

5. 落橋防止システムの高力ボルト継手の合理化検討

既設橋梁に用いられる落橋防止システムにおいて、高力ボルト本数が多い事例が見られる。このボルト本数を合理的に低減できないか、試算を行って検討した。

5-1. 耐震補強に求められる性能

新設橋の耐震設計では、設計地震動のレベルと橋の重要度に応じて、必要とされる耐震性能を確保することになるが、耐震補強においても新設橋と同等の耐震性能を確保することが基本となる。しかし、耐震補強の早期実施や予算上の制約等を踏まえ、当面の目標とする橋の耐震性能は、新設橋と同等の耐震性能を確保するのではなく、地震後の道路ネットワークの確保、他の構造物や施設への深刻な影響の防止、当該橋が被災した場合における構造条件や施工条件からの機能回復の難易度等の観点に基づき道路管理者が個別に設定することになる。

例えば、緊急輸送道路に架かる橋では、大地震の逼迫性が指摘される状況を踏まえ、道路ネットワークとして最大限の機能を発揮するために早期に耐震補強を実施する必要があるため、まず、大地震時にも落橋に至るような致命的な被害を防止できるようにすることを目標として耐震補強を行う。その次のステップとして、橋の重要度に応じて、最終目標とする耐震性能を確保できるようにさらなる耐震補強対策を計画的に実施していくという考え方もある。また、緊急輸送道路以外の路線に架かる橋では、被災した場合の代替路線の有無などの条件に応じ、また、将来的な架け替えの計画も踏まえ、当該橋に対して目標とする耐震性能を個別に設定するという考え方もある。

道路橋示方書では、上述の落橋に至るような致命的な被害を防止できる性能は耐震性能3として定義されている。また、耐震性能とは別に落橋防止システムの規定がある。落橋防止システムは、支承部の破壊により上部構造と下部構造間に大きな相対変位が生じた場合に、上部構造の落下防止を目的として設けられる構造システムである。

高力ボルト摩擦接合継手はすべることを許容していないが、耐震性能3、あるいは落橋防止システムにおいては、すべりを起こしてもその性能を満足すると考えられる。

そこで、「高力ボルト継手において適切に形状を決定すればすべりを起こした後に高い耐力が期待できる」ことに着眼し、落橋防止システムの高力ボルト継手について試設計を行った。すなわち、摩擦接合として設計された落橋防止システムのボルトの許容値を、支圧接合で許されている「摩擦接合の許容値の1.5倍」にして試算を行い、ボルト本数がどの程度低減できるか検討を行った。

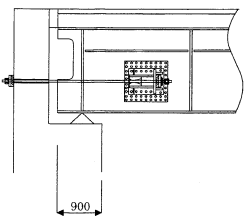
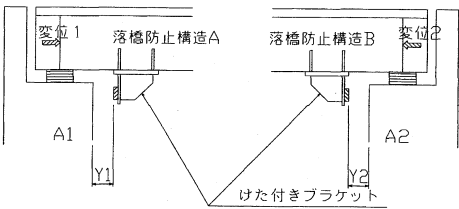
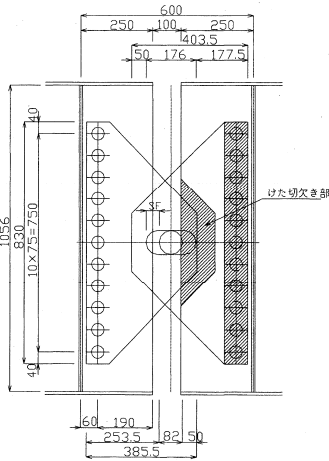
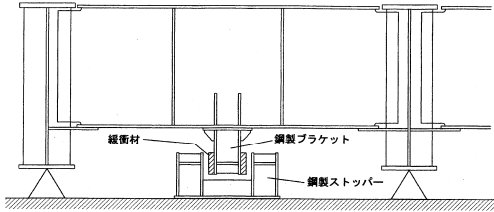
なお、道路橋示方書 H24 年度の改定により、圧膜型無機ジンクリッチを塗布した場合、ボルト1本あたりの許容力は54kNに変更になった。しかしながら、本試算は、すべて、改定以前の48kNで行っている。

