部先端に逆載荷を与える必要がある。これにより、橋脚部の倒れ量と鋼桁のたわみ量を適切に評価でき、必要な継手隙間量を設定できる。

ポータルラーメン橋における架設手順を考慮した設計の留意点

設計計算書での手順



この架設手順では、剛結部コンクリートを施工前にベントを撤去するため、単純梁形式に鋼重分の荷重が載荷され、下図のような曲げモーメント図になる。また荷重によるたわみは、ラーメン形式よりも約5倍大きくなる。

鋼重分の曲げモーメント図



+

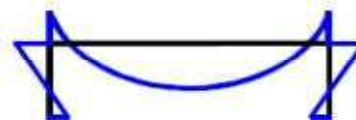
さらに、鋼重以降の荷重については剛結部コンクリートを施工した後に載荷されるため、ラーメン形式で受け持つことになり、下記のような曲げモーメント図になる。

鋼重以降分の曲げモーメント図



||

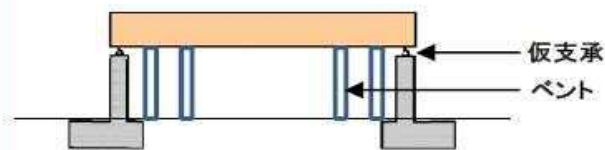
合計した曲げモーメント図



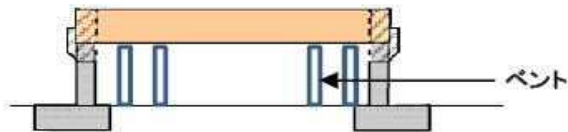
ポータルラーメン橋における架設手順を考慮した設計の留意点

架設計画図での手順

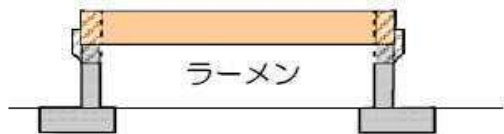
① ベント設置して鋼桁架設



② 隅角部剛結



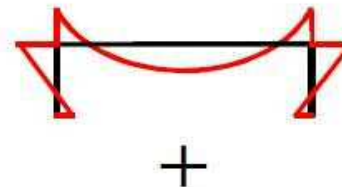
③ ベント撤去



- STEP① : ベントを設置して鋼桁を架設
 STEP② : ベントを設置した状態で隅角部のコンクリートを打設
 STEP③ : ベント撤去
 STEP④ : 床版コンクリート打設

この架設手順では、剛結部コンクリートを施工後にベントを撤去するため、ラーメン形式に鋼重の荷重が載荷され、下図のような曲げモーメント図になる。また荷重によるたわみは、単純梁形式の約1/5となる。

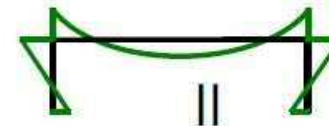
鋼重分の曲げモーメント図



+

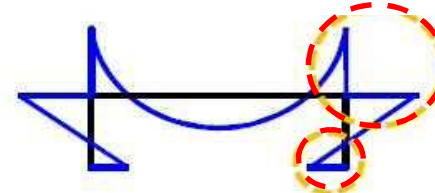
さらに、鋼重以降の荷重についても、同様にラーメン形式で受け持つため、下記のようなモーメント図になる。

鋼重以降分の曲げモーメント図



合計した曲げモーメント図

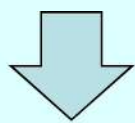
隅角部の主桁や下部工で断面力が大きくなる



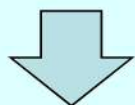
鋼床版桁設計時の留意点

鋼床版の架設ステップによっては、
前死荷重と後死荷重の抵抗断面が異なる

- ・ベント支持による主桁の架設

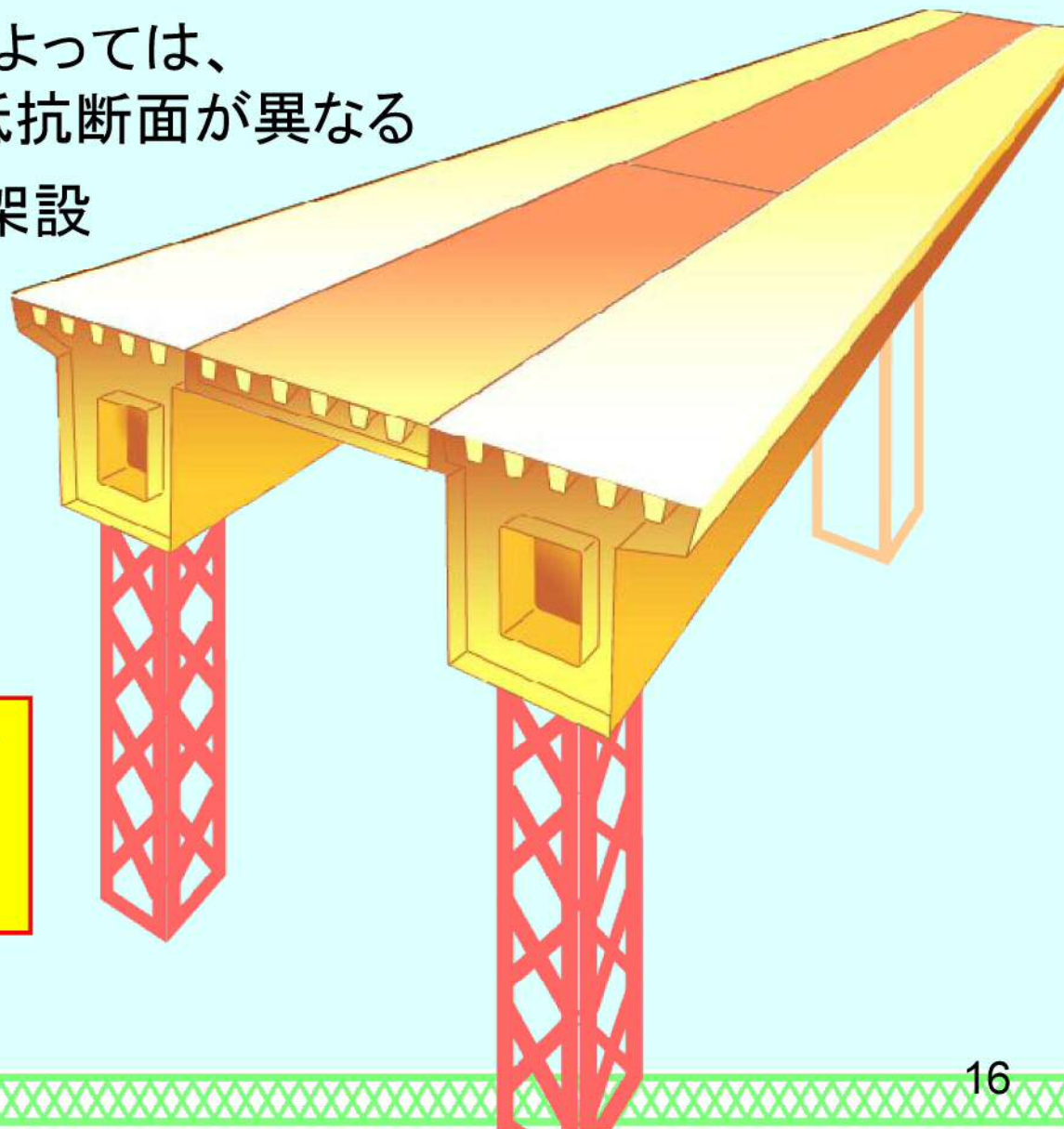


- ・ベント撤去



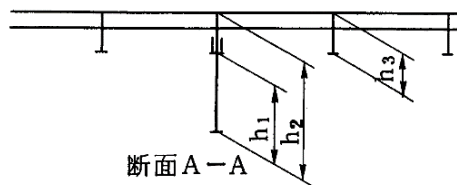
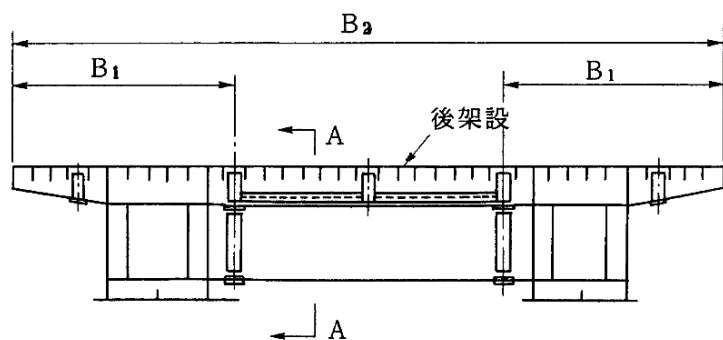
- ・中鋼床架設

中鋼床版の自重の抵抗断面には中鋼床版断面は含むことができない。

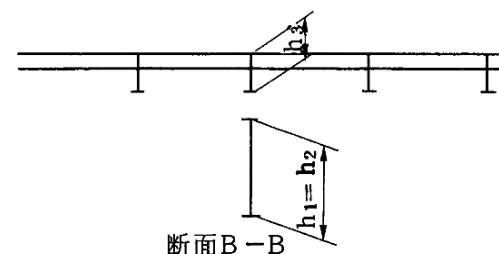
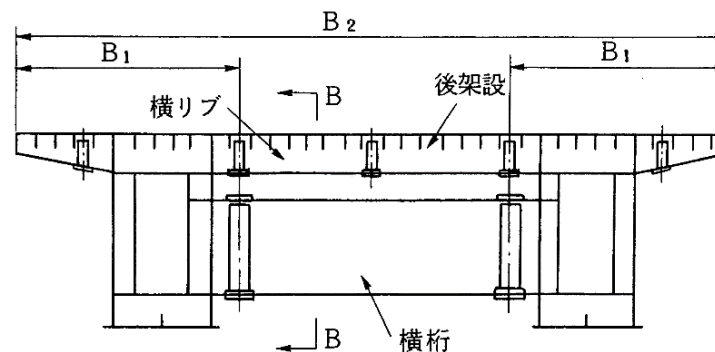


