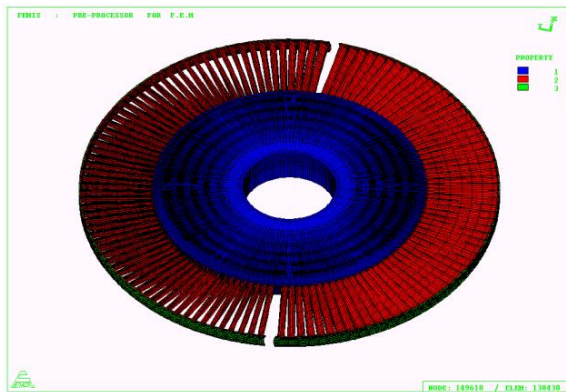


近畿地方整備局 橋梁スペシャリスト会議

鋼橋の疲労、座屈、架設事故

-私の経験より-



2019年9月30日

CVV 祝 賢治

1 疲労について

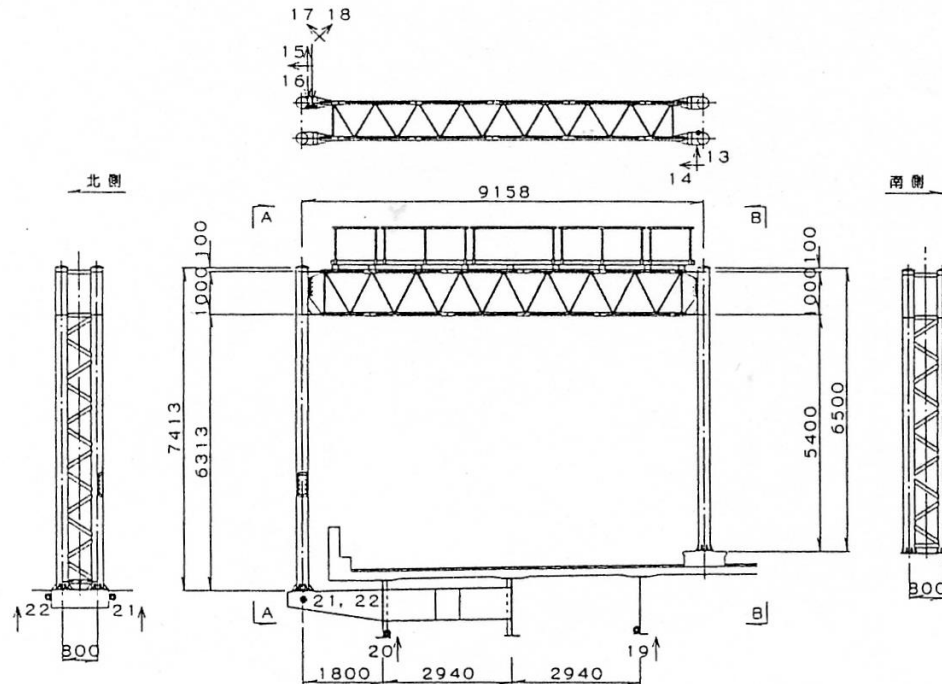
- (1)標識柱の柱基部の亀裂
- (2)モノレール軌道桁

2 座屈について

- (1)開口を設けた鋼製橋脚の柱
- (2)開口を設けた鋼箱桁のウェブ

3 架設時の事故について

- (1)架設桁の横倒れ座屈
- (2)箱桁の仮支点の崩壊

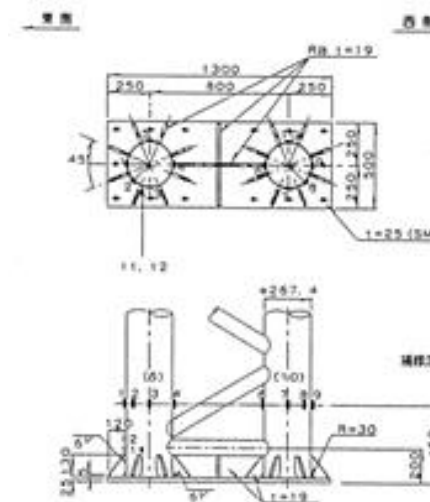


● 印 加速度變換器取付位置 (↑ 方向+) ■ 印 風向・風速計取付位置

(a) 側面図 (A-A)

(b) 正面图

(c) 側面図 (B-B)

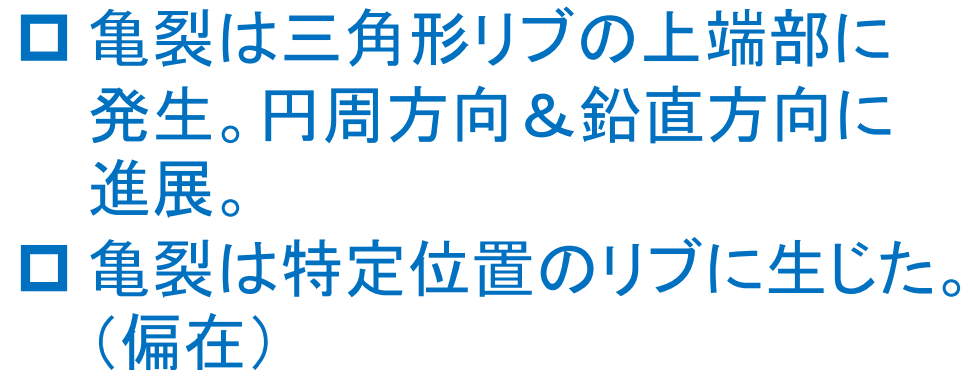
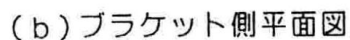


(a) ブラケット側

- 標識柱は中央分離帯とブラケットに基礎。
- 支間25mの桁橋の支点から3mの位置。
- 柱部材はΦ267×4mm(STK400)。
- 三角形リブ19mm(SS400)。

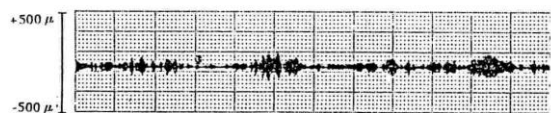
- 1 構造特性の把握 ———設計図面など
- 2 亀裂の詳細な記録 ———浸透探傷試験
- 3 標識柱の履歴の調査
- 4 現地での観察 ———近隣の類似標識柱の挙動
- 5 計器による計測 ———ひずみ計、加速度計など
- 6 走行車両のビデオ記録 ———大型車の混入率
- 7 金属学的調査 ———材料試験、電子顕微鏡 観察
- 8 FEM解析 ———応力、ひずみ