5-2. 試算

ここでは、落橋防止システムにおいて摩擦接合で設計されている継手に対し、すべり後の耐力を期待（摩擦接合の許容値の 1.5 倍）して継手を設計した場合について、ボルト本数の低減および取付け部材の縮小の可否に着目して検討を行った。

なお、本検討は、「落橋防止システム設計の手引き（改訂版）平成 22 年 8 月（社）日本橋梁建設協会」¹⁾（以下、落防システムの手引き）の設計計算例をもとに表 5-2-1 に示す 4 ケースについて試算した。

表 5-2-1 試算ケース及び結果

試算 1	試算 2
落橋防止構造（橋台～主桁の PC ケーブル方式） 	落橋防止構造（上部工突起形式） 
・ブラケット寸法よりボルト本数が決まっているため、ボルト本数は低減できない。	・ボルト本数が低減できる。(26→20 本) ・上記に伴いブラケット寸法も縮小できる。
試算 3	試算 4
落橋防止構造（連結板 1 ピン形式） 	変位制限構造（鋼製ブラケット形式） 
・ボルト本数が低減できる。(11→7 本) ・上記に伴い連結板寸法も縮小できる。 （連結板の寸法はウェブ母材の照査で決定するため、ボルト本数低減分の縮小とはならない。）	・引張接合によりボルト本数が決まっているため、ボルト本数は低減できない。

5-2-1. 試算 1：落橋防止構造（橋台胸壁～主桁のPCケーブル方式）

(1) 「落防システムの手引き」での計算

3) ブラケット取付部の設計

取付ボルトは高力ボルトM22(S10T)とし、図-6.1.1に示すようにボルト群の中立軸の両側に2列以上配置する。このとき、ボルトの許容応力としては、割増し係数1.5を考慮する。

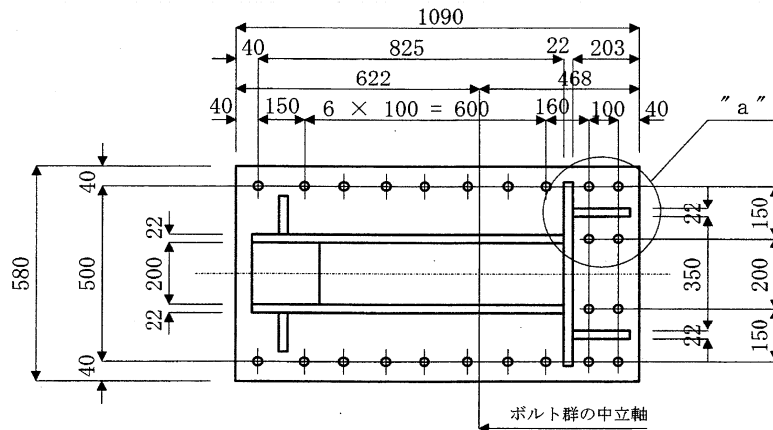
摩擦接合に対する照査

ボルト1本に作用する力 ρ

$$\rho = \frac{H_F}{n_b} = \frac{612.5 \times 10^3}{24} = 25521 \text{ (N)} < \rho_a = 1.5 \times 48000 = 72000 \text{ (N)}$$

ρ_a ：摩擦接合用高力ボルト1本あたりの許容力

nb:ボルト本数



(2) 摩擦接合での必要ボルト本数

$$n = \frac{H_F}{\rho_a} = \frac{612.5}{1.5 \times 48} = 8.5 \text{ (本)}$$

ρ_a ：摩擦接合用高力ボルト1本あたりの許容力 = 48 (kN)

(3) すべり後の耐力を期待した場合の必要ボルト本数

$$n = \frac{H_F}{\rho'_a} = \frac{612.5}{1.5 \times 72} = 5.7 \text{ (本)}$$

ρ'_a ：すべり後の耐力を期待した場合の摩擦接合用高力ボルト1本あたりの許容力 = $1.5 \times 48 = 72$ (kN)

