

鋼床版の疲労研究

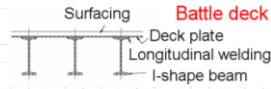
疲労損傷の事例研究から
東京ゲートブリッジの鋼床版まで

東京都市大学
三木千壽



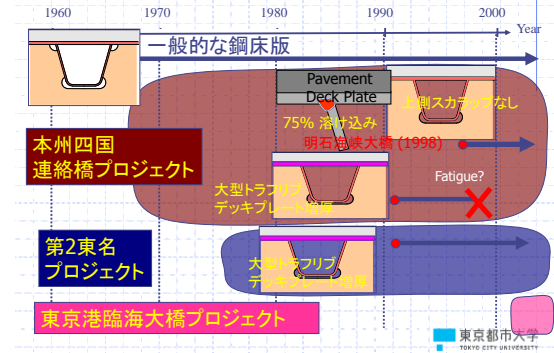
鋼床版の歴史

- 1930s
- "Battle deck"
- 1950s (after World War II)
ドイツで鋼床版が広く使われる
- 1960s
- Severn Bridge
1966供用開始
1971疲労き裂発見
↓
TRRL レポート by Tim Gurney

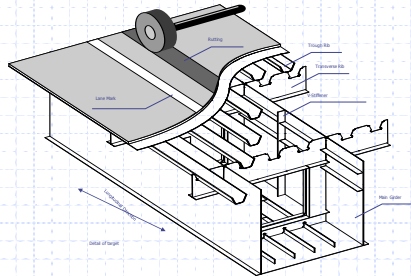


Severn Bridge
鋼床版の疲労き裂検討のはじまり
東京都市大学

鋼床版の発展

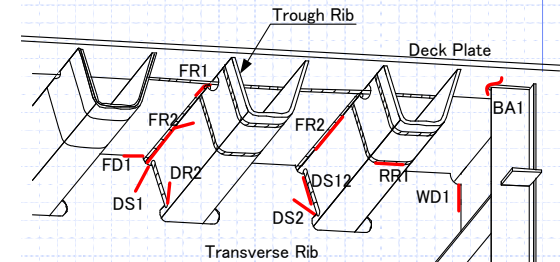


鋼床版箱桁の断面：薄板構造

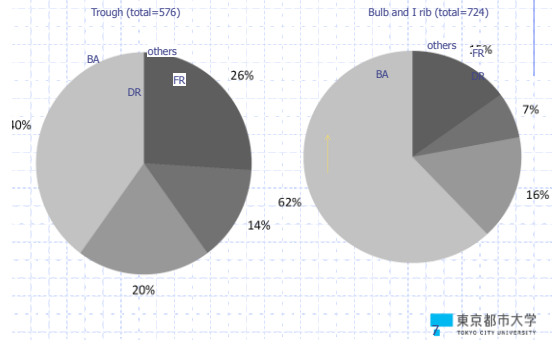


疲労亀裂のモード

疲労損傷のモード

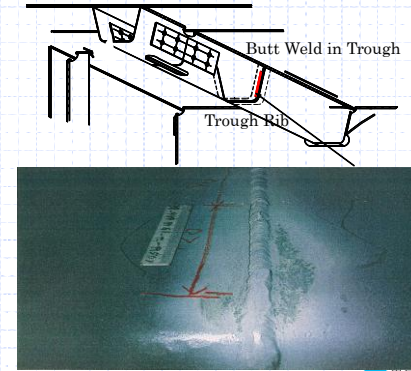


首都高速道路での疲労損傷のモード



トラフの突合せ溶接

工場溶接
現場溶接