No.5

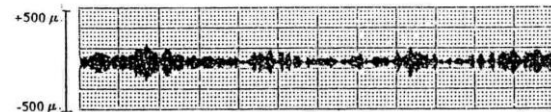




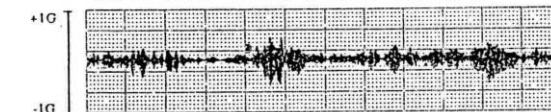
(a) 計測点 11 のひずみの変動波形



(b) 計測点 1 のひずみの変動波形



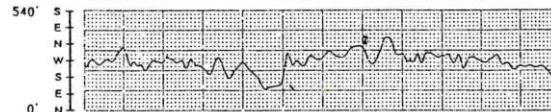
(c) 計測点 3 のひずみの変動波形



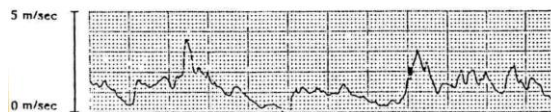
(d) 計測点 15 の加速度の変動波形



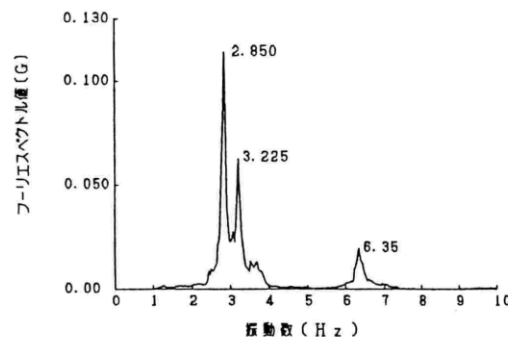
(e) 計測点 16 の加速度の変動波形



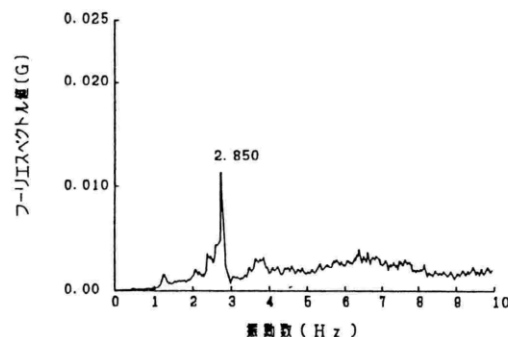
(f) 風向の変動波形



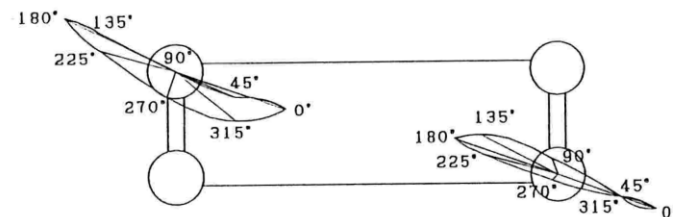
(g) 風速の変動波形



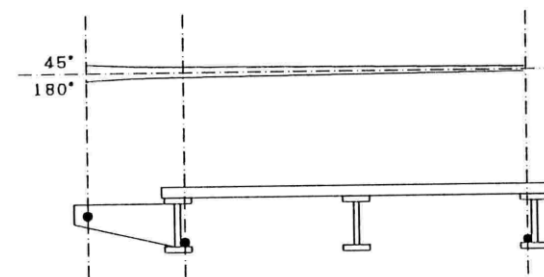
(a) 標識柱の周波数分析



(b) ブラケットの周波数分析



(a) 標識柱の振動の軌跡



(b) ブラケットと桁の振動の軌跡 (抜粋)

周波数分析(標識柱とブラケット)

振動の軌跡(標識柱と桁)

- 橋軸直角方向の振動が卓越。
- ブラケットと標識柱は共振状態。
- ひずみは衝撃力への過渡応答。
(大型車が伸縮装置通過時の衝撃)

ひずみ、加速度、風向/風速の計測

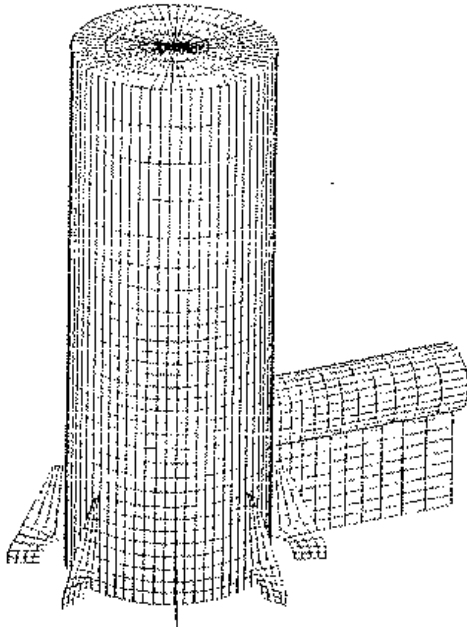


図-10 基本構造の要素分割

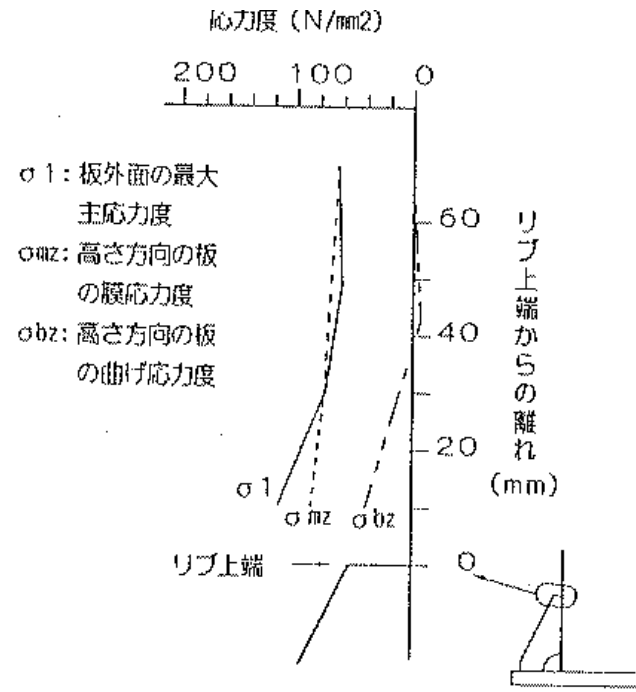


図-11 基本構造の三角形リブ上端近傍の高さ方向の応力分布

- FEM解析によれば、リブ上端に向かって急激な応力の立ち上がりが見られ、その主因は板曲げ応力だった。
- リブ上端部における剛性の急変が原因と考えられる。

- 現地計測の結果、標識柱は橋軸直角方向を主体とし、橋軸方向にも連成振動していた。
- 標識柱の振動波形および亀裂発生部のひずみ変動波形の増減は、時刻が一致しており、衝撃力を受けたときの過渡的な応答特性が見られた。
- 道路上の大型車混入率と、各時間帯のひずみ波形の振幅の増減には正の相関がみられた。
- 以上より、標識柱の疲労亀裂の主因は、高架道路上の大型車両が伸縮装置を通過するときの衝撃による柱の振動と推定された。
- 同一路線の類似標識柱を点検したところ、同様な亀裂が発見された。すなわち、亀裂は柱基部の構造にも起因していると言える。