(4) 試算結果

ボルト本数は、摩擦接合の場合は9本必要であるが、すべり後の耐力を期待した場合は6本にすることができる。ただし、実際のボルト本数はブラケット寸法より決定しているため、ボルト本数は低減できない。

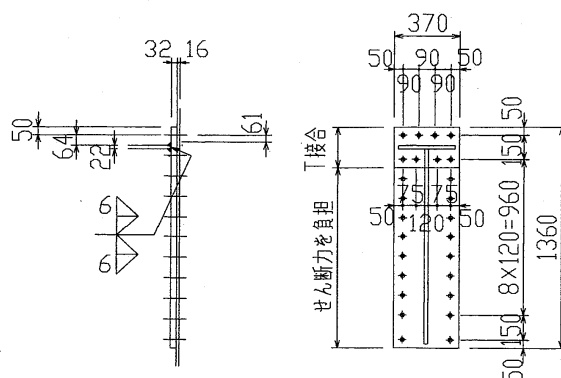
5-2-2. 試算2：落橋防止構造（上部工突起形式）

(1) 「落防システムの手引き」での計算

(3) ブラケット取付部の設計

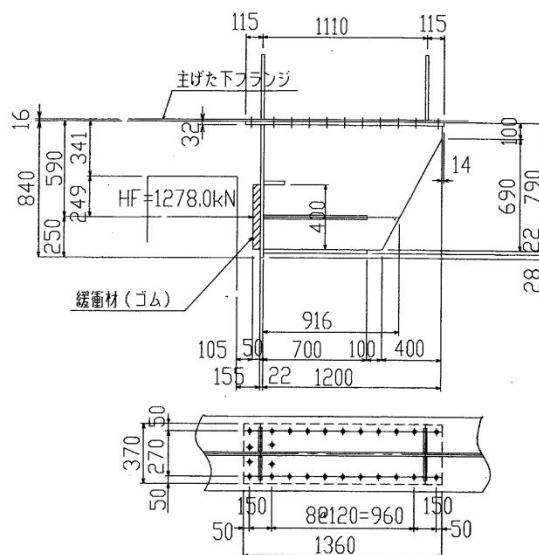
ブラケットは、高力ボルトM22(S10T)により主げたの下フランジ下面に連結する。
 (社)日本鋼構造協会発行の「橋梁用高力ボルト引張接合設計指針(案)」により短締め形式の高力ボルト引張接合として、下図のようにエンドプレート接合をフランジの両側のボルト1列のみを有効とし、この部分のエンドプレートをTフランジに置換してT接合と考えて設計する。

なお「橋梁用高力ボルト引張接合指針」は平成16年8月31日に改訂されているが、ここでは旧手法により、てこ反力を算出する。



(2) ブラケットの設計

ブラケットを構成するプレートは十分な剛性を持たせるため、最小板厚を22mmとし、SM400材を使用する。



断面力

$$M = HF \cdot h = 1278.0 \times 0.590 = 754.0 \text{ (kN}\cdot\text{m)}$$

$$S = HF = 1278.0 \text{ (kN)}$$

断面計算

		$A(\text{cm}^2)$	$y(\text{cm})$	$A \cdot y(\text{cm}^3)$	$A y^2 + I_0(\text{cm}^4)$
1-Flg PL	330×22	72.6	61.1	4436	271060
1-Rib PL	1200×22	264.0			316800
$\Sigma =$		336.6		4436	587860

$$e = 4436 \div 336.6 = 13.18 \text{ (cm)}$$

$$I = 587860 - 336.6 \times 13.18^2 = 529388 \text{ (cm}^4\text{)}$$

$$y_t = 120.0 \div 2 - 13.18 + 2.2 = 49.02 \text{ (cm)}$$

$$y_c = 120.0 \div 2 + 13.18 = 73.18 \text{ (cm)}$$

$$\sigma_t = M \div I \cdot y_t$$

$$= 754.0 \times 10^3 \div (529388 \times 10^4) \times 49.02 \times 10$$

$$= 70 \text{ (N/mm}^2\text{)} < \sigma_a = 1.5 \times 140 = 210 \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

$$\sigma_c = M \div I \cdot y_c$$

$$= 754.0 \times 10^3 \div (529388 \times 10^4) \times 73.18 \times 10$$

$$= 104 \text{ (N/mm}^2\text{)} < \sigma_a = 1.5 \times 140 = 210 \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

$$\tau = S \div A$$

$$= 1278.0 \times 10^3 \div (264.0 \times 10^2)$$

$$= 48 \text{ (N/mm}^2\text{)} < \tau_a = 1.5 \times 80 = 120 \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