補修: 高カボルト添接

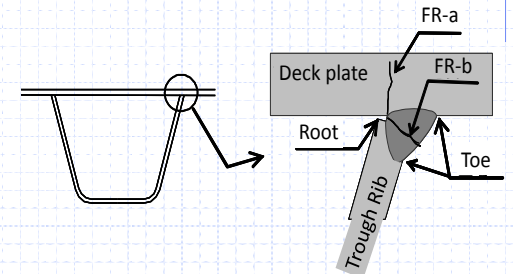


トラフリブとデッキプレートとの 縦ビード溶接

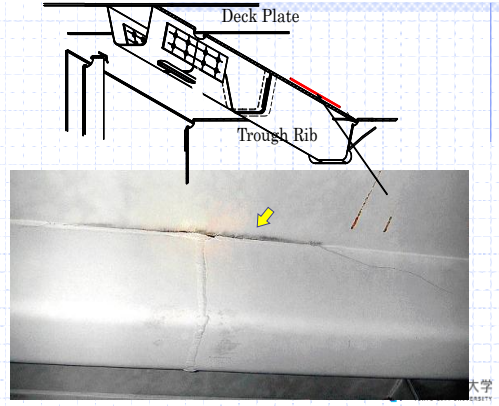
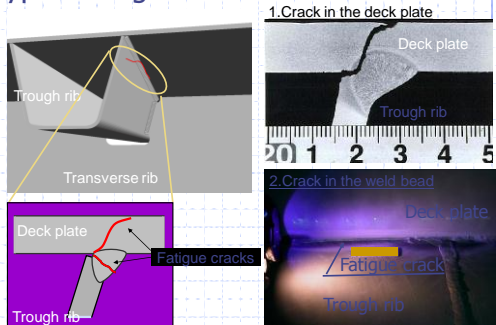
溶け込みの影響

2種類の亀裂

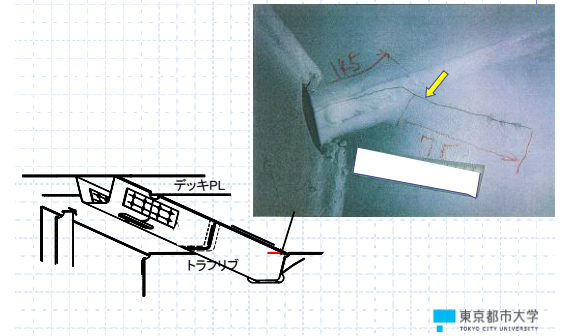
ビード貫通型とデッキ貫通型



Typical fatigue cracks

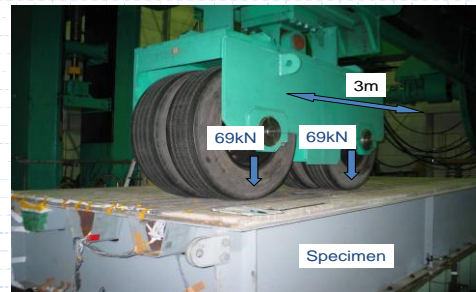


デッキプレートとトラフリップの縦ビード(上スカラップ)

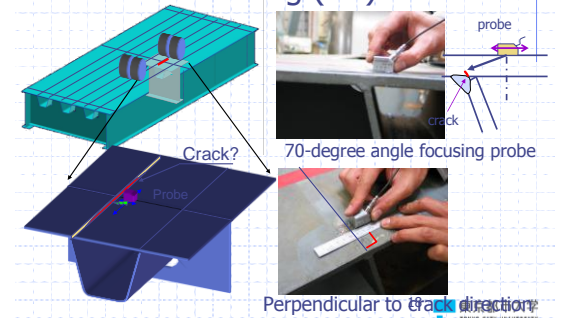


移動輪荷重試験機による疲労試験による亀裂発生と進展の検討

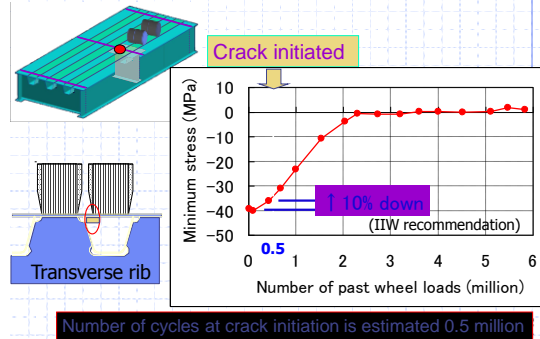
Full size OSD specimen to study the behavior of Fra type fatigue cracks



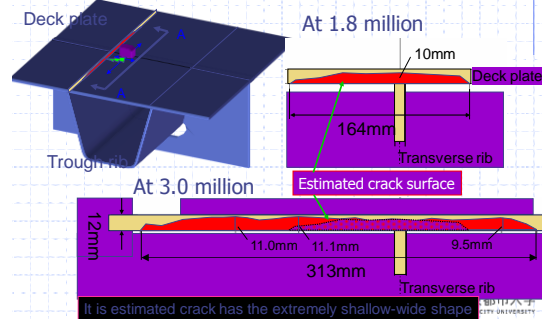
Ultrasonic testing (UT)