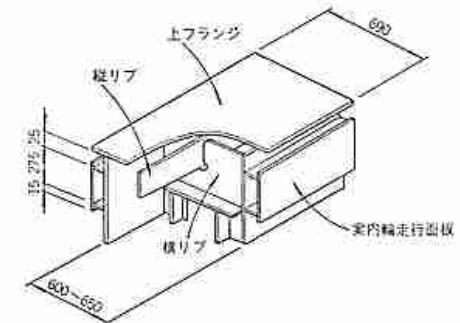
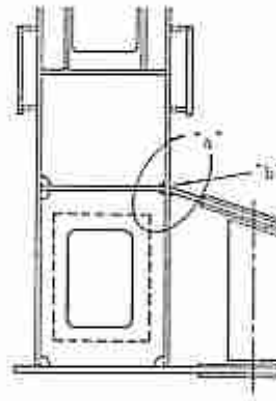
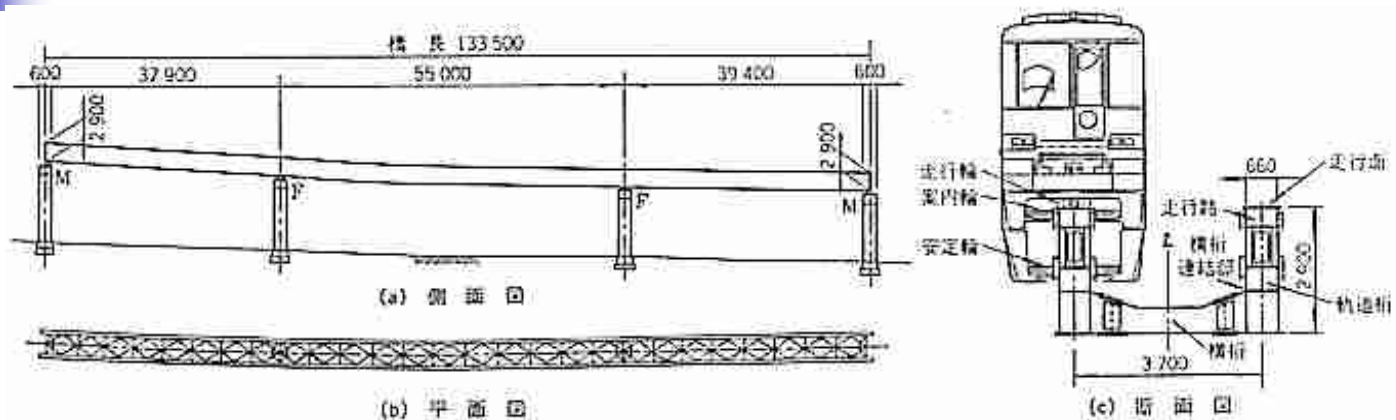
亀裂の原因究明の結果、この標識柱に関する亀裂防止策として、次の案が考えられる。

- 標識柱の設置位置の工夫(橋脚位置へ)
- 伸縮装置のノージョイント化
- 柱部材の振動制御
- 溶接施工の品質向上
- 柱基部の構造の改善(リブ上端部の剛性の急変をなくす)

伝えたいこと:「亀裂の発生原因の解明の重要性」

予防保全 —モノレール軌道桁

No.10

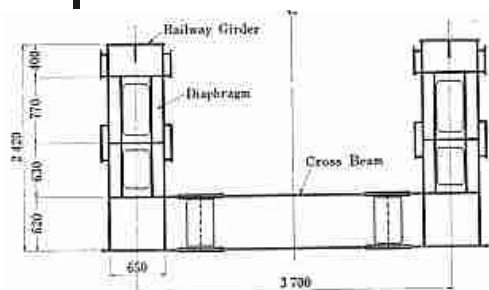


- 経緯
- 技術委員会の発案で企画された(1985年)。
 - 官学民の共同プロジェクト。統括は官、解析は大学、疲労実験は民。
 - 対象は「横桁連結部」、「走行路」として2年間かけて検討。
(その後、間を置いて「溝付き鋼板走行路」の検討を追加)。

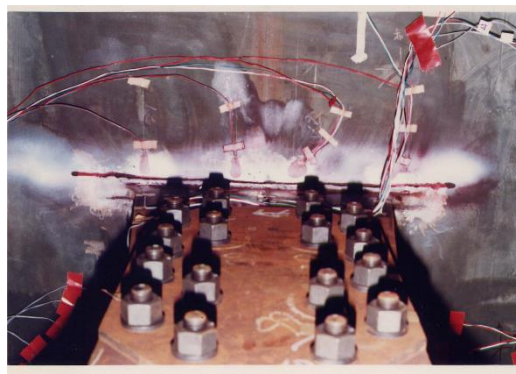
検討内容と結果の詳細は文献2、文献3を参照

横桁連結部 (1) 一疲労試験

No.11



当初の構造



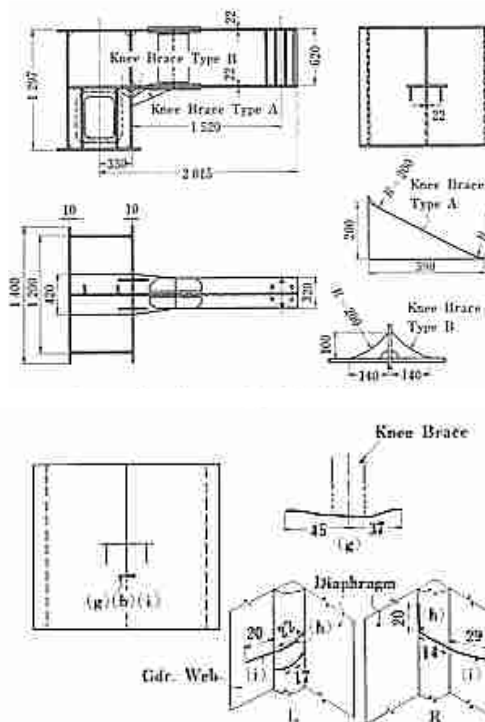
モデル1による実験結果：
早期に亀裂。

20万回/281万回。

亀裂は3種類。

箱桁内の控え材の亀裂
が問題視(スカーラップが
起点)

Model	Load	Frequency	Illustration
No. 1	$\pm 151f$ (147 kN)	1.0 Hz	
No. 2	$\pm 9.21f$ (90 kN)	2.15 Hz	
No. 3	$\pm 9.21f$ (90 kN)	2.15 Hz	



構造改良：

ニーブレースの付加。
ダイヤフラムの開口閉塞。
スカーラップをなくする。

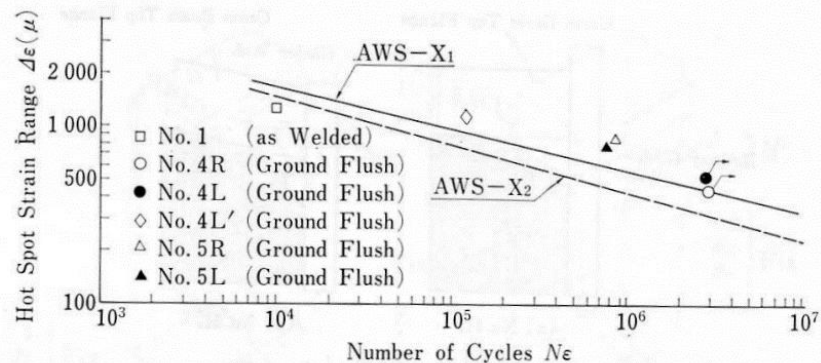
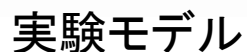
構造改良による実験結果：
モデル2、3とも、所要条件
を満足。

ニーブレース端部の形状
管理が大切。(仕上げ)