鋼床版桁設計時の留意点

中鋼床版は後架設できる構造としているのが一般的



(a) 一体構造



(b) 分離構造

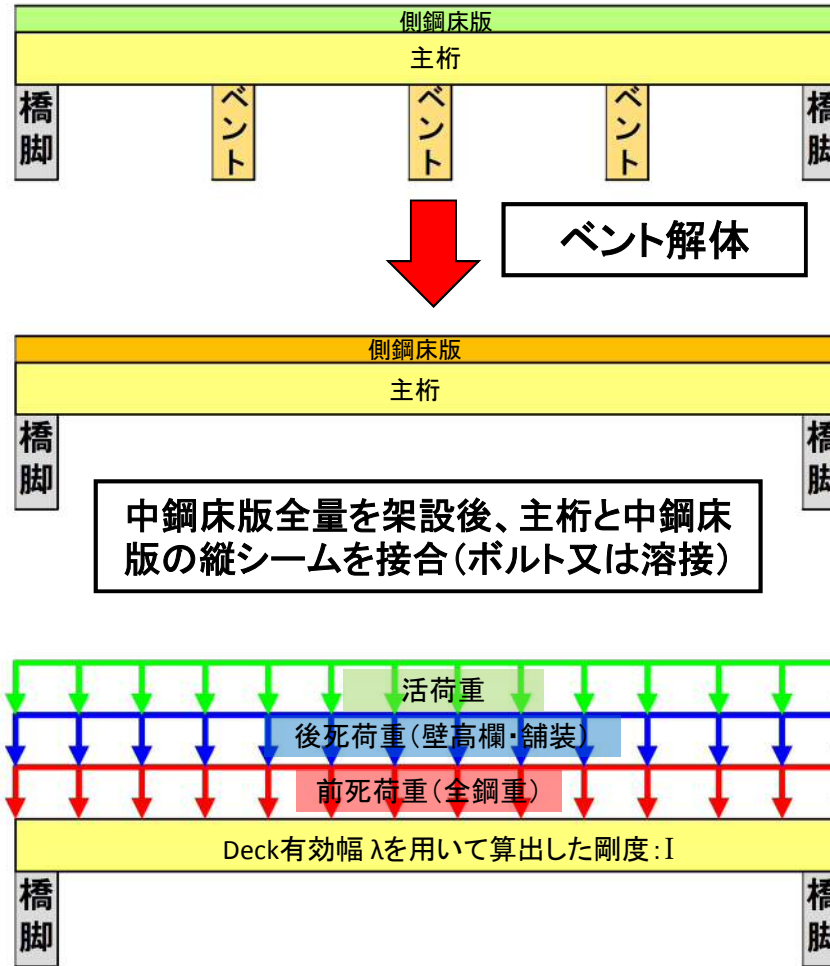
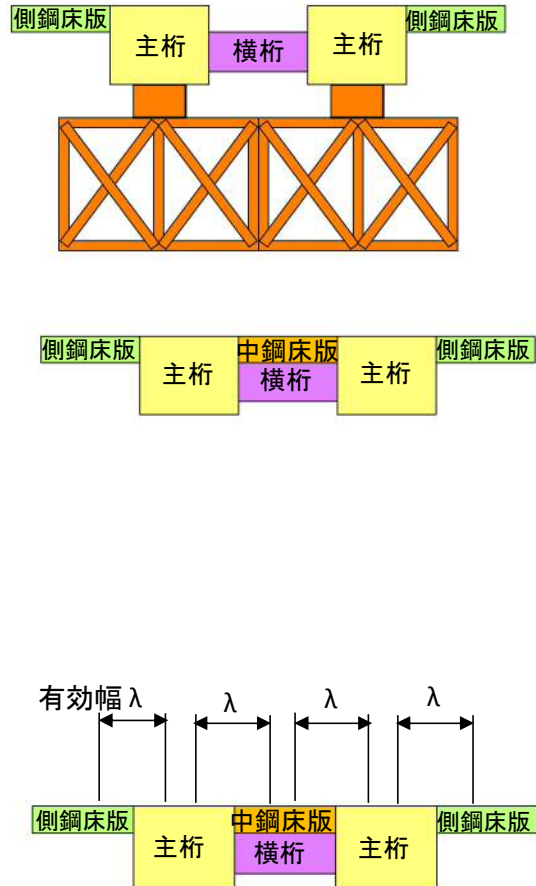
架設ステップで横桁剛度も異なるので解析時に配慮

- h_1 : 架設系の横桁高
- h_2 : 完成系 "
- h_3 : 横リブ高
- B_1 : 架設系のデッキプレート幅
- B_2 : 完成系 "

鋼床版桁設計時の留意点

ベント解体の施工性向上のため、中鋼床版架設前にベント解体

断面図



ベント支持状態で主桁、横桁、側鋼床版を架設

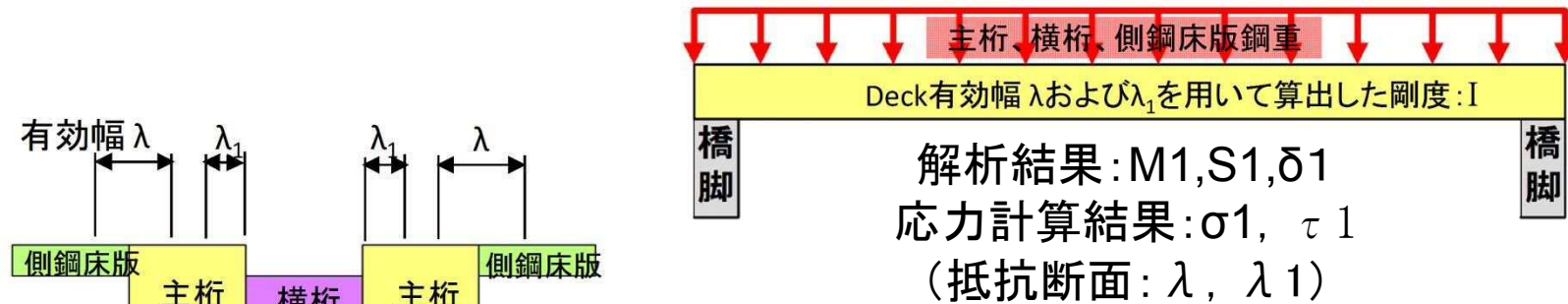
ベント解体後中鋼床版を架設

完成系で解析

鋼床版桁設計時の留意点

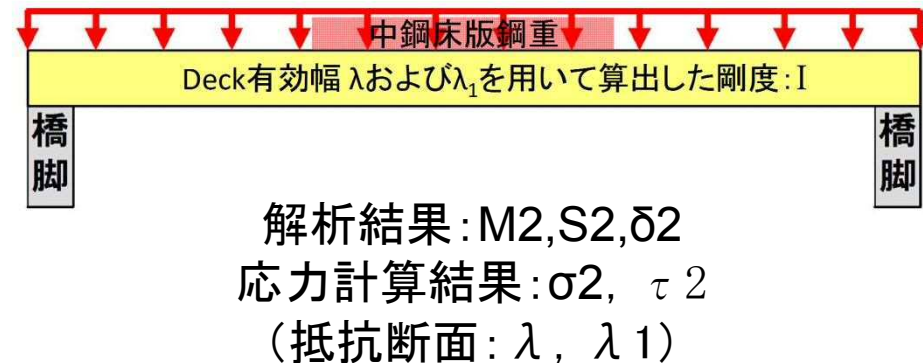
荷重ケース1 (前死荷重系)

荷重ケース1-1



キャンバー管理用にたわみ計算

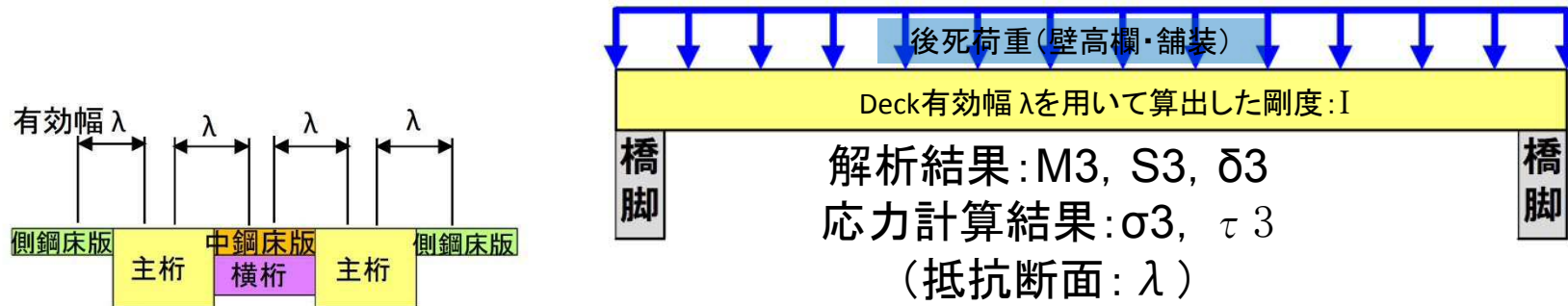
荷重ケース1-2



鋼床版桁設計時の留意点

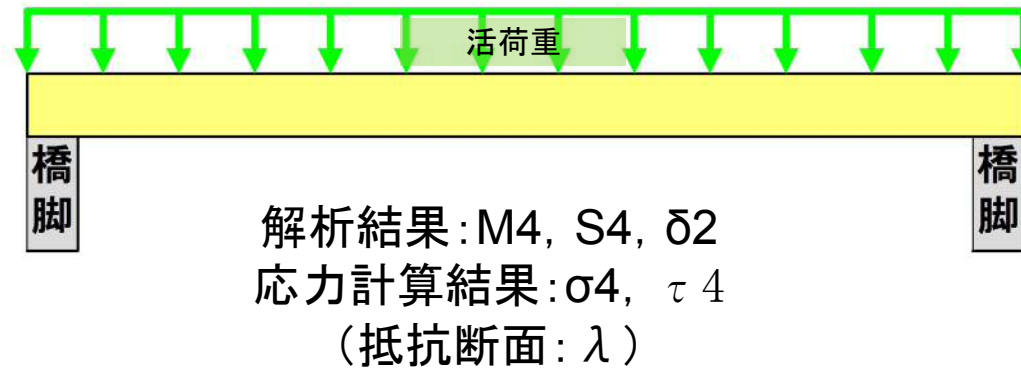
荷重ケース2 (完成系: 後死荷重 + 活荷重)

荷重ケース2-1



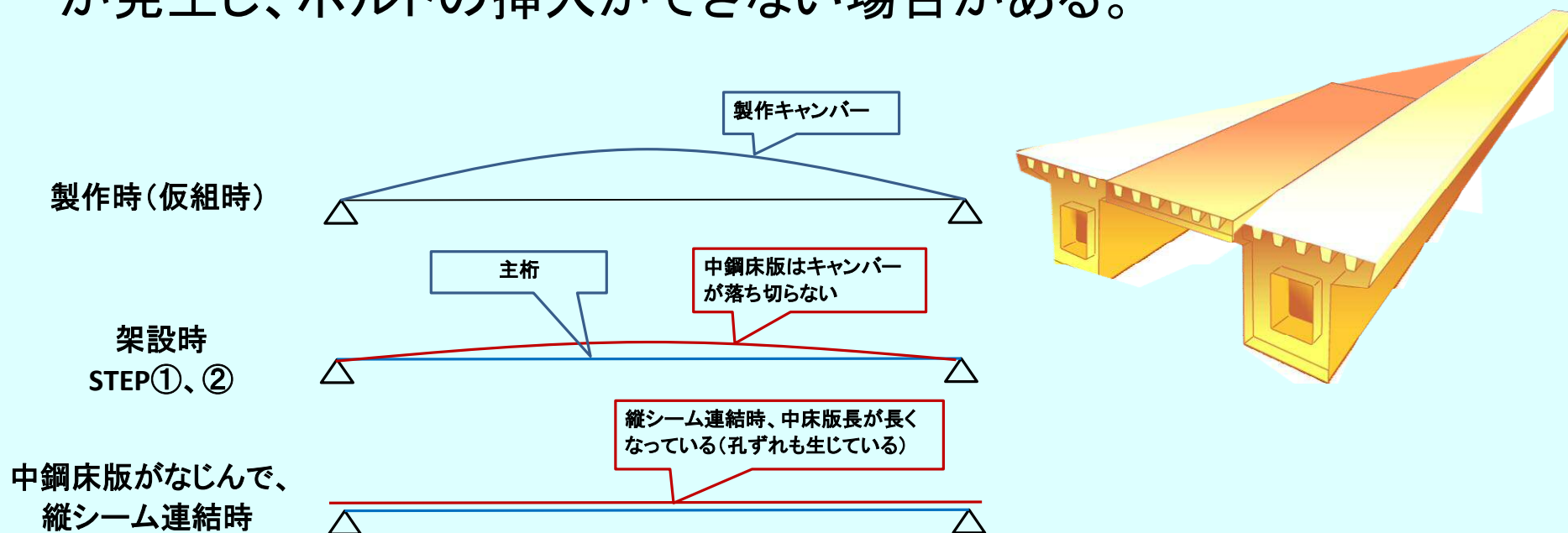
応力度は各ケースを足し合わせる。
 死荷重たわみ(カンバー)は
 $\delta_1 + \delta_2 + \delta_3$