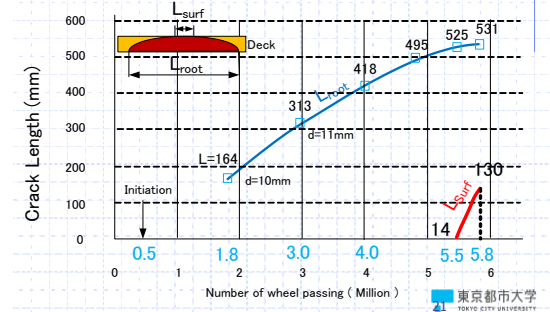
Stress change at connection



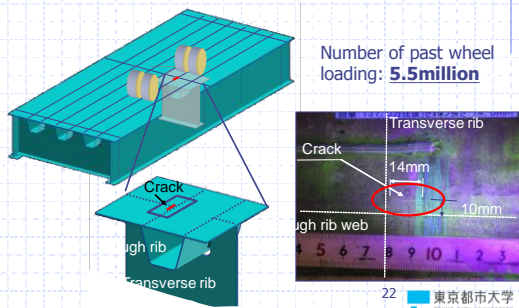
Estimation of crack face by UT



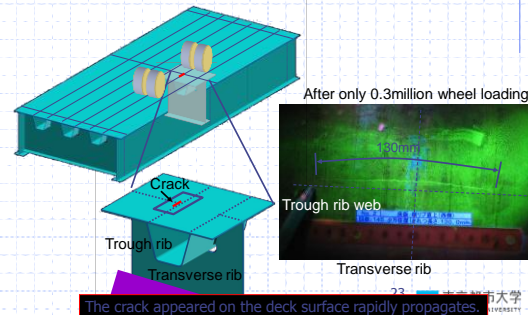
Change of stresses with loading cycles under the wheel moving fatigue test



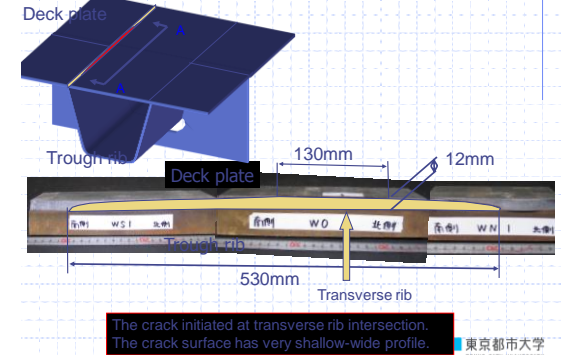
Appearance of the fatigue crack



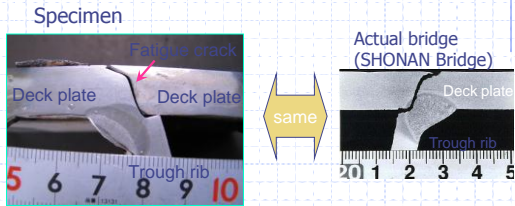
Crack propagation



Fracture surface



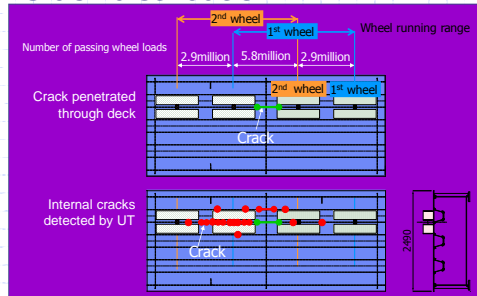
Reproduced actual crack



The fatigue test succeeded in reproducing the actual fatigue behavior.

The first test result in the world

Crack distribution



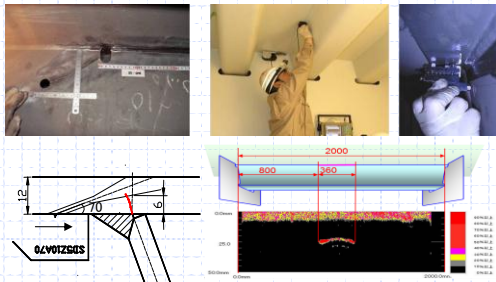
Fatigue crack can be initiated from everywhere