疲労実験：モデルと条件

- 当初構造では、横桁連結部に応力集中が生じ、早期に疲労亀裂が発生した。
- 改良構造として連結部にニーブレースを付加する構造を考案し、疲労試験を行ったところ、当初構造に比較して疲労強度は大幅に向上した。
- ニーブレース構造ではニーブレース端部の形状管理(仕上げ)が重要となる。しかし、軌道桁は異なる多くの会社で製作することになるため、品質管理が均一に行われる構造が好ましい。
- そこで次のステージとして、設計・施工を統一的に行いやすく、外観上、よりスマートな構造を模索した。

No.13



■ 亀裂発生点の静ひずみは、当初モデルより60%程度低下。

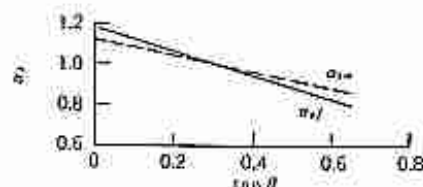
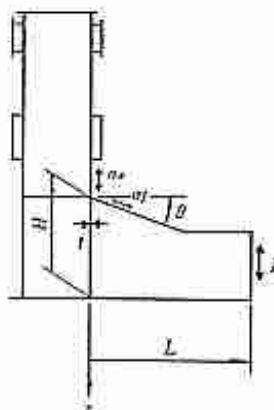
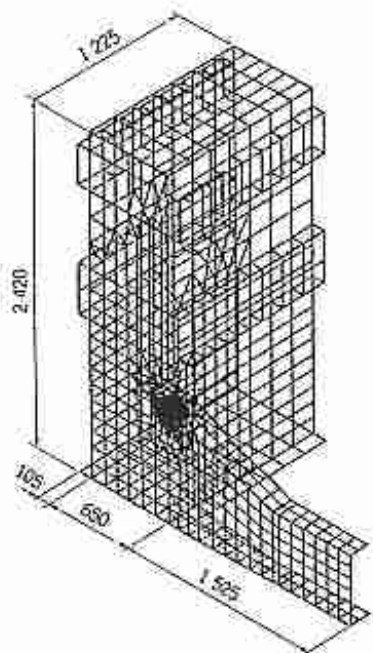
□ 疲労実験では所要条件を満足。

■ 亀裂発生点のひずみと繰り返し数(S-N線図):
AWS X1線図(仕上げあり)、X2線図(溶接のまま)
により評価できそう。

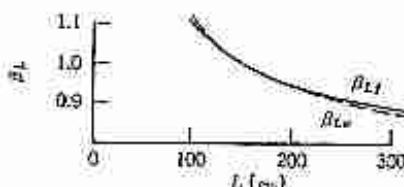
テーパ構造は当初構造より疲労強度が大幅に上昇し、軌道桁の疲労設計条件を満足する。

横桁連結部 (3) ーパラメータ解析

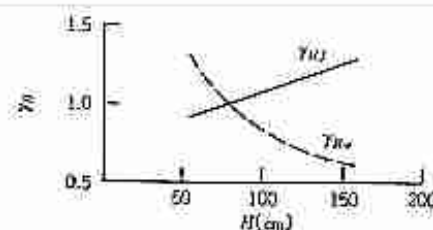
No.14



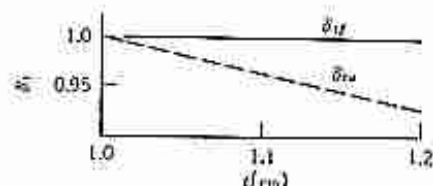
(a) テーパー角 θ の影響



(b) 横桁長さ L の影響



(c) 横桁高さ H の影響



(d) 軌道桁ウェブ厚 t の影響

実験結果を様々な橋に適用するための解析:

つぎのパラメータを変化させて、亀裂発生点の横桁フランジ(σ_f)および軌道桁ウェブ(σ_w)の応力算定式を求めた。

- (1)横桁のテーパー角
- (2)横桁の高さ
- (3)横桁の長さ
- (4)軌道桁ウェブの板厚

照査式:

$$\Delta\sigma_f \leq \Delta\sigma_a, \quad \Delta\sigma_w \leq \Delta\sigma_a$$

- 委員会での検討結果は、「モノレール鋼軌道桁 疲労設計・施工要領」にまとめた。
- 同要領の対象部位は、「横桁連結部」、「走行路」、「溝付き上フランジ」で、溶接部の仕上げおよび検査要領も記載した。
- また、適用例として、モデル橋の設計(計算)例も示した。
- 本モノレール以降の同様のプロジェクトに適用されている。

構造の問題点(弱点)の指摘 (洞察力)



実験による確認



改善案の立案



実験による確認



設計に利用できるように普遍化(パラメータ解析)

対象とする開口部

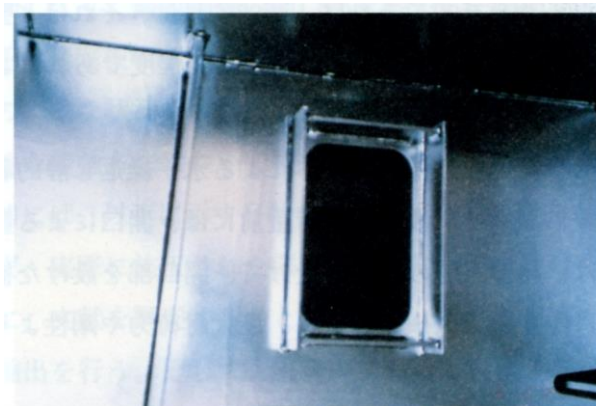
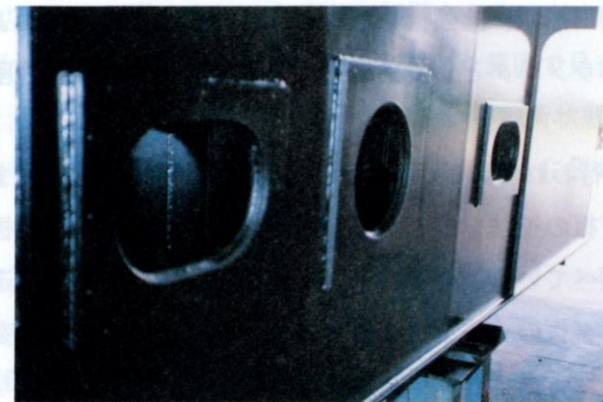
□鋼製橋脚の柱の開口部

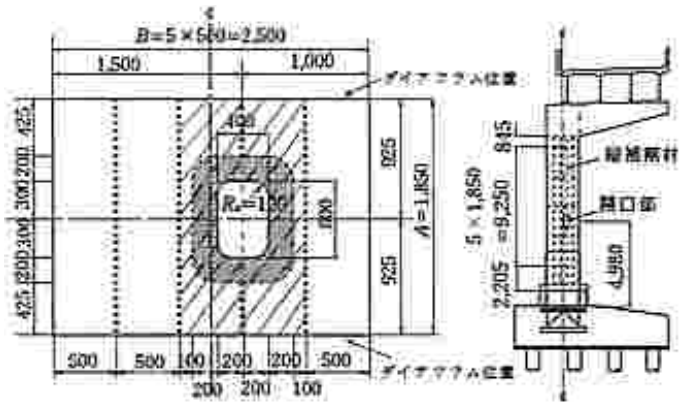
———圧縮を受ける補剛板

□連続箱桁の中間支点付近ウェブの開口部

———曲げとせん断を受ける無補剛板

開口部の補強方法





(a) 開口部を有する圧縮補剛板 (b) 全体側面図
図-1 対象とした鋼製橋脚(寸法単位: mm)