荷重ケース2-2



鋼床版桁設計時の留意点

以上の配慮をして設計し、主桁キャンバーで鋼床版を製作した場合、架設時に中鋼床版と主桁の縦シーム(縦綴じ)で孔ずれが発生し、ボルトの挿入ができない場合がある。



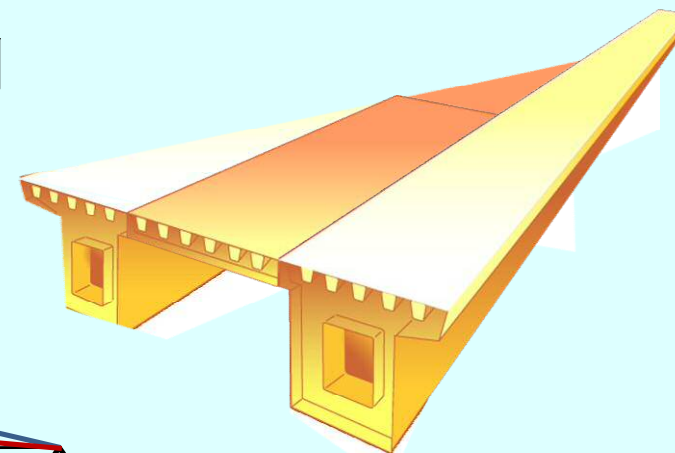
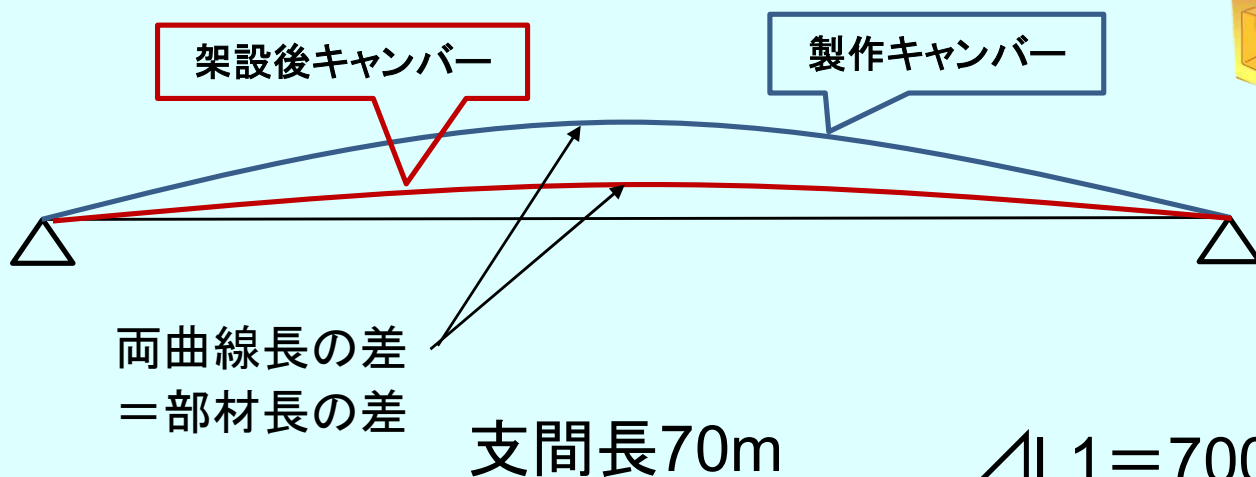
孔ずれ量の算出

1. 主桁と中鋼床版のキャンバーを放物線あるいは円弧に仮定し、弧長を計算し、その差分をボルト間隔に割り振る。
2. 主桁と中鋼床版の発生応力度からひずみ差を計算し、ボルト間隔に割り振る。

鋼床版桁設計時の留意点

架設完了時の中鋼床版の伸び量の計算例

①軸線の伸び量



$$\Delta L1 = 70002.9 - 70000.4 = 2.5\text{mm}$$

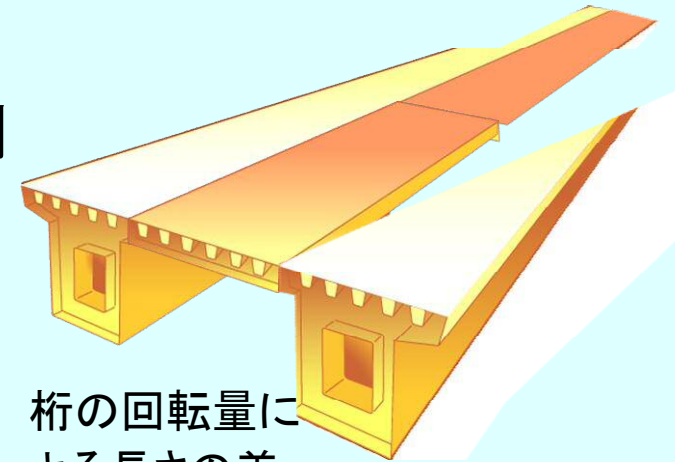
支間中央での製作キャンバー

キャンバー	主桁	側・中床版	荷重	剛度
ステップ ^o 1	125		①	I
ステップ ^o 2	52		②	I
ステップ ^o 3	99	99	③	II
合計	276	99		

鋼床版桁設計時の留意点

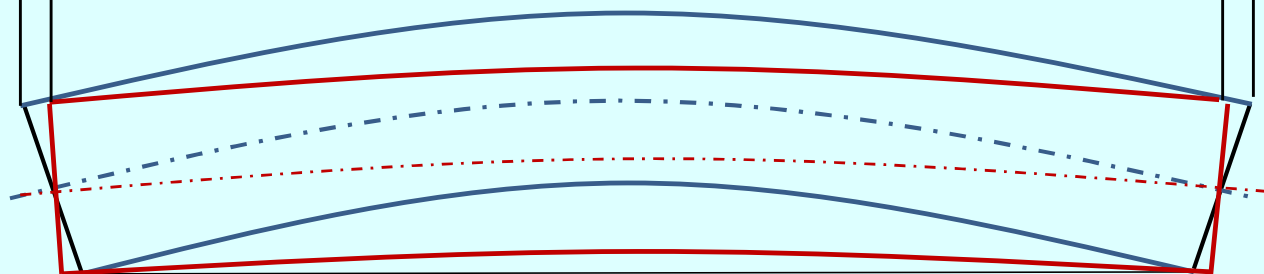
架設完了時の中鋼床版の伸び量の計算例

②回転による伸び量



桁の回転量による長さの差

$$\triangle L2/2$$



桁高2.5m

桁の回転量による長さの差

$$\triangle L2/2$$

平面格子解析値
(端支点部の回転角 : mrad)

ステップ [°] 1	6.04
ステップ [°] 2	2.51
ステップ [°] 3	4.89

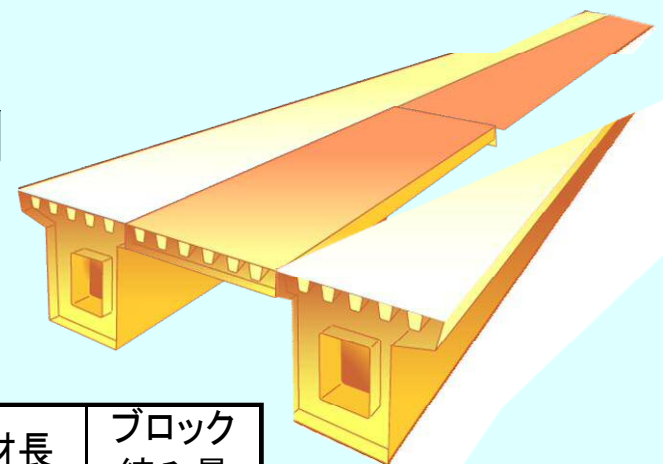
$$\triangle L2 = ((6.04 + 2.51)/1000) \times (2500/2) \times 2 = 21.4\text{mm}$$

$$\begin{aligned} \text{鋼床版面での長さの差} &= \triangle L1 + \triangle L2 \\ &= 2.5 + 21.4 = 23.9\text{mm} \end{aligned}$$

鋼床版桁設計時の留意点

架設完了時の中鋼床版の伸び量の計算例

発生応力度からひずみ量を算出する方法



G-1 部位	ジョイント位置応力度 (上フランジ)			ブロック中 中央応力度 ①+② N/mm ²	ひずみ ε	部材長 l mm	ブロック 縮み量 Δl mm
	① N/mm ²	② N/mm ²	①+② N/mm ²				
S1-J1	31	13	44	22	0.00011	6875	0.8
J1-J2	53	22	75	60	0.00030	7500	2.2
J2-J3	67	28	95	85	0.00043	7500	3.2
J3-J4	70	29	99	97	0.00049	8750	4.2
J4-J5	72	30	102	101	0.00050	8750	4.4
J5-J6	70	29	99	97	0.00049	8750	4.2
J6-J7	67	28	95	85	0.00043	7500	3.2
J7-J8	53	22	75	60	0.00030	7500	2.2
J8-S2	31	13	44	22	0.00011	6875	0.8
伸び量合計							25.2

$$\epsilon = \sigma / E$$

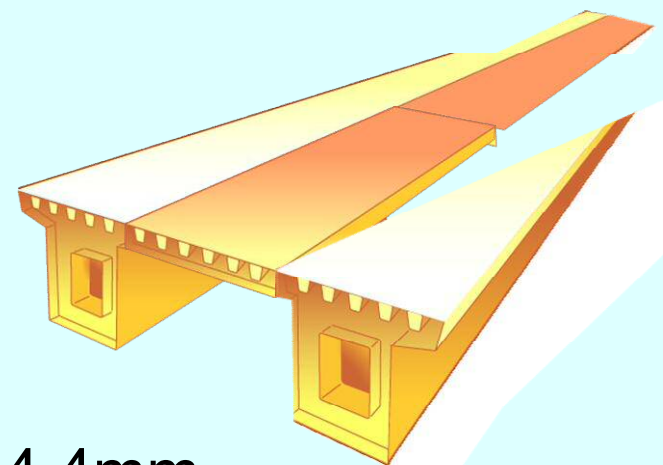
$$E = 200000 \text{ N/mm}^2$$

$$\Delta l = \epsilon \cdot l$$

計算方法1とほぼ一致

鋼床版桁設計時の留意点

部材長の差、孔ずれの製作への反映



計算結果では、ブロックでの最大長さの差は4.4mm
孔ずれ量は微小、長さの差は無視できない。

製作への反映方法

1. 計算結果をブロック数で割って、中床版を短く製作する。
2. 現場継手のルート部で調整する。
(量が小さく、ルートギャップの精度が確保できる場合のみ)

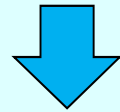
仮組立では、下記のような状態となる。

仮組立時の多点支持状態では、取り合いの精度が確認できない。

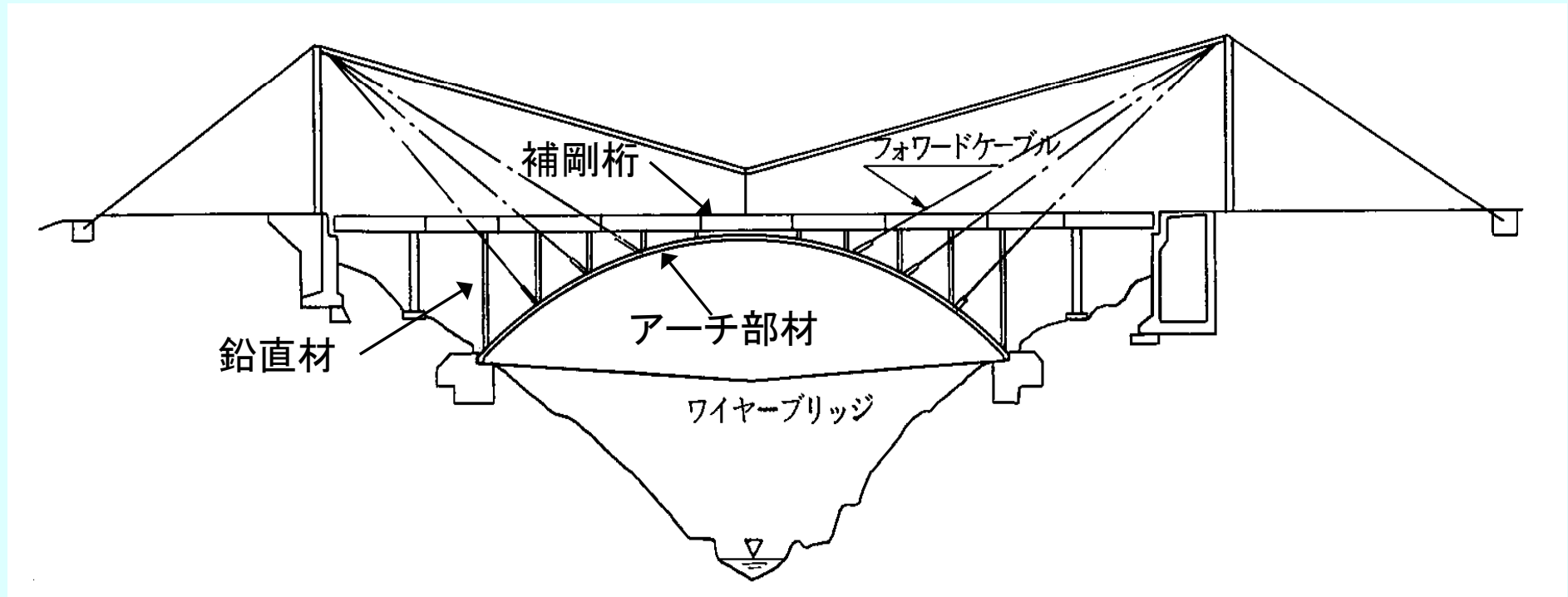
⇒ 縦綴じのボルト孔を拡大孔とする(仮組立で精度確認ができないため)