疲労亀裂の発生と進展

- 亀裂は早い時期に発生する
- ルートにそって扁平な亀裂として進展
- 大きくなったのちに表面に現れる

- この荷重レベルでこの挙動は不適切

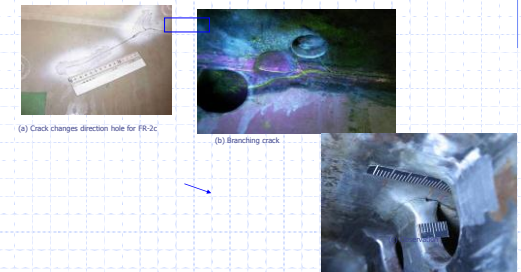
Inspection by using SAUT: 6mmが限界



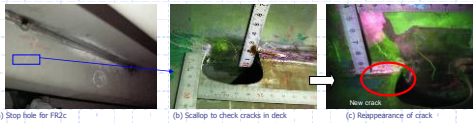
当て板による補修: トラフの上にはボルトを打つことができない。亀裂の再発生



FE2b cracks in weld bead: 屈曲する



ストップホールからの疲労亀裂の発生：
除去が不完全、せん断力の影響

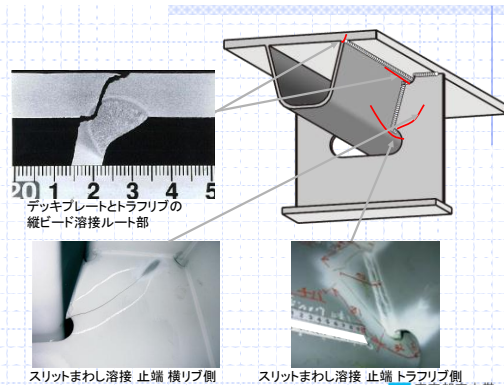
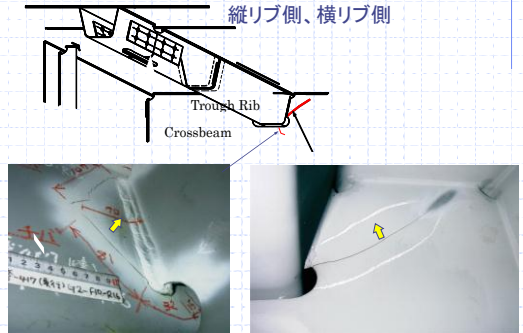