合成応力度

$$(\sigma_c \div \sigma_a)^2 + (\tau \div \tau_a)^2 \leq 1.2$$

$$= (104 \div 210)^2 + (48 \div 120)^2 = 0.41 < 1.2$$

荷重集中点のせん断応力度

$$\tau = S \div A$$

$$= 1278.0 \times 10^3 \div (916 \times 22)$$

$$= 63 \text{ (N/mm}^2\text{)} < \tau_a = 1.5 \times 80 = 120 \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

(2) 摩擦接合での必要ボルト本数

$$n = \frac{H_F}{\rho_a} = \frac{1278}{1.5 \times 48} = 17.8 \text{ (本)}$$

ρ_a : 摩擦接合用高力ボルト 1 本あたりの許容力 = 48 (kN)

(3) すべり後の耐力を期待した場合の必要ボルト本数

$$n = \frac{H_F}{\rho_a} = \frac{1278}{1.5 \times 72} = 11.9 \text{ (本)}$$

ρ'_a : すべり後の耐力を期待した場合の摩擦接合用高力ボルト 1 本あたりの許容力 = $1.5 \times 48 = 72$ (kN)

(4) ブラケットの設計

断面計算

			A (cm ²)	y (cm)	A・y (cm ³)	A・y ² +I ₀ (cm ⁴)
1-Flg PL	330 × 22		72.6	49.1	3565	175054
1-Rib PL	960 × 22		211.2	0.0	0	162202
	Σ	=	283.8		3565	337256

$$\begin{aligned} e &= 3565 / 283.8 = 12.56 \text{ cm} \\ I &= 337256 / 283.8 \times 12.56^2 = 292482 \text{ cm}^4 \\ y_t &= 96.0 / 2 - 12.56 + 2.2 = 37.64 \text{ cm} \\ y_c &= 96.0 / 2 + 12.56 = 60.56 \text{ cm} \end{aligned}$$

応力度

$$\begin{aligned} \sigma_t &= M / I \cdot y_t \\ &= 754 \times 10^6 / (292482 \times 10^4) \times 37.64 \times 10 \\ &= 97 \text{ N/mm}^2 \leq \sigma_a = 1.5 \times 140 = 210 \text{ N/mm}^2 \quad \dots OK \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_c &= M / I \cdot y_c \\ &= 754 \times 10^6 / (292482 \times 10^4) \times 60.56 \times 10 \\ &= 156 \text{ N/mm}^2 \leq \sigma_a = 1.5 \times 140 = 210 \text{ N/mm}^2 \quad \dots OK \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tau &= S / A \\ &= 1278 \times 10^3 / (211 \times 10^2) \\ &= 61 \text{ N/mm}^2 \leq \tau_a = 1.5 \times 80 = 120 \text{ N/mm}^2 \quad \dots OK \end{aligned}$$

合成応力度

$$\begin{aligned} &(\sigma / \sigma_a)^2 + (\tau / \tau_a)^2 \\ &= (156.1 / 210)^2 + (60.5 / 120)^2 \\ &= 0.81 \leq 1.2 \quad \dots OK \end{aligned}$$