アーチのケーブルエレクション斜吊り工法での留意点

アーチ架設後補剛桁架設前に斜吊り設備を撤去するのが一般的



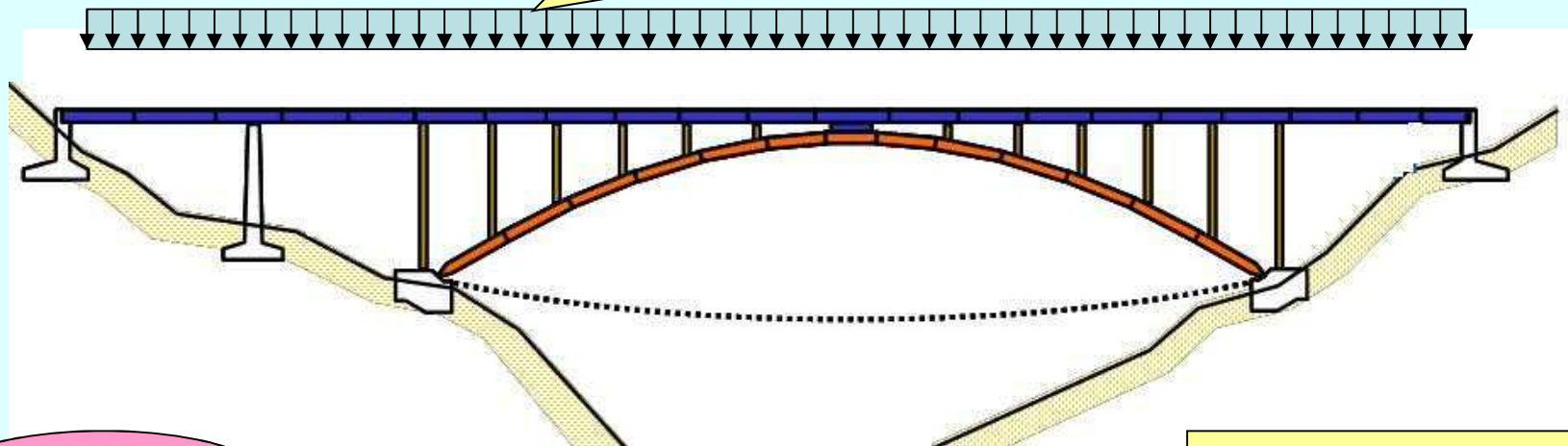
後架設鋼重はアーチ部材のみで持たせる



アーチのケーブルエレクション斜吊り工法での留意点

ステップ1

斜吊りケーブル解放後、補剛桁の自重はアーチのみに载荷

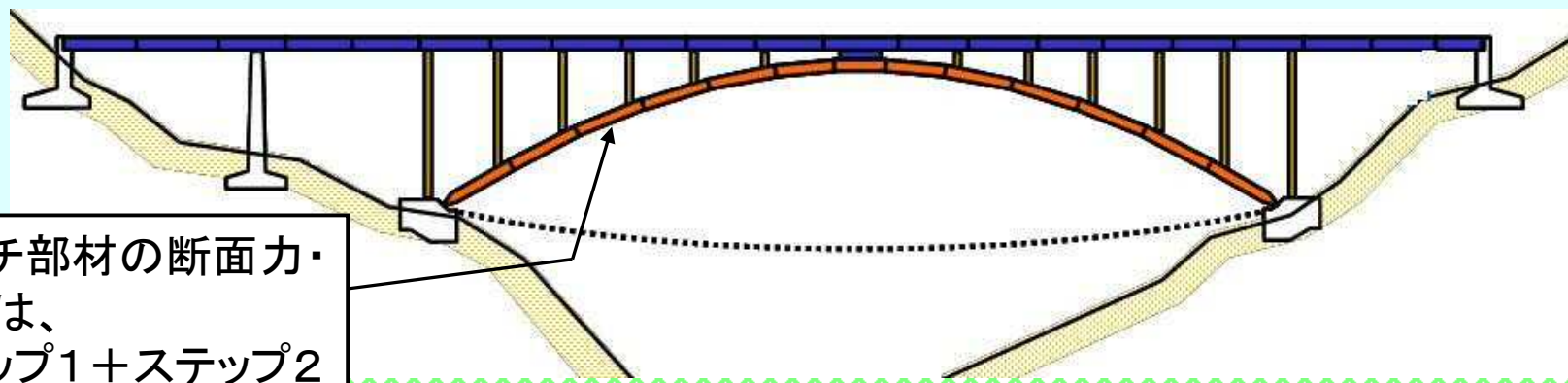


ステップ2

架設完成系

架設完了以降の荷重は完成系に载荷

アーチ部材の断面力・変位は、ステップ1+ステップ2



2. 架設時の補強設計・架設時の留意事項

◆構造解析は完成系で対応

◆架設時の断面力の違い、局部的な補強などを実施する必要がある

生じる場合あり

送り出し工法

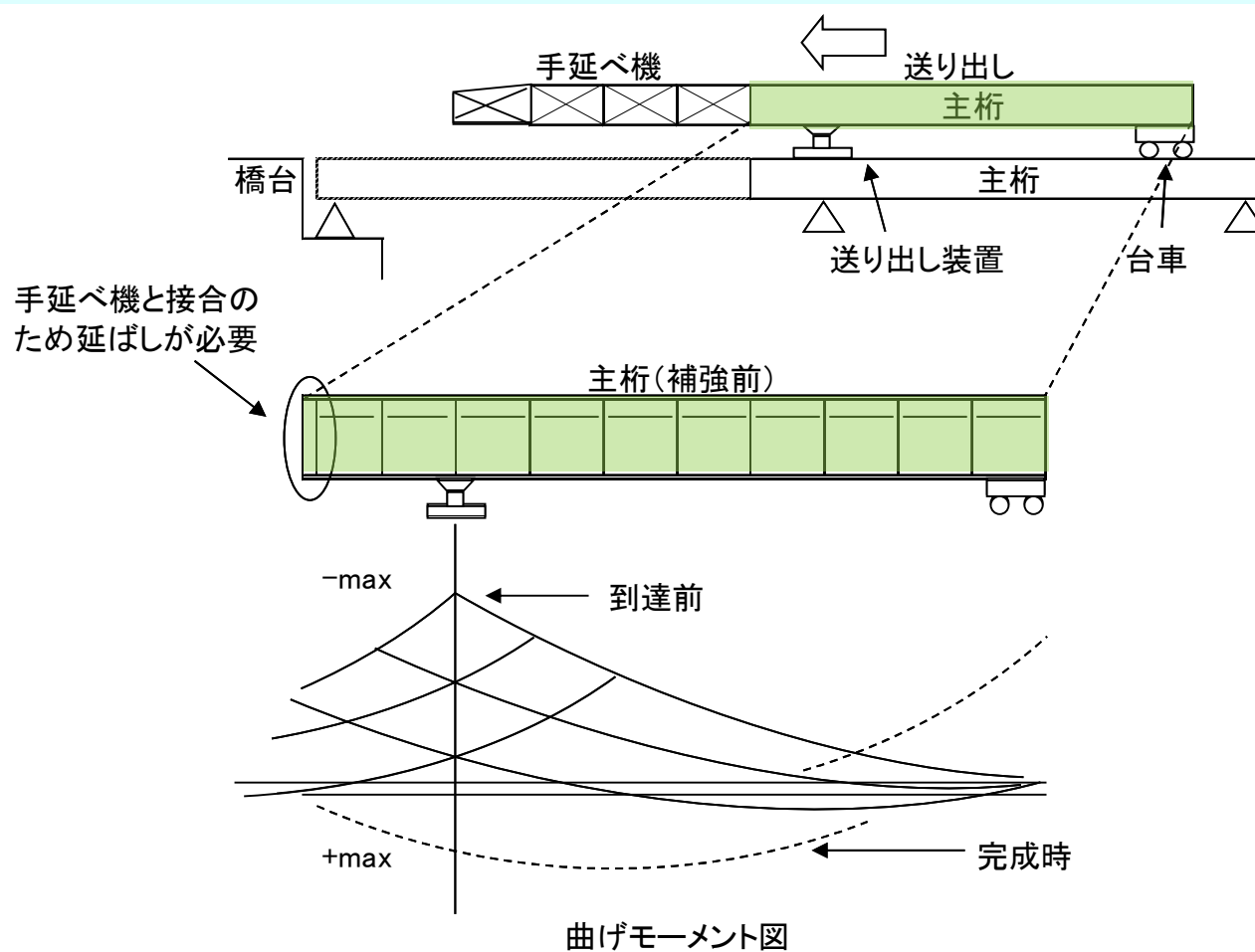
ベント受け点の補強

支点条件

問題点：架設時の断面力による設計照査を要す

→場合によっては補強による荷重増にてカンバー
精算を要する場合あり

送り出し工法の本体補強設計時の留意点



主桁断面の照査
腹板の座屈の照査



送り出し工法の本体補強設計時の留意点

- ・送り出しステップごとの構造解析
- ・各ブロックに作用する最大/最小断面力の抽出
- ・主桁の断面照査・**腹板の座屈照査**
- ・転倒に対する照査

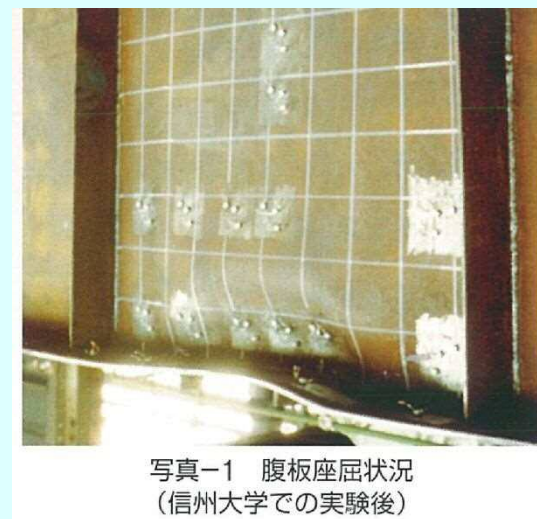
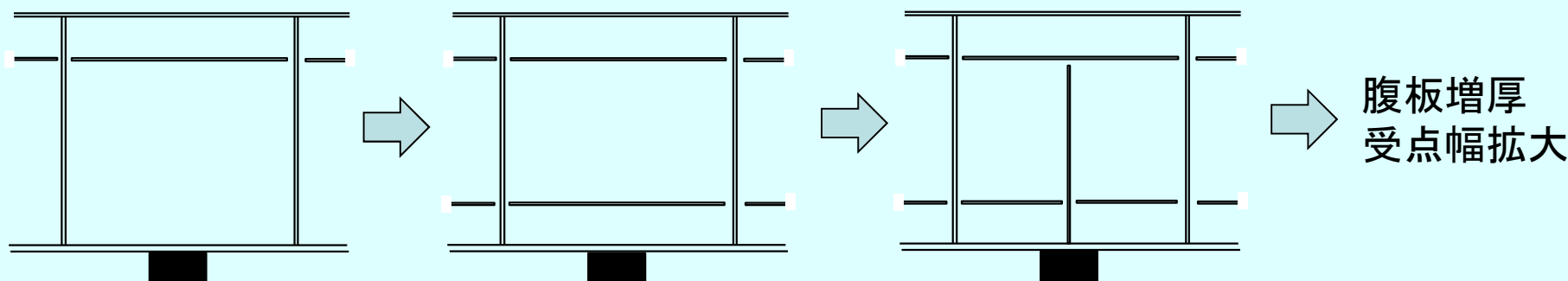