東京都市大学
Tokyo City University

Partial replacement of trough rib



縦リブ横リブ交差部の疲労亀裂
上側と下側のスカラップ
縦リブ側、横リブ側



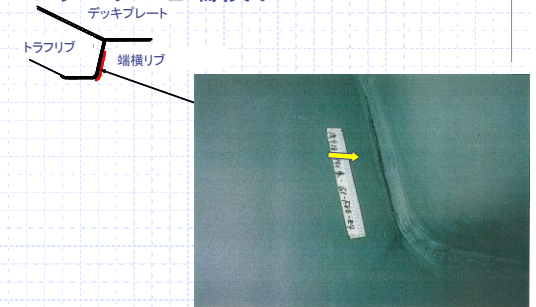
東京都市大学
Tokyo City University

垂直補剛材端部



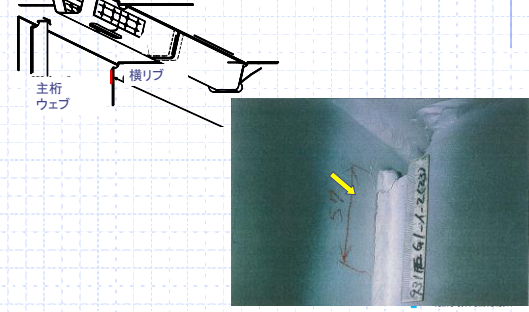
東京都市大学
Tokyo City University

トラフリブと端横リブ

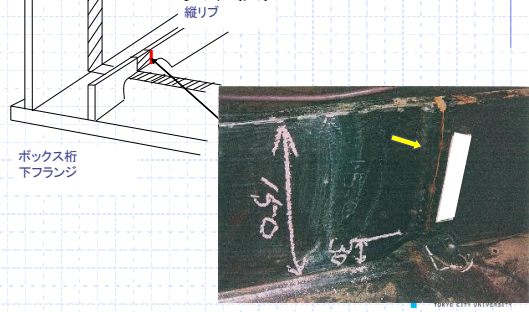


東京都市大学
Tokyo City University

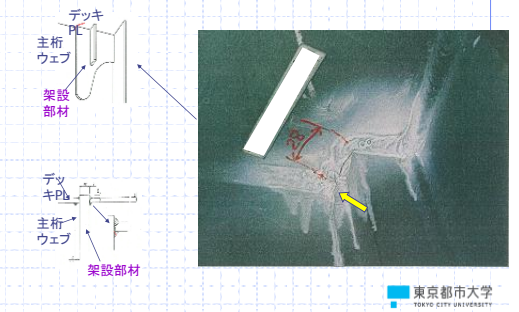
横リブと主桁ウェブのスカルップ



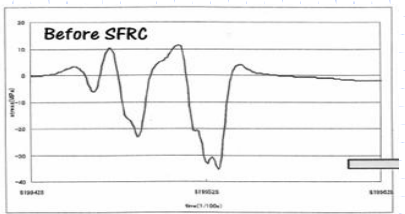
下フランジ縦リブ 突合せ溶接



架設部材とデッキプレートの溶接



東京都市大学
TOYO CITY UNIVERSITY



Before SFRC: 140MPa
After SFRC: 30MPa

東京都市大学
TOYO CITY UNIVERSITY

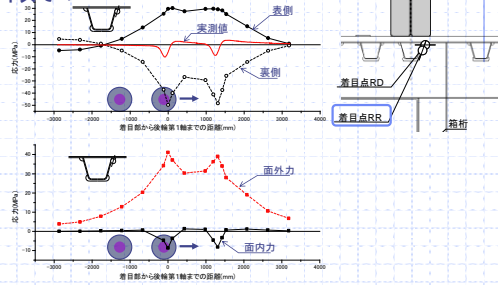
疲労損傷の原因調査 FEM+現場測定

東京都市大学
TOYO CITY UNIVERSITY



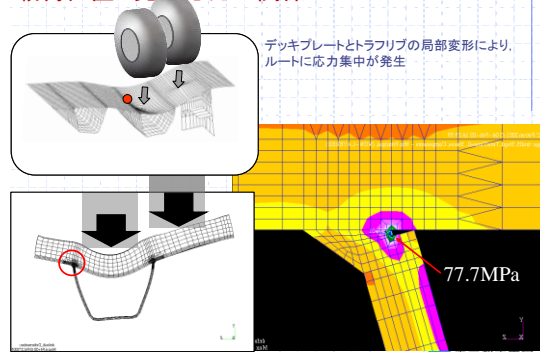
東京都市大学
TOYO CITY UNIVERSITY

デッキ周りに発生する応力の特 徴その2