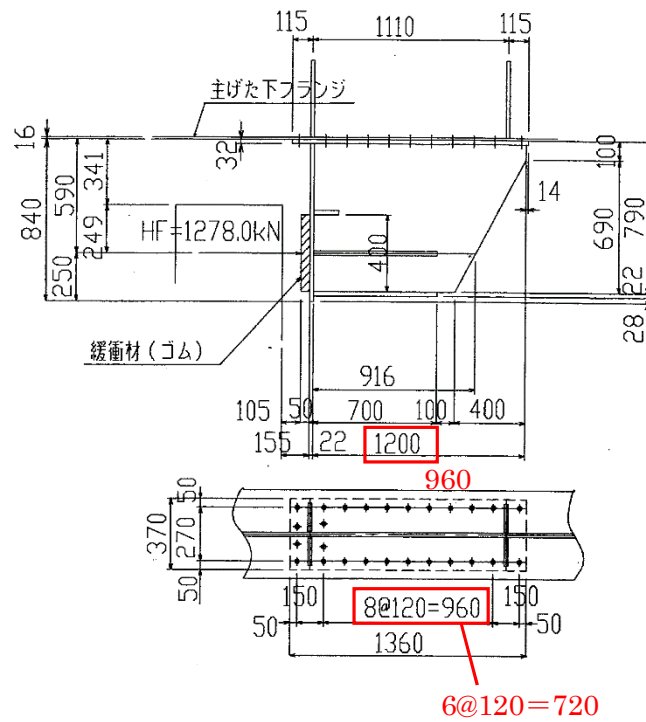
荷重集中点のせん断応力度

$$\begin{aligned} \tau &= S / A \\ &= 1278 \times 10^3 / (676 \times 22) \\ &= 86 \text{ N/mm}^2 \leq \tau_a = 1.5 \times 80 = 120 \text{ N/mm}^2 \quad \dots OK \end{aligned}$$

(5) 試算結果

ボルト本数は、摩擦接合の場合は 18 本必要であるが、すべり後の耐力を期待した場合は 12 本にすることができる。

また、ボルト本数の低減に伴い、ブラケットの橋軸寸法を 1200mm から 960mm に縮小できる。

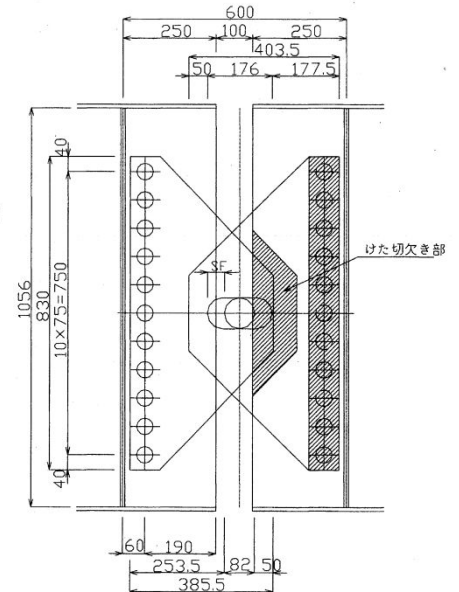


5-2-3. 試算 3：落橋防止構造（連結板 1 ピン形式）

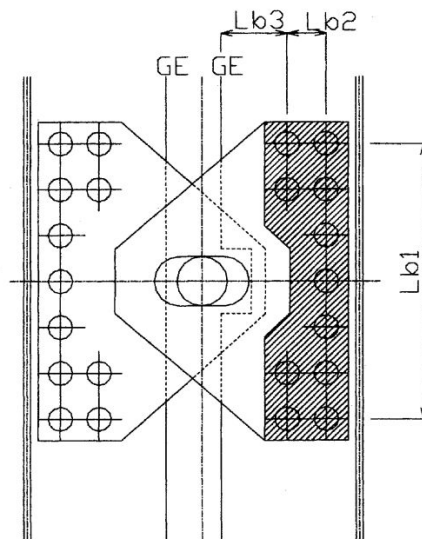
(1) 「落防システムの手引き」での計算

(8) 高力ボルトの照査(材質S10T)

$$\begin{aligned}
 & \text{高力ボルト径} && 22 \text{ (mm)} \\
 & \text{高力ボルト本数} && n = 11 \text{ (本)} \\
 & \text{滑り強度の規格値} && \rho a = 1.7 \times 48 = 82 \text{ (kN)} \quad [1\text{摩擦面}] \\
 & \text{耐力照査} && Pbr = 2 \rho a \cdot n \geq HF \cdot fbs \\
 & && = 1804 \text{ (kN)} > HF \cdot fbs = 1600 \text{ (kN)}
 \end{aligned}$$