写真-1 腹板座屈状況
(信州大学での実験後)

照査式

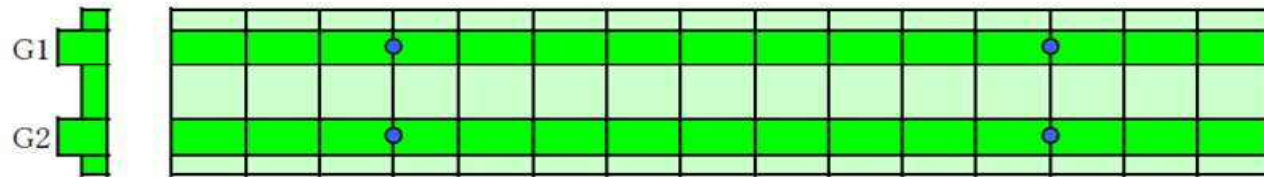
- ①鋼道路橋施工便覧(1985): 日本道路協会
- ②鋼構造の終局強度と設計(1994); 土木学会
鋼構造架設設計施工指針(2001): 土木学会
- ③鋼構造架設設計施工指針(2012): 土木学会
- ④DASt指針012(1978): ドイツ鋼構造委員会
- ⑤日本橋梁建設協会技術短信No.12提案式 など

⑤より



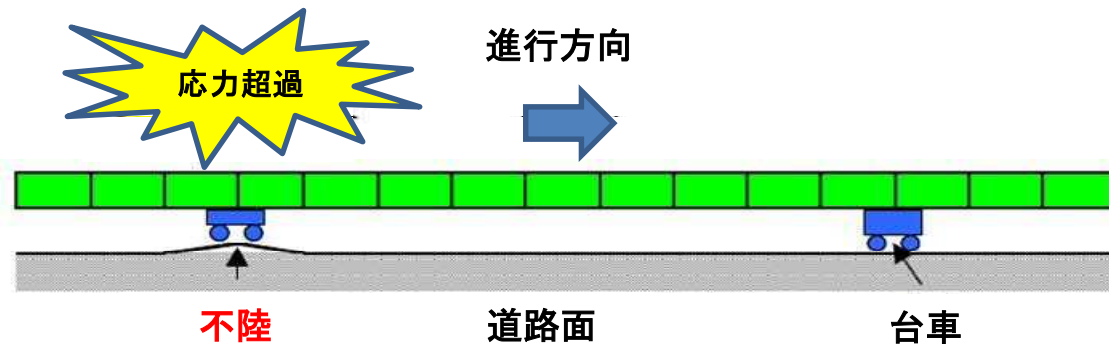
大型自走台車架設時の留意点

一括架設ブロック



後方台車の受点(2点支持)

前方台車の受点(2点支持)



大型自走台車の架設図



解析により許容沈下量を算出し、不陸の管理
または、車高自動調整による対応など

大ブロック架設の設計時の留意点

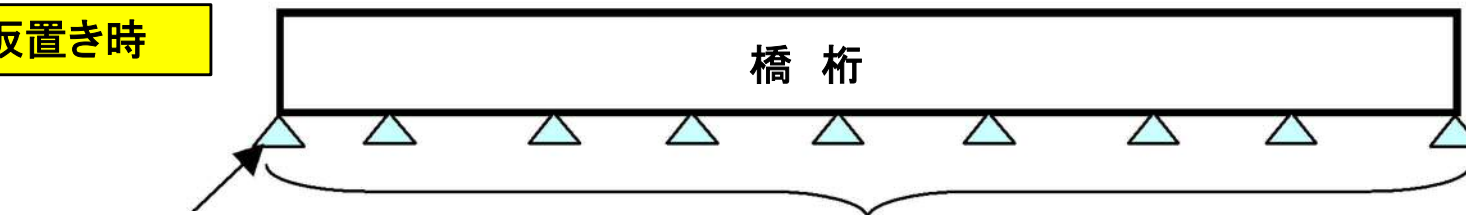
1. 大形板を使用する場合は、製鋼(ミルメーカー)と確認・調整が必要。また輸送方法も確認が必要。工場で板継溶接が必要になる場合がある。

2. 構造系が完成時と異なるため、組立て時、大ブロック吊上げ時、台船上の運搬時(船体の波による加速度考慮)、架設仮置き時、架設完了時のそれぞれについて照査する必要がある。特に、大ブロック吊上げ時においては、橋桁の吊点位置付近の局所応力、吊角度から生じる橋桁部材に発生する応力により、ウェブの増厚が必要になる場合がある。また、吊上げ時の重心位置を間違えると、事故につながる恐れがあるため、吊金具位置は慎重に検討する必要がある。