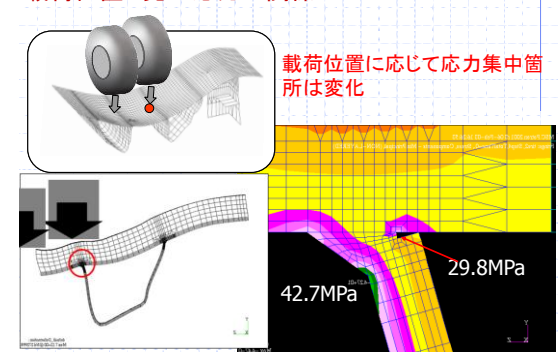
東京都市大学
Tokyo City University

載荷位置と発生応力の関係



東京都市大学
Tokyo City University

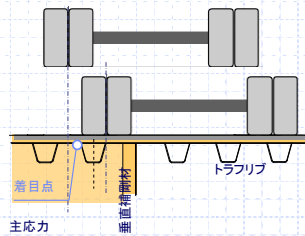
載荷位置と発生応力の関係



東京都市大学
Tokyo City University

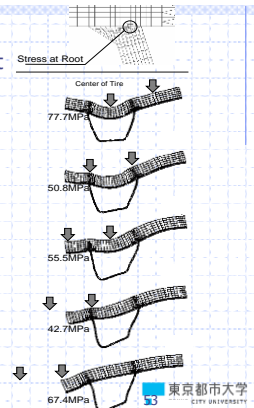
発生応力と載荷位置の関係

FEMによるルート応力の算出と載荷位置の関係



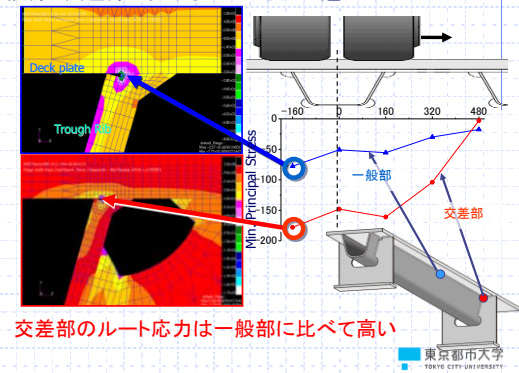
東京都市大学
Tokyo City University

Deformation and corresponding stress at root

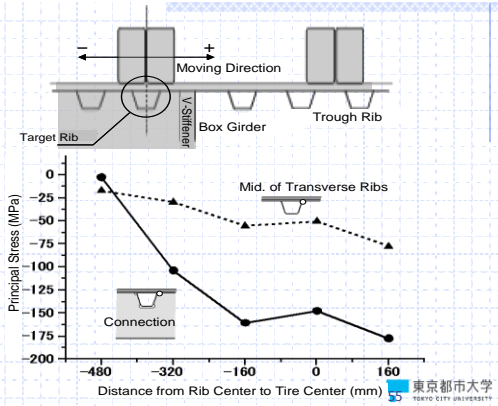


東京都市大学
Tokyo City University

一般部と交差部におけるルート応力の違い



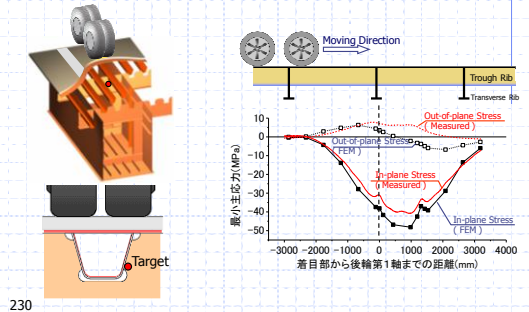
東京都市大学
Tokyo City University



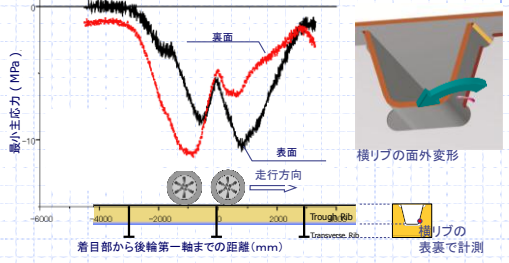
スリットまわし溶接部 横リブ側



横リブ側応力と載荷位置の関係

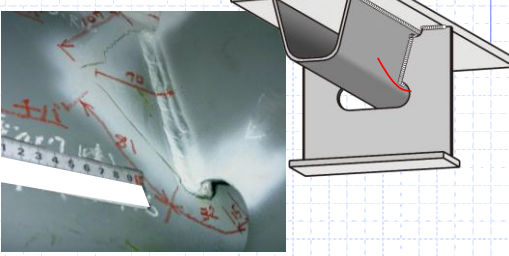


トラフリブと横リブの変形挙動

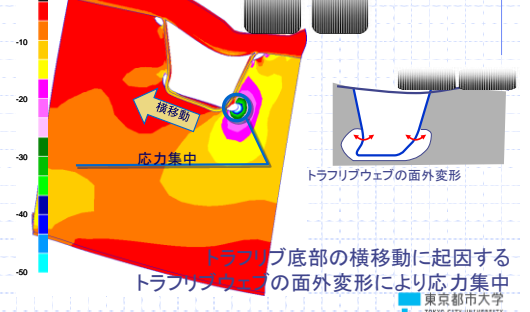


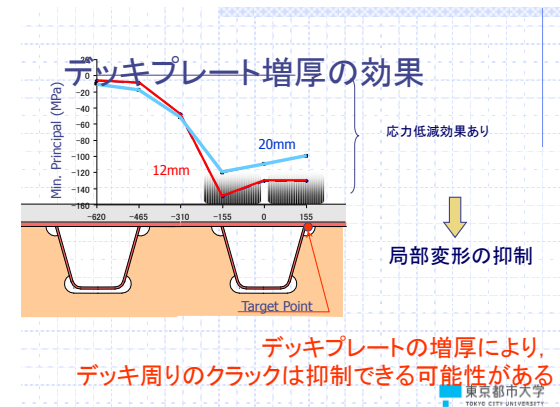