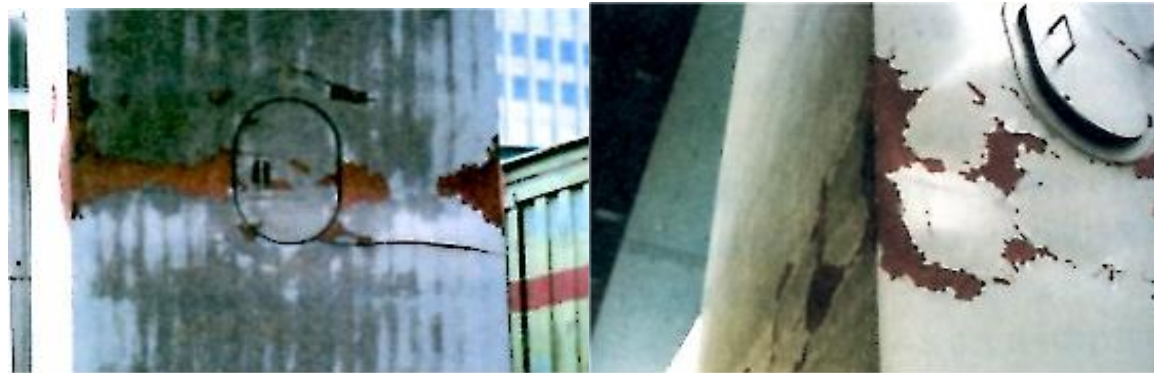


図2 阪神大震災での座屈損傷例

背景

- 開口部: 製作・架設、維持管理のために設けることが多い。
- 開口部の従来の設計法: 経験に基づいた設計、計算での照査は通常なし。
- 阪神大震災では図2の損傷がみられ、倒壊の危険もあった。

伝えたいこと

- 耐荷力を顕著に低下させるパラメータと低下の程度を数値的に示す。
- 耐荷力の簡易算定法を示す。

4タイプの供試体による耐荷力実験

No.19

供試体のタイプ

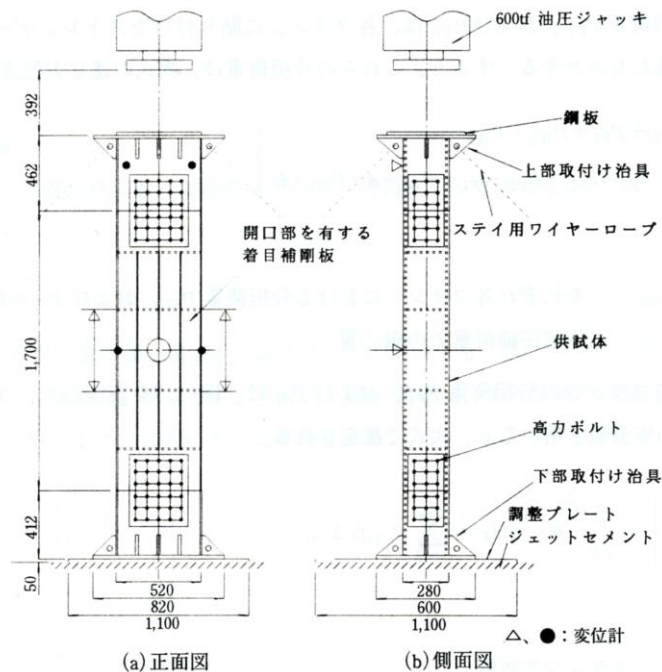
供試体P——開口部なし

供試体H——開口部のみあり

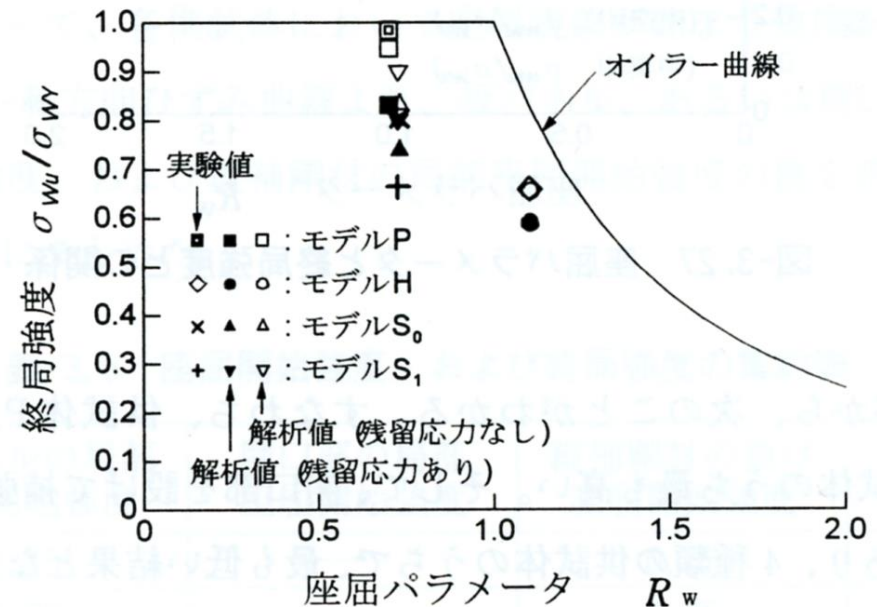
供試体S0——開口部をダブリング板で補強

供試体S1——開口部をダブリング板と縦補剛材で補強

実験方法



実験結果



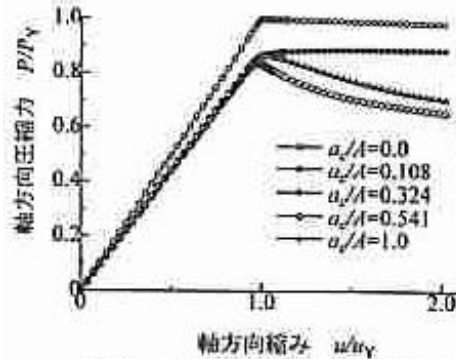
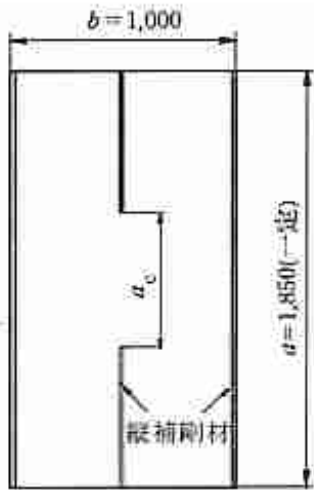


図-8 補剛材の切断による荷重—軸方向縮み曲線(P-3)

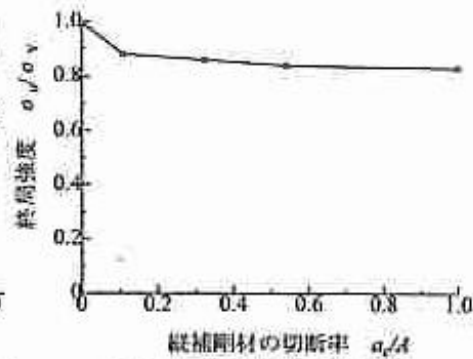


図-9 終局強度—切断率の関係(P-3)