大ブロック工法では、クレーン能力限界に近い使い方をすることが多いため、吊荷重には、添加物、架設機材の他、塗料や溶接ビードの重さも加えて計算する。

大ブロック架設の設計時の留意点

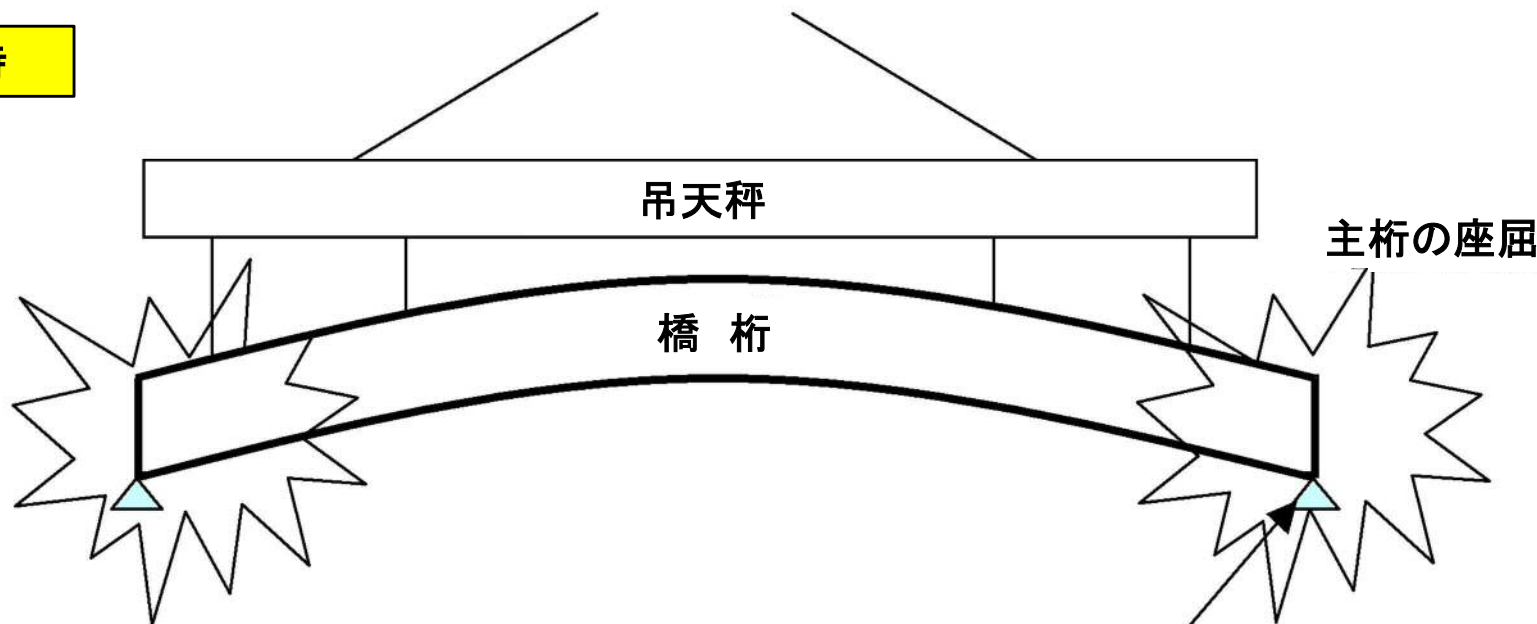
仮置き時



仮受架台

仮置き時は多点支持のため、自重の反力が分散している。

地切り時

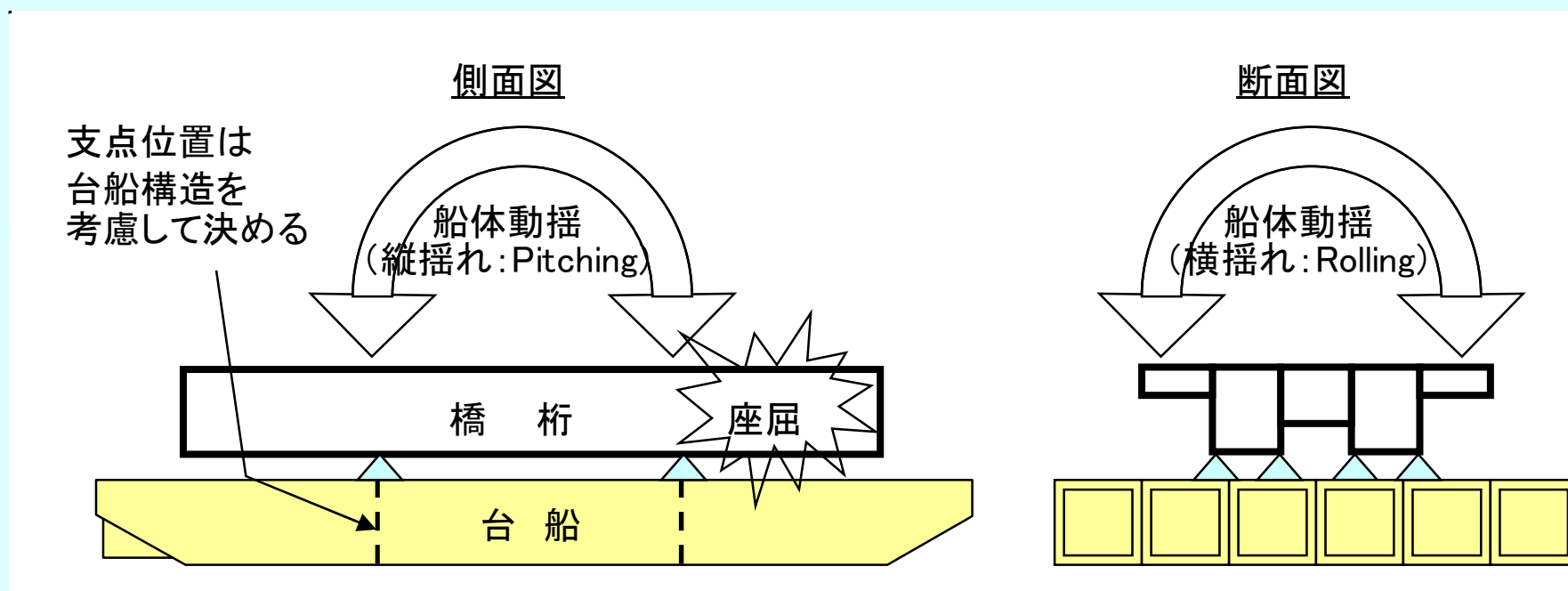


地切り時は支点が徐々に外れ、最後に残った支点到に反力が集中する。

不均等荷重(10~15%)も見込む

大ブロック架設の設計時の留意点

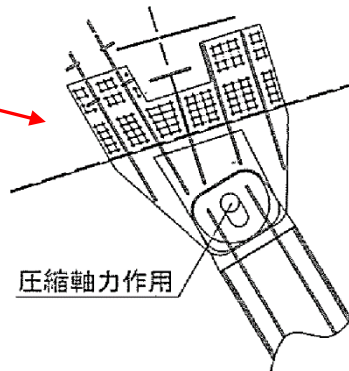
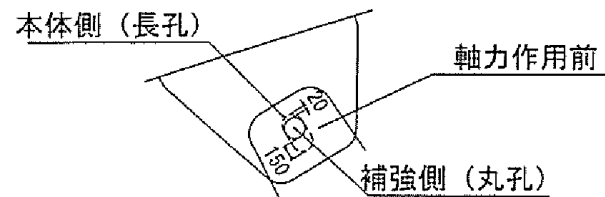
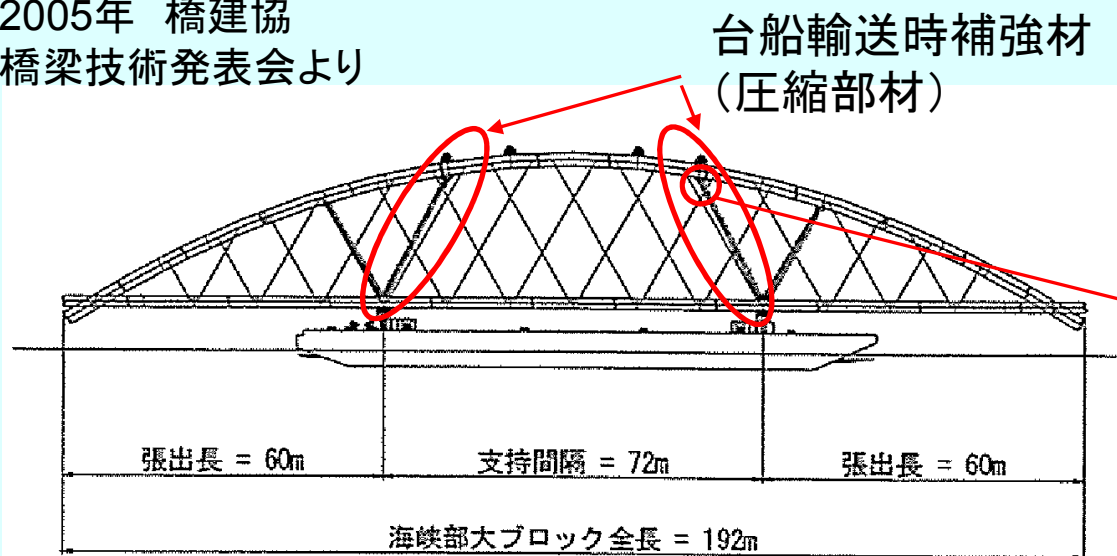
台船輸送の場合は船体の動揺により加速度が加わることで、橋桁本体に断面力が発生する。海上輸送経路決定時に、輸送業者より船体運動値を入手し、断面照査を行う必要がある。



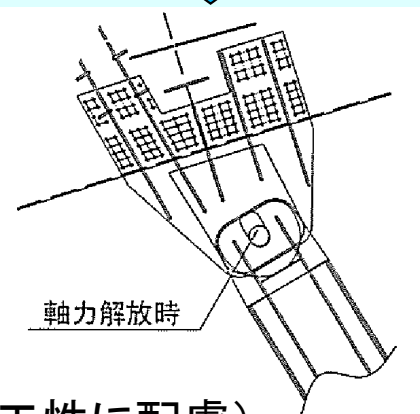
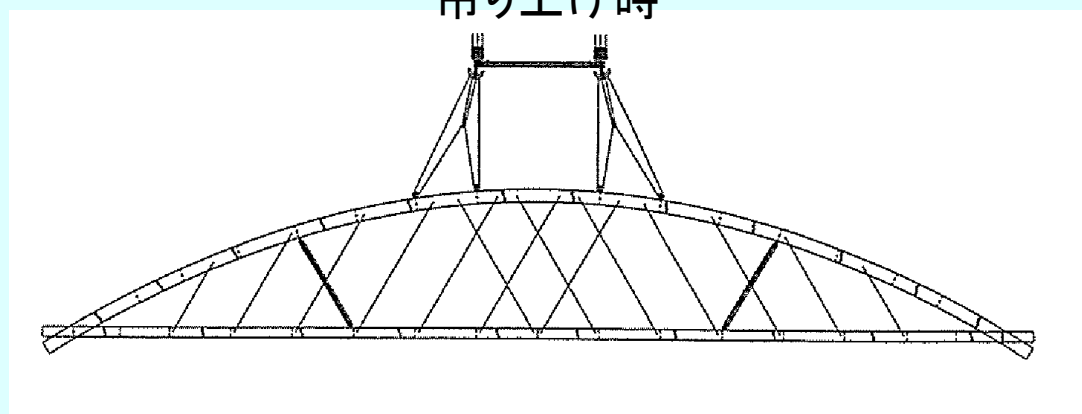
鋼橋海上(水上)架設工事マニュアル(日本橋梁建設協会)により、船体運動値より筐体に作用する加速度を算出する

大ブロック架設の設計上の工夫例(第二音戸大橋)

2005年 橋建協
橋梁技術発表会より



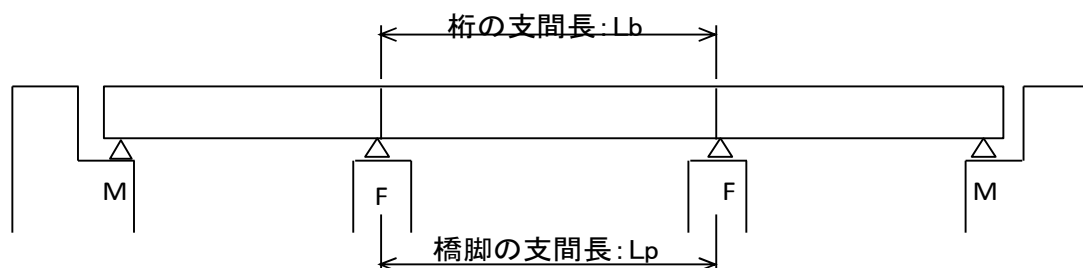
吊り上げ時



完成時に補強材に圧縮軸力が残らない工夫(撤去の施工性に配慮)

多点固定形式における設計時の留意点

架設計画(架設時期が標準温度に限定される)

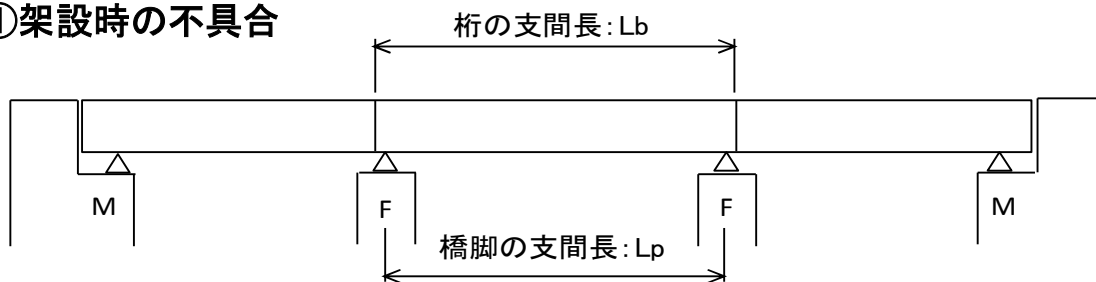


標準温度時の時だけ $L_b = L_p$ となり、上部工・支承・橋脚が取合う。

- ・架設時支承の可動化
- ・標準温度近くで固定
- ・温度差がある場合は照査

設計計算・構造検討不具合(標準温度時以外での施工が考慮されていない)