(7) ウェブ母材の照査



$$\begin{aligned}
 Lb1 : \text{鉛直方向のボルト間最縁端距離} &= 750 \text{ (mm)} \\
 n1 : \text{1列当りのボルト本数} &= 11 \text{ (本)} \\
 D1 : \text{ボルト孔径=呼び径+3mm} &= 25 \text{ (mm)} \\
 Lb2 : \text{水平方向のボルト間最縁端距離} &= 0 \text{ (mm)} \\
 Lb3 : \text{腹板縁端とボルト中心までの縁端距離} &= 190 \text{ (mm)}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Pw &= (Lb1 - n1 \cdot D1) \cdot tw \cdot \sigma b + 2 \sqrt{2} \cdot (Lb2 + Lb3) \cdot tw \cdot \sigma b / \sqrt{3} \geq HF \cdot fws \\
 &= 2827 \text{ (kN)} > HF \cdot fws = 2742 \text{ (kN)}
 \end{aligned}$$

(2) 摩擦接合での必要ボルト本数

$$n = \frac{H_F \cdot f_{bs}}{2 \rho_a} = \frac{1600}{2 \times 1.7 \times 48} = 9.8 \text{ (本)}$$

ρ_a : 摩擦接合用高力ボルト 1 本あたりの許容力 = 48 (kN)

(3) すべり後の耐力を期待した場合の必要ボルト本数

$$n = \frac{H_F \cdot f_{bs}}{2 \rho_a} = \frac{1600}{2 \times 1.7 \times 72} = 6.6 \text{ (本)}$$

ρ'_a : すべり後の耐力を期待した場合の摩擦接合用高力ボルト 1 本あたりの許容力 = $1.5 \times 48 = 72$ (kN)

(4) ウェブ母材の照査

$$P_w = (Lb1 - n1 \cdot D1) \cdot tw \cdot \sigma_b + 2\sqrt{2} (Lb2 + Lb3) \cdot tw \cdot \sigma_b / \sqrt{3}$$

$$= 2827 \text{ (kN)} > H_F \cdot f_{ws} = 2742 \text{ (kN)}$$

Lb1 : 鉛直方向のボルト間最縁端距離 = 650 (mm)

n1 : 1 列当りのボルト本数 = 7 (本)

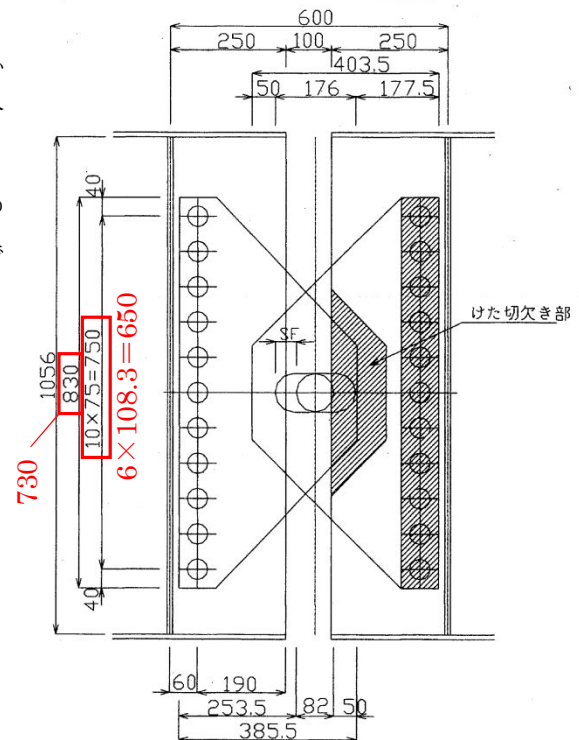
tw : 腹板厚 = 9 (mm)

σ_b : 腹板の引張強度 = 400 (N/mm²)