縦補剛材の切断長 a_c と補剛板長 A の比(a_c/A)と耐荷力の関係

- 補剛板の耐荷力を顕著に低下させるパラメータは、「縦補剛材の切断」と「開口率」である。(詳細は文献4を参照)
- 縦補剛材が切断すると、わずかな切断長でも耐荷力は急減し、切断長の増加にしたがって漸減する。
- 耐荷力の低減は、切断率が0.1では12%、切断率が0.5では16%低減し無補剛板と変わらなくなる。

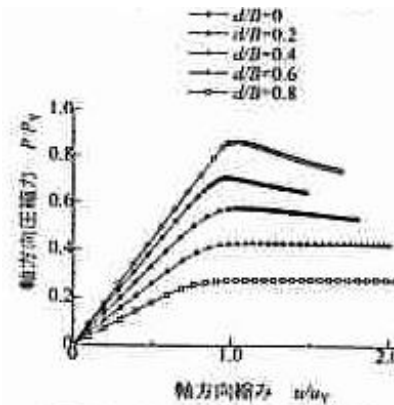
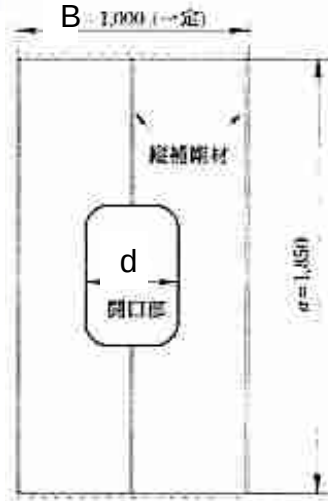


図-6 開口率による荷重-軸方向縮み曲線(P-1)

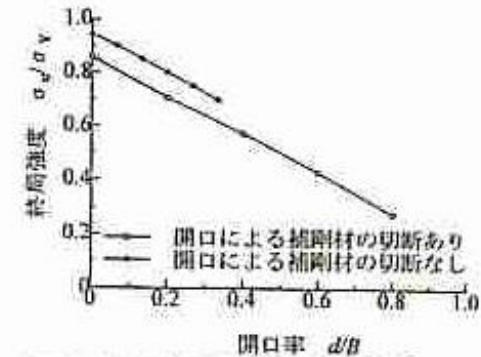


図-7 終局強度-開口率の関係 (P-1, および P-2)

開口率 d/B と耐荷力の関係

- 縦補剛材が切断されて開口率が変化する場合、開口率が0.2までは荷重-変位曲線に補剛材切断の影響するが、開口率が0.4を超えると、開口の影響が卓越する。
- 開口率の増大により、耐荷力はほぼ線形的に減少する。この例では、開口率が0.1増えると耐荷力は約10%低減する。

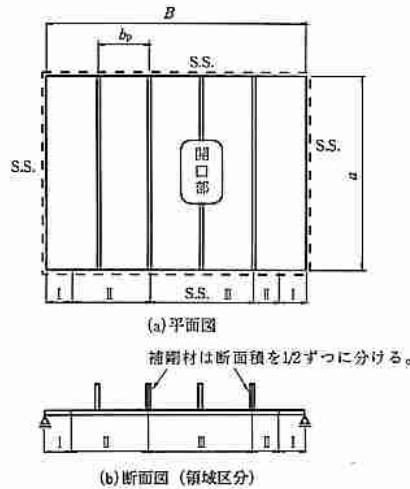


図1

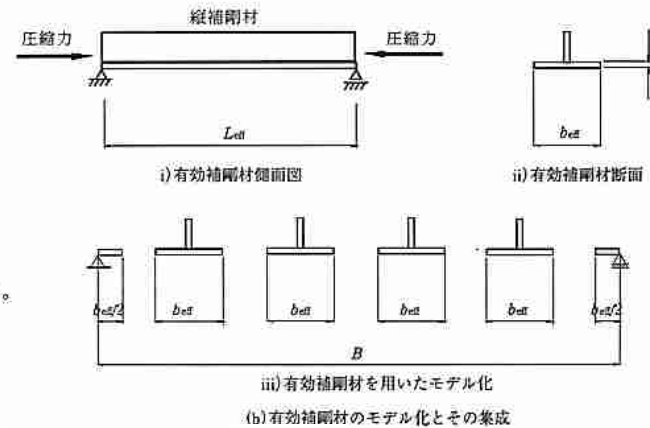


図2 モデルアプローチ

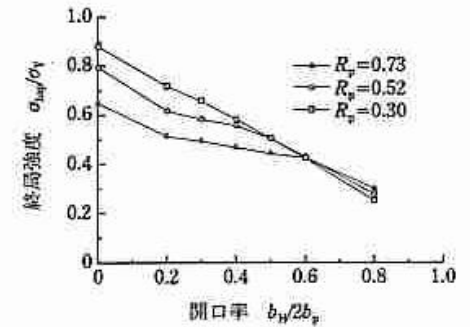


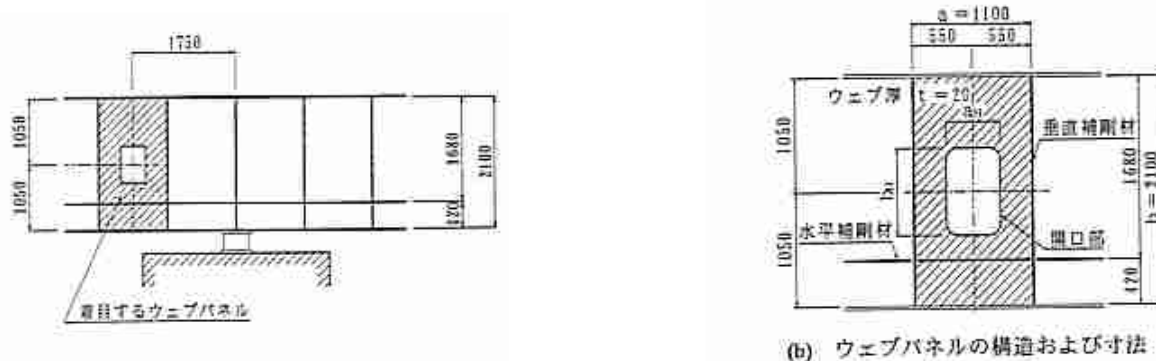
図3 開口率 $b_H/2b_p$ と終局強度 σ_{hsp}/σ_y との関係

□ 図1に示すような開口部のある補剛板を例に説明する。

□ パネルをI,II,IIIに分けて考え、耐荷力は各パネルの耐荷力の和と考える。

$$P_G = P_I + P_{II} + P_{III}$$

□ P_I 、 P_{II} は図2の「柱モデルアプローチ」で計算し、 P_{III} はグラフから読み取るか、文献の数式で計算する。(詳細は文献4を参照)