①架設時の不具合

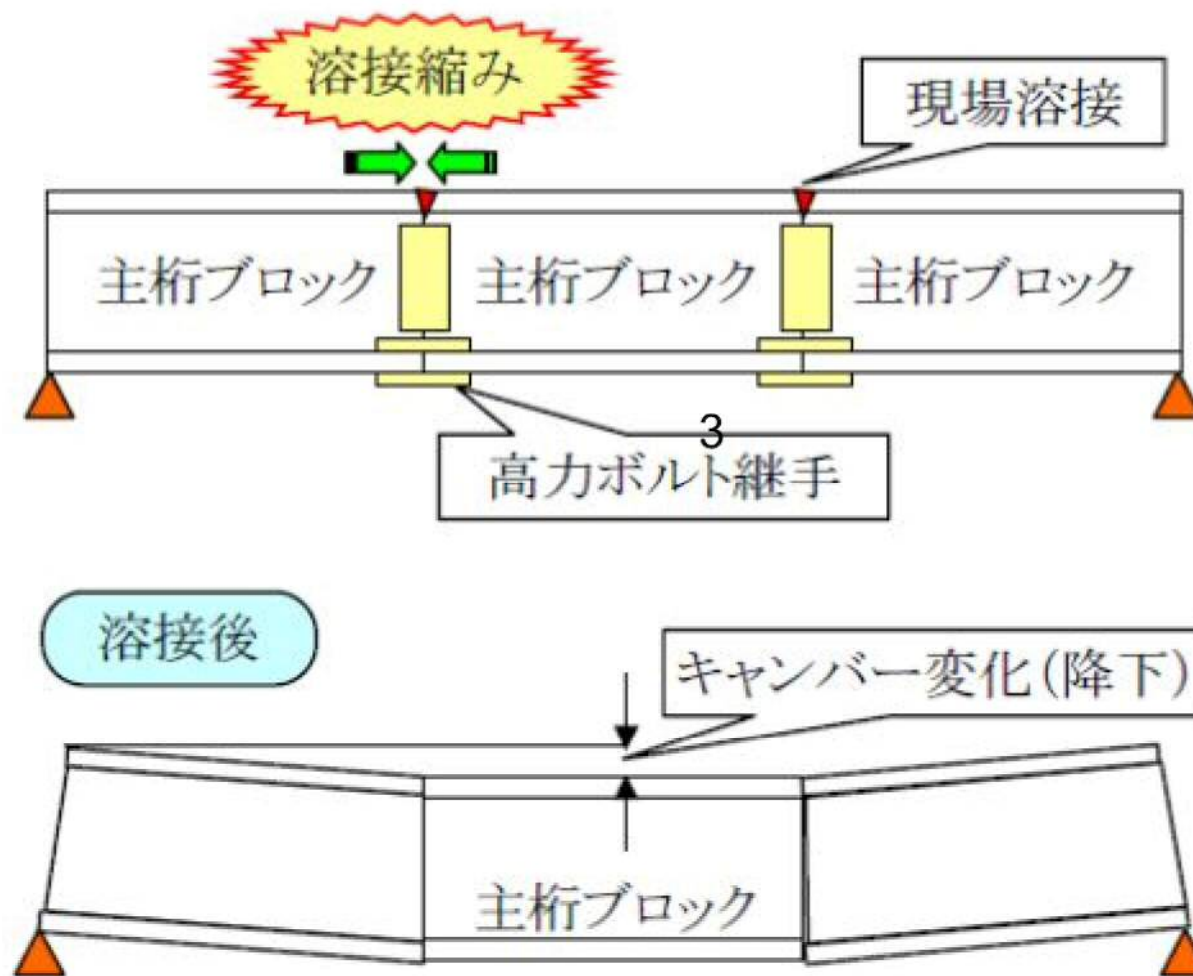


温度変化により上部工が伸びて $L_b \neq L_p$ となり、上部工・支承・橋脚が取合わない。

②完成時の不具合

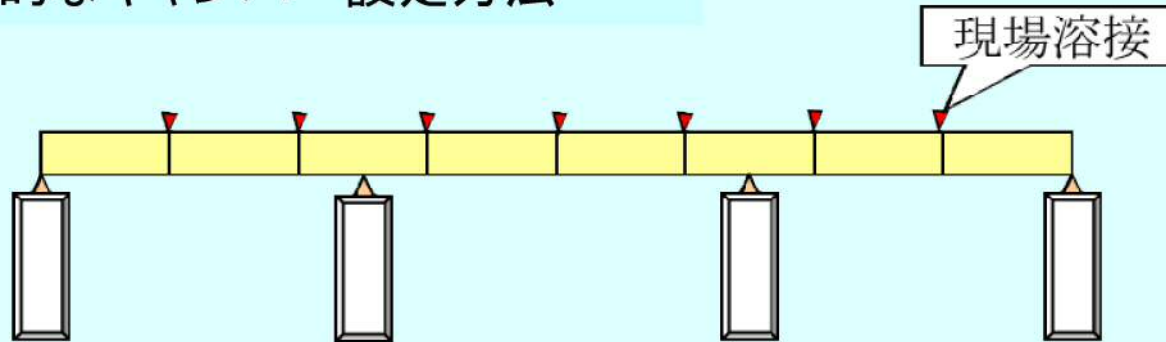


現場溶接をともなう桁での留意点 (現場溶接キャンバー設定)



現場溶接をともなう桁での留意点 (現場溶接キャンバー設定)

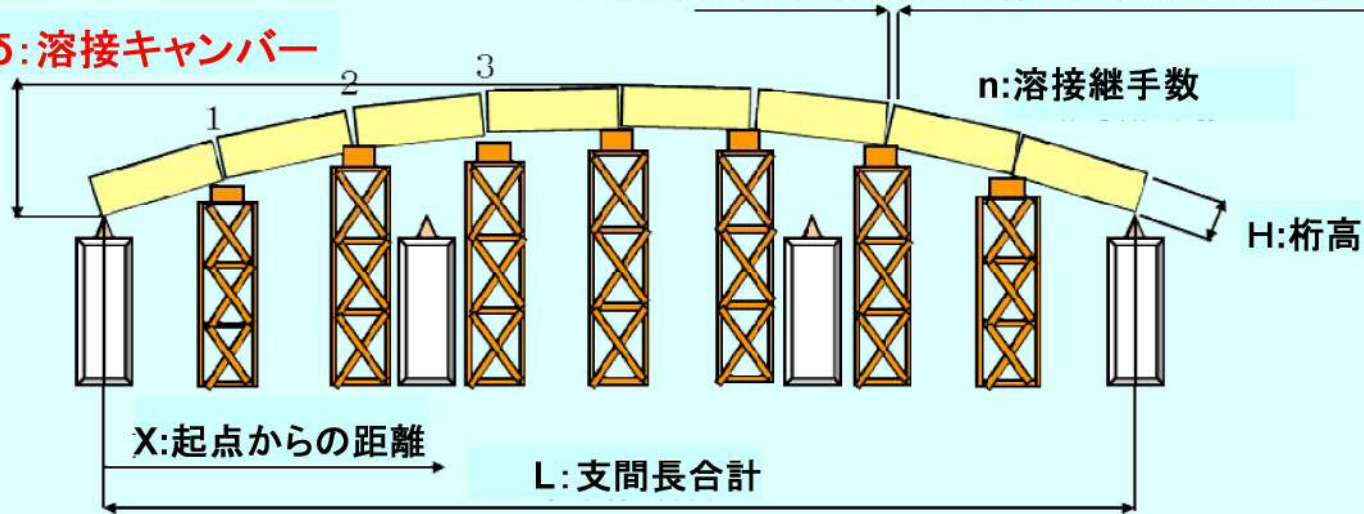
一般的なキャンバー設定方法



$$\delta = S \cdot n \cdot X \cdot (1 - X/L) / (2 \cdot h)$$

S: 収縮見込み量 (参考値: 2mm)
(日本橋梁建設協会: 鋼橋の設計と施工, 1991.2, p132)

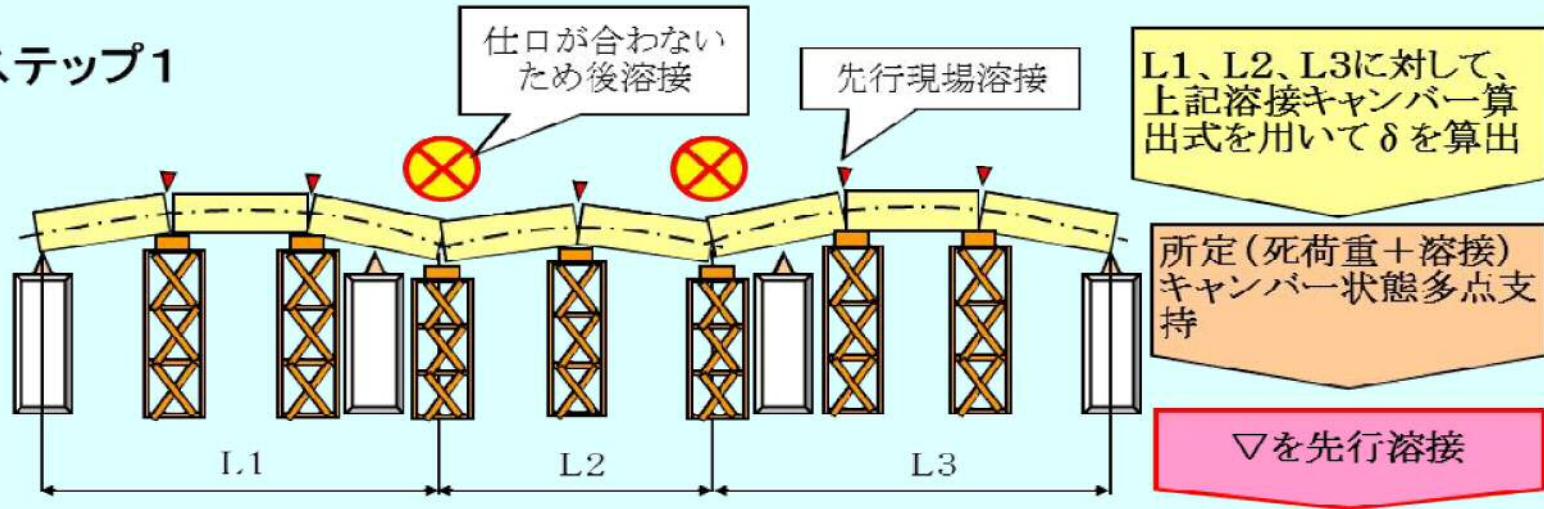
δ : 溶接キャンバー



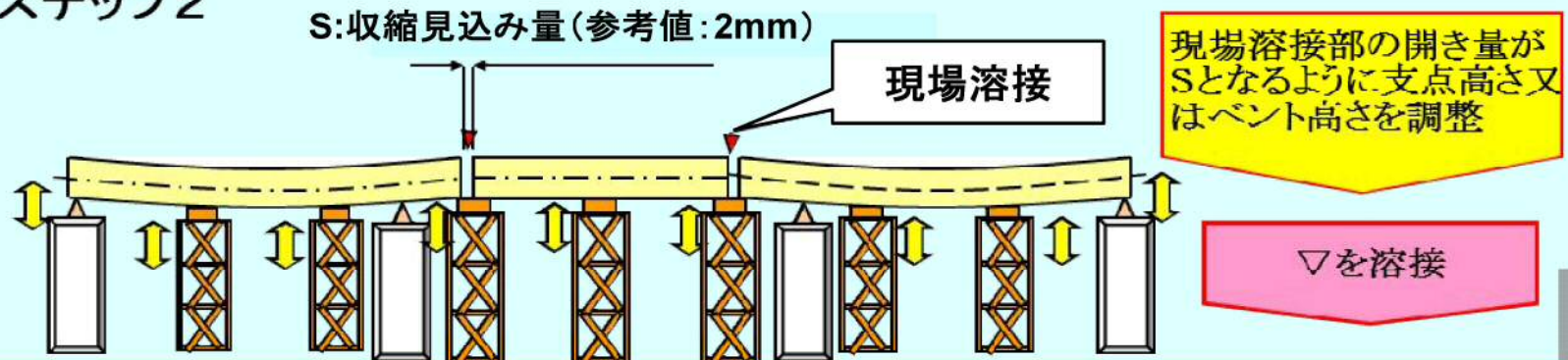
現場溶接をともなう桁での留意点 (現場溶接キャンバー設定)