(5) 試算結果

ボルト本数は、摩擦接合の場合は 10 本必要であるが、すべり後の耐力を期待した場合は 7 本にすることができる。

また、ボルト本数の低減に伴い、連結板の鉛直寸法を 830mm から 730mm に縮小できる。



5-2-4. 試算 4：変位制限構造（鋼製ブラケット形式）

(1)「落防システムの手引き」での計算

3) 鋼製ブラケット取付部

図-6.8.3のように、合計 8 本の高力ボルト (M22) で端横げた下フランジに取り付ける。

$$\begin{aligned} \text{せん断力} \\ S = 279 \text{ (kN)} \end{aligned}$$

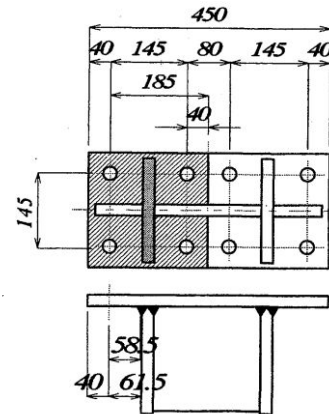
$$\begin{aligned} \text{曲げモーメント} \\ M = 69.8 \text{ (kN} \cdot \text{m)} \end{aligned}$$

1面摩擦接合としての必要ボルト本数

$$n = S / \rho_a = 279 / (1.5 \times 48) = 3.9 < 8 \text{ 本使用}$$

ここで

$$\rho_a : \text{高力ボルト1本当たりの許容力 } 48 \text{ (kN)}$$



(2) 摩擦接合での必要ボルト本数

$$n = \frac{S}{\rho_a} = \frac{279}{1.5 \times 48} = 3.9 \text{ (本)}$$

$$\rho_a : \text{摩擦接合用高力ボルト 1 本あたりの許容力} = 48 \text{ (kN)}$$

(3) すべり後の耐力を期待した場合の必要ボルト本数

$$n = \frac{S}{\rho_a} = \frac{279}{1.5 \times 72} = 2.6 \text{ (本)}$$

$$\rho'_a : \text{すべり後の耐力を期待した場合の摩擦接合用高力ボルト 1 本あたりの許容力} = 1.5 \times 48 = 72 \text{ (kN)}$$