(a) 連続箱桁中間支点付近の側面図

(b) ウェブパネルの構造および寸法

図1 開口を設けたウェブの例

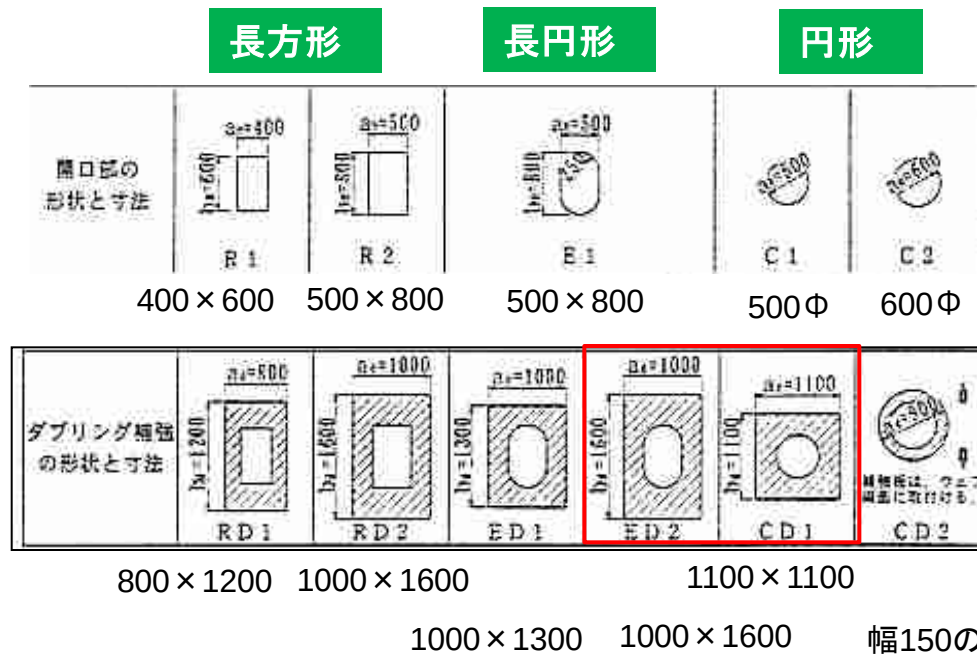
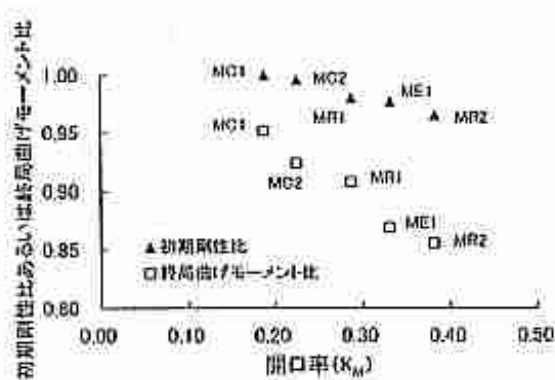
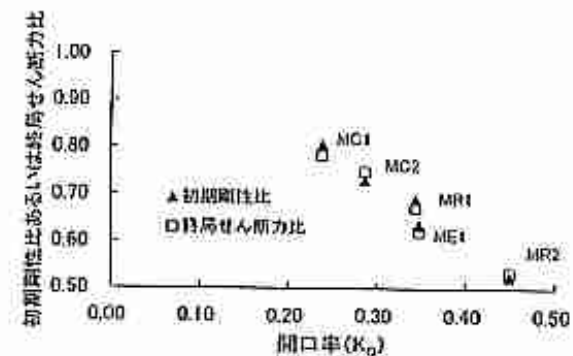


図2 検討対象：形状と寸法の異なる、開口部およびダブリング補強(実橋より採用)



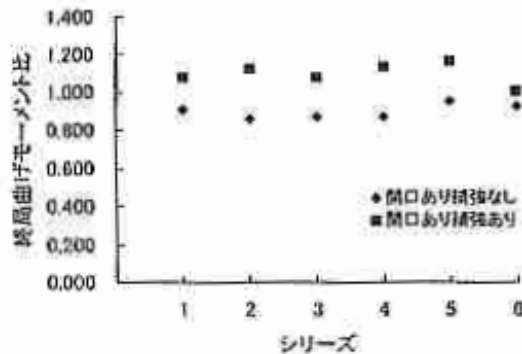
開口率 (K_M) と耐荷力の関係



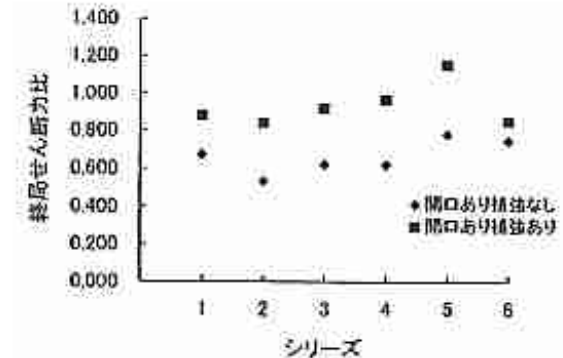
開口率 (K_Q) と耐荷力の関係

- 長方形、長円形、円形の開口部による耐荷力の低下は、曲げモーメント載荷、せん断力載荷に対して、それぞれ開口形状を考慮した開口率 (K_M 、 K_Q) により統一的に評価できる。
- ウェブに開口を設けるとき耐荷力の低下は、最大寸法が同じであれば、円形、長円形、長方形の順番で小さい。
- 円形の開口部は耐荷力の観点から、効率がよい。

検討の詳細は文献5を参照



曲げモーメントを受けるときの各シリーズのダブリング補強の効果

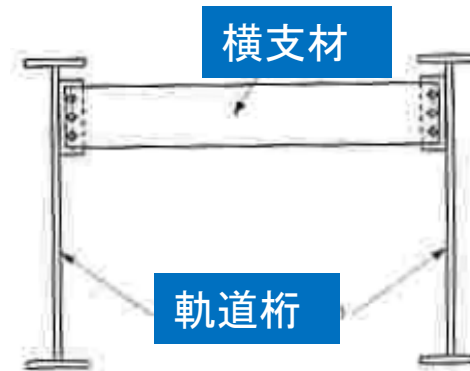


せん断力を受けるときの各シリーズのダブリング補強の効果

- 曲げモーメントを受けるときの効果は、2が最大で6が最小。すなわち、圧縮応力を受ける側のダブリング板の板幅を広くすると効果が大きい。
- せん断力を受けるときの効果は、5が最大で6が最小。すなわちウェブパネルの対角方向にダブリング板の板幅を広くすると効果が大きい。
- 曲げとせん断が同時に作用するときの耐荷力の照査結果、開口部のないモデル以上の安全率が確保できたのは、図2の太枠の2例だけだった。

架設時の事故例(1) 事故の状況

No.26



- 旧橋(ブレーストリブアーチ橋:重量536t)の撤去作業中の事故。
- 旧橋に使われていたI桁の上フランジ上にレールを敷き、工事用の軌道桁として利用。
- 河川内に配置した台船の浮力を利用してアーチ橋をレール上に載せ、陸側に8.4mほど移動させた時、軌道桁が横倒れ座屈を起こした。



図1 不安定構造(現構造)

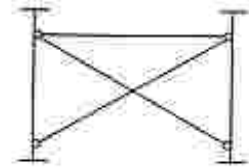
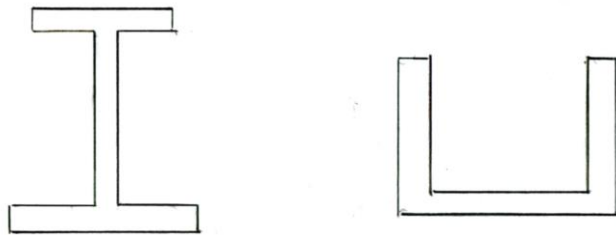


図2 安定構造

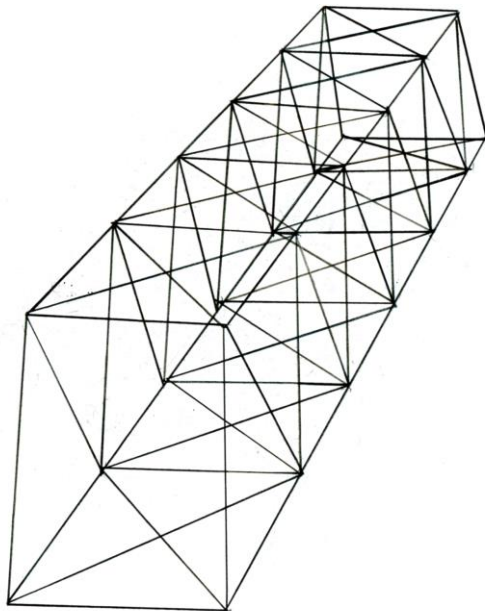
- 架設用の軌道桁は図1のように不安定構造である。図2のように対傾構を入れることにより、安定構造となる。
- その上で、道示にしたがった圧縮フランジの座屈照査が必要。
- 並列2主I桁では全体座屈の照査が必要となる場合がある。
その目安は、支間長 L と主桁間隔 b の比(L/b)が18程度より大きい場合とされている。



開断面の例



閉断面の例



トラス橋の例

剛性

○曲げ剛性: EI

○ねじり剛性

純ねじり剛性: GJ

そりねじり剛性: GI_w

剛性の影響

○たわみ

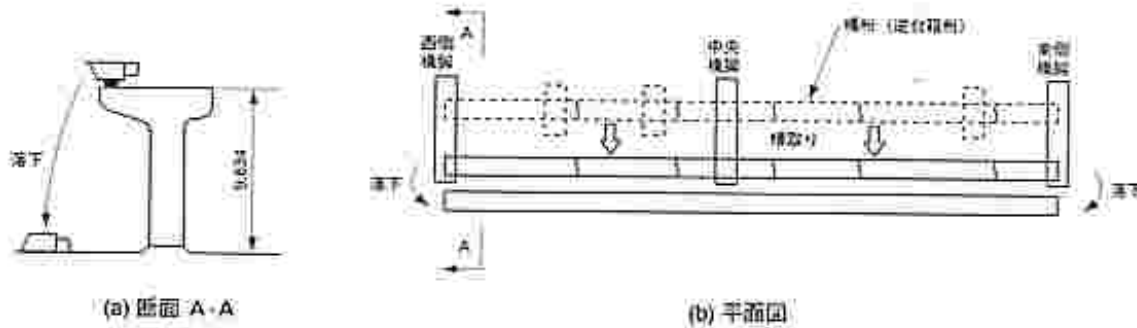
○座屈

○振動

- 構造物の照査では、応力のみならず剛性にも配慮が必要。
- 開断面(部材)は、閉断面(部材)に比べ、ねじり剛性が(極端に)小さい。
- よって、本例のI桁(開断面桁)の場合は、ねじり座屈(横倒れ座屈)に注意が必要。
- 剛性は、「たわみ、座屈、振動」に関する重要なパラメーターの一つ。

架設時の事故例(2) 事故の状況

No.30



- 高架橋を架設中の桁の落下事故。
- 2径間連続鋼箱桁の主桁(長さ約63m、重さ約60t)を事故の前日に橋脚上で横取りし、仮受台上に仮置きをした。
- その翌日、仮置きした桁を橋脚の沓座に固定させるため、ジャッキを使って降下している途中、橋桁が高さ約10mの高さから落下した。

桁の支点の崩壊過程(推定)

No.31

西側橋脚

ジャッキH

ジャッキJ

○印:ジャッキ、□印:仮受台、△印:不使用ジャッキ

図1 橋桁を支えていたジャッキと仮受台の配置

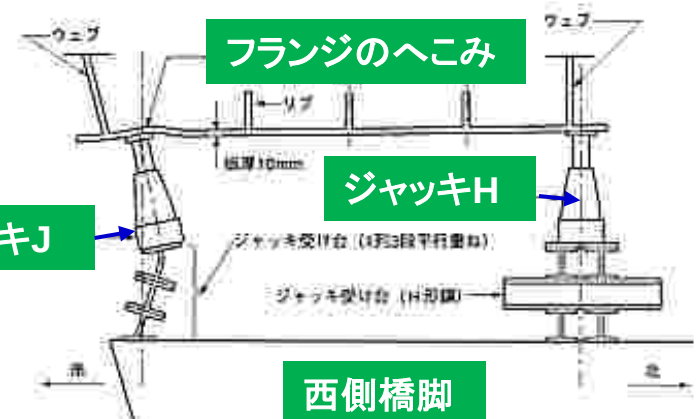


図2 ジャッキJの転倒の模式図

- ジャッキJはウェブ中心から約93mmずれていた。
- ジャッキJの受台は無補剛のH型鋼を1列3段積した構造。
- 橋桁を降下させるため、ジャッキで支えた時、ジャッキJの頂部のフランジが局部的にへこみ始めた。
- そのため、ジャッキJが傾き、受台のH型鋼も変形し、支点は安定を保持できず崩壊に至った。

- 支点の崩壊は大事故につながる。
- 支点の構造(安定性)と支点付近の補強設計の大切さ。
- 鋼構造では、荷重集中点には垂直補剛材を設けるのが原則。
- 無補剛板に面外方向からジャッキの集中力を加えないために、予めジャッキの位置を限定しておく。

- 1970年前後に欧米で箱桁の架設中の事故が相次いだ。
- その原因を究明したところ、補剛板の座屈強度の不足と判明し、日本でも補剛板の座屈の研究が盛んに行われた。
- その成果は、道路橋示方書(昭和48年2月)に取り入れられ、座屈関連規定が、大幅に充実した。(同示方書の410頁～459頁に詳細な資料が掲載されている)。
- 上記の箱桁の事故例の一つに“West Gate Bridge”(オーストラリア、メルボルン)があり、詳細な事故調査報告書が公表されている。
- 同報告には、現場代理人の証言もあり、興味深い。

メッセージ:

「温故知新」

- 1) 祝賢治・吉川実・福井光男・北村隆里: 門型標識柱の鋼管柱基部に生じた亀裂の原因調査と補強構造の検討(未公表)
- 2) 西川武夫・祝賢治・沢柳政弘・福岡哲二: 跨座型モノレール鋼製軌道桁横桁連結部の疲労強度(第2報), 三井造船技報, No.137, pp.1-12, 1989年6月
- 3) 小西一平・小笠原洋一・磯崎弘治・祝賢治: 大阪モノレール鋼製軌道桁の疲労設計, 橋梁と基礎, pp.17-25, 1999年10月
- 4) 中井博・北田俊行・祝賢治: 開口部を有する補剛板の耐荷力に関する研究, 土木学会論文集, No.633/I-49, pp.135-154, 1999年10月
- 5) 祝賢治・赤堀裕: 形状と寸法の異なる開口部を設けた鋼桁ウェブの耐荷力の検討, 構造工学論文集, Vol.47-A, pp.1229-1237, 2001年3月5

(PDFファイルあり)