一般的な上部工の現場溶接

ステップ1

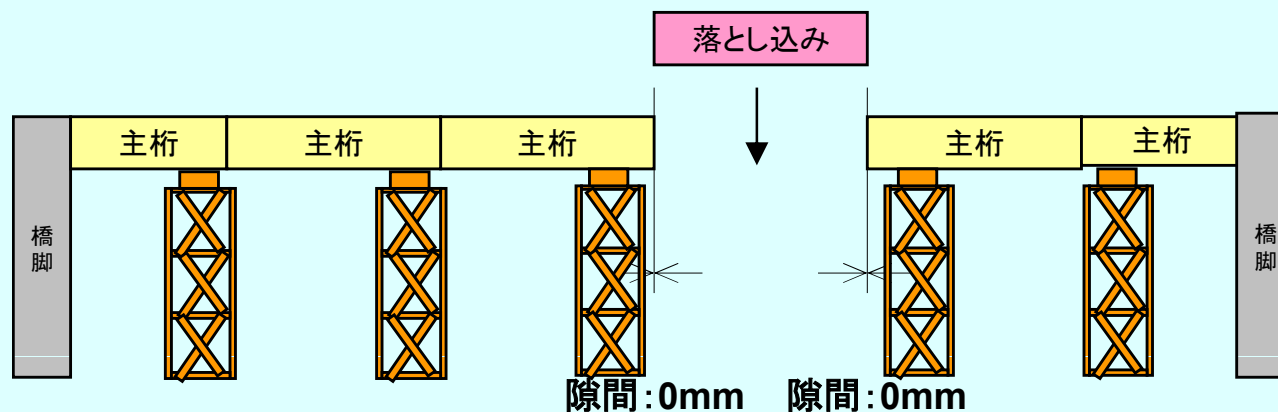


ステップ2

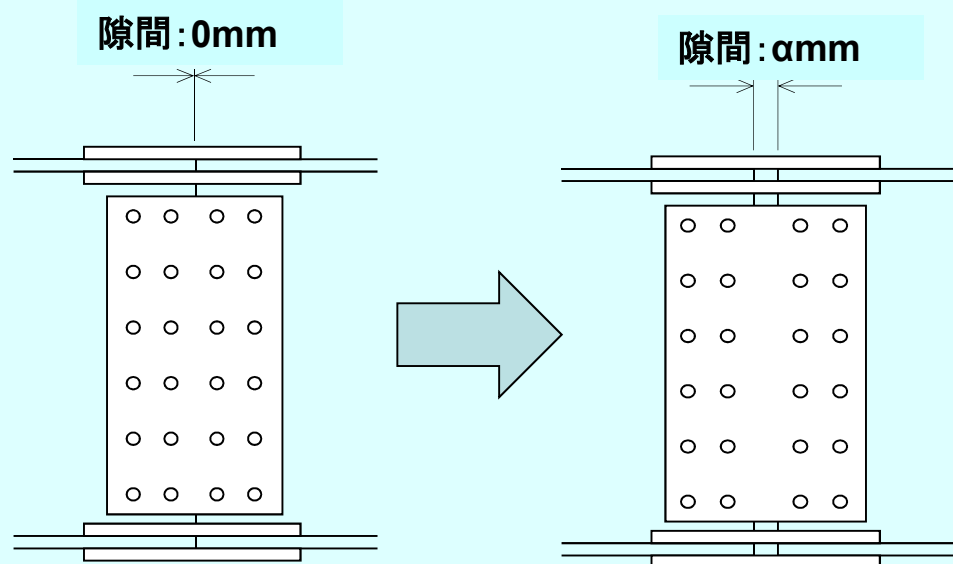


落とし込み架設を行う鋼桁架設時の留意点

落とし込み部の閉合ブロックに温度変化や施工誤差の影響を継手部に配慮されてないと架設ができない。



上下部一体構造だけでなく、鋼床版の横桁、橋脚の横梁での落とし込み架設の場合も同様

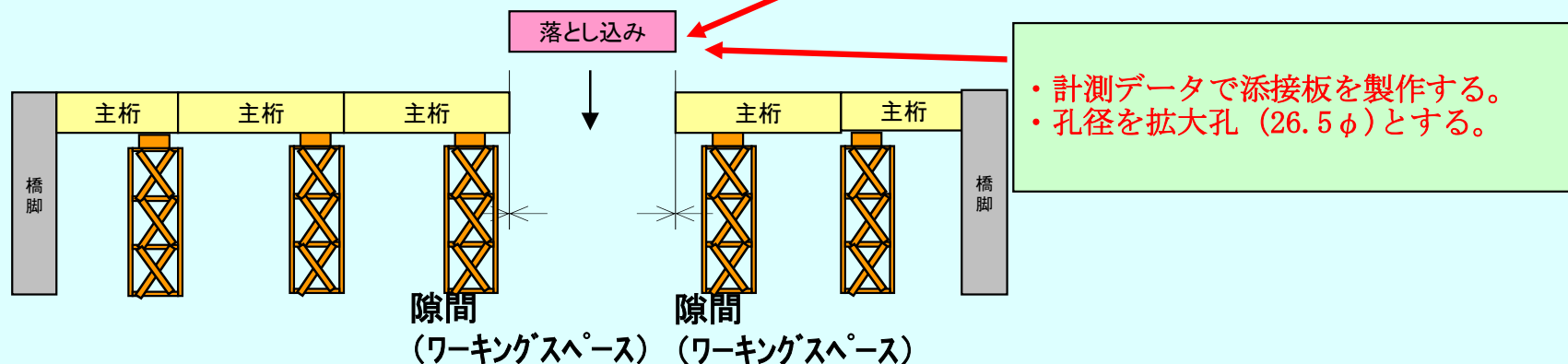


隙間は10mm程度。剛構造の場合は、10~20mmとしている。

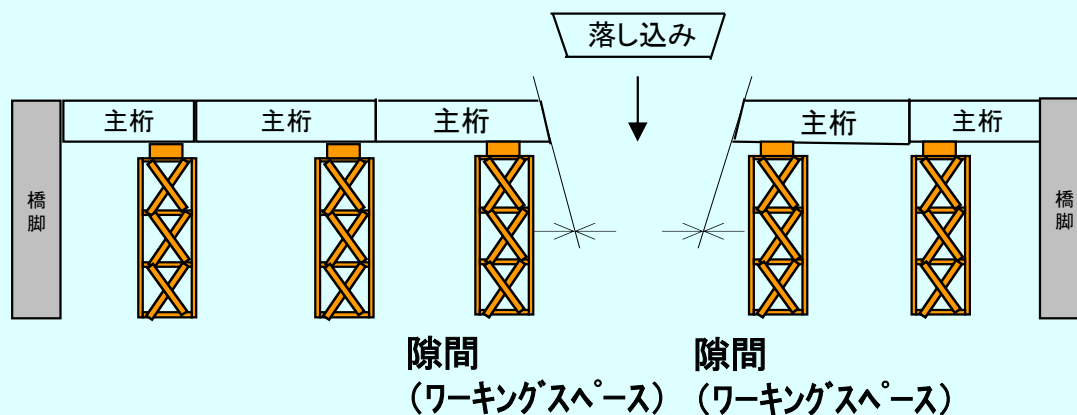
落とし込み架設を行う鋼桁架設時の留意点

閉合時の施工誤差や
温度変化対策

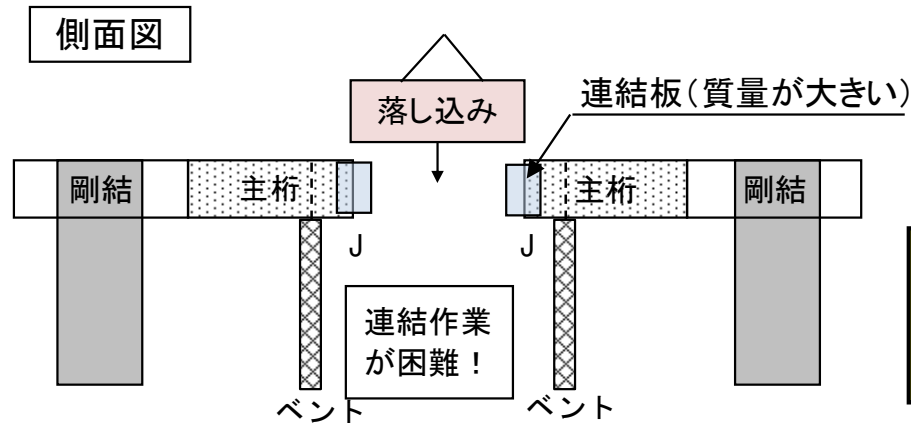
落とし込み架設直前に計測を行い、主桁ブロック端部を切断加工して調整する。



桁高が高く、一括架設などで現場調整が困難な場合は、落とし込み架設がしやすいように、腹板の継手形状を斜めにすることもある。

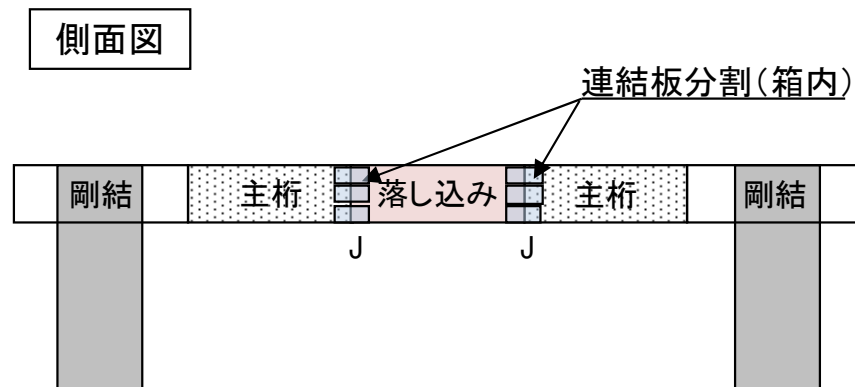


架設時を考慮した箱型断面の連結板の留意点



連結板の質量が大きい
ため、人力での格納や引き出し
作業が困難な場合

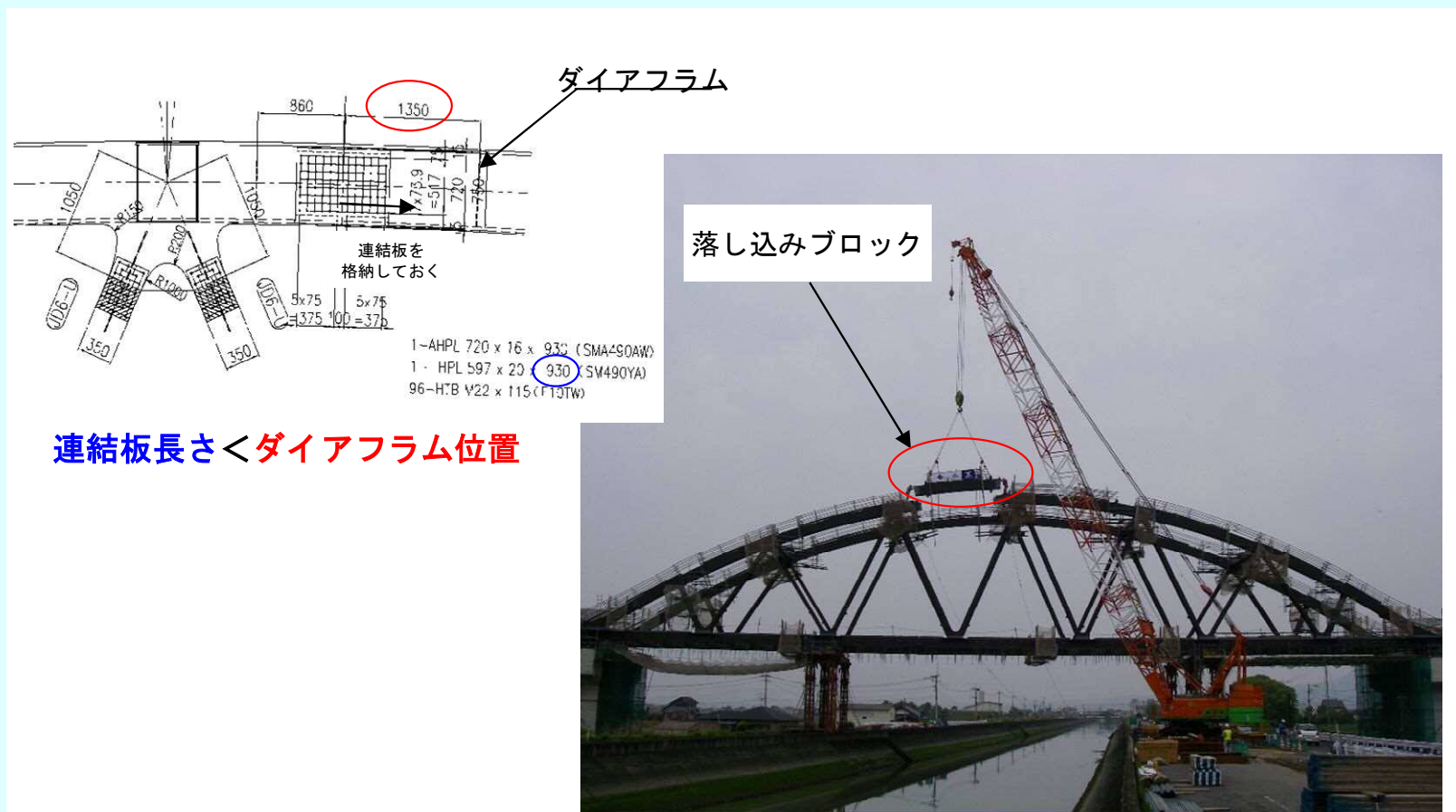
※作業性を考慮して
箱内連結板を分割



箱桁内連結板を分割すること
により、人力による連結作業性
が向上する。

架設時を考慮した箱型断面の連結板の留意点

トラス橋やアーチ橋においても、架設順序により落とし込み部材があるため、連結板を箱内に控えられるようにダイアフラムの位置に注意する必要がある。



連結板長さ < ダイアフラム位置

アーチ橋の事例

まとめ

◆架設時における設計上の留意点

○完成系ではない架設時の構造系を考える必要の有無

○鋼桁は収縮・変形する(たわむ)

- ・解析時における適切なモデル化
- ・架設時に生じる断面力・作用力の把握
- ・架設時の温度の影響の有無

○施工誤差の把握

- ・規格値内へ収めるための工夫
- ・取合い部への配慮(誤差吸収・干渉)

○架設支持点と現場継手部との関係

施工時に計画時の支持点が現場継手部と干渉するために支持点をずらしたことで、偏心載荷となり事故が生じた事例がある。

ここでの紹介はほんの一例です。

→個別条件を勘案のうえ検討願います。