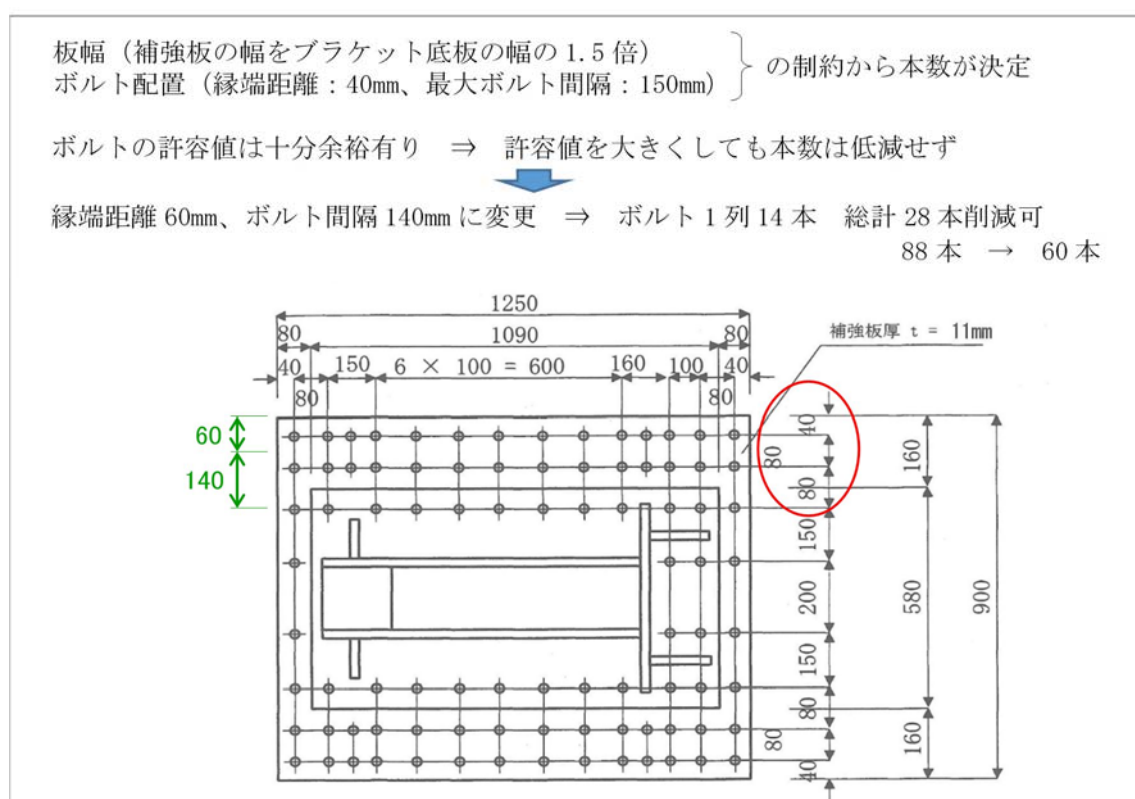
(4) 試算結果

ボルト本数は、摩擦接合の場合は 4 本必要であるが、すべり後の耐力を期待した場合は 3 本に低減できる。ただし、ボルト本数は引張接合として必要な本数より決定しているため、ボルト本数は低減できない。

よって、取付け部材も縮小できない。

5-3. 試算結果に基づく考察

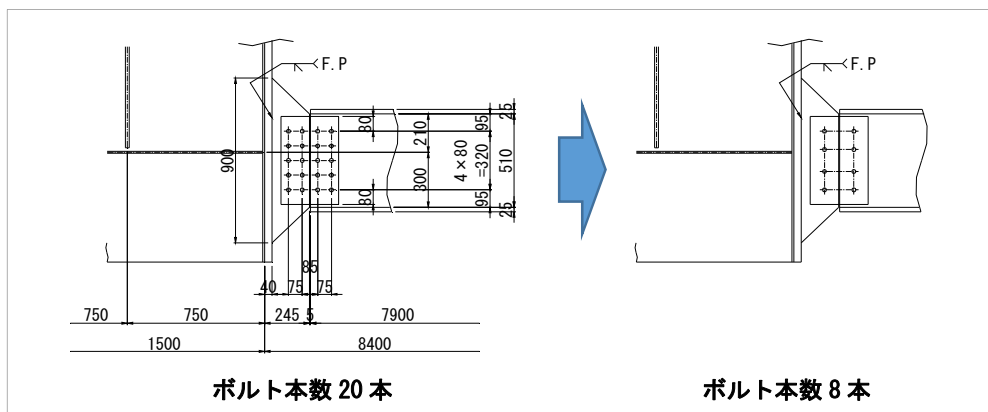
5-2. の試算では、4つの計算例で試算を行った。これに対して、試算1の計算例では、ボルト1本あたりの許容値を大きくしてもボルト本数は変わらなかったが、ボルト間隔および縁端距離を現行の摩擦接合の範囲で40mmから60mmに変更することで、大幅な低減が可能となった。縁端距離を40mmから60mmにすることは、せん断支圧状態での終局耐力を確保する上でも好ましい。



なお、検討の過程で、落橋防止構造の設計法について以下の根拠が不明であることが指摘された。

- ・設計荷重の載荷方向：鉛直方向 30° 、水平方向 15°
- ・補強板の寸法：平面寸法はブラケット底板寸法の約1.5倍以上、板厚は主桁腹板と同じ

一方、同様の検討を行っている文献 2)では、必要ボルト本数の低減本数は 1.8 本であったが、その低減で一列分減らすことができ、全体では 12 本の低減ができています。



今回の試算から、落橋防止システムの合理的な設計は、ボルト 1 本あたりの許容値を大きくするだけでなく、ボルトの配置や設計の考え方などを含めて、さらに検討する必要があることが分かった。

また、落橋防止システムの継手は引張接合と摩擦接合を併用しているものも多く、この妥当性を含めてさらに検討する必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 落橋防止システム設計の手引き（改訂版）平成 22 年 8 月（社）日本橋梁建設協会
- 2) 三ツ木幸子，金銅晃久，酒井武志，山口隆司，橋本国太郎：落橋防止システムの高力ボルト継手の設計法について，鋼構造年次論文報告集，第 19 巻，pp.303-308，2001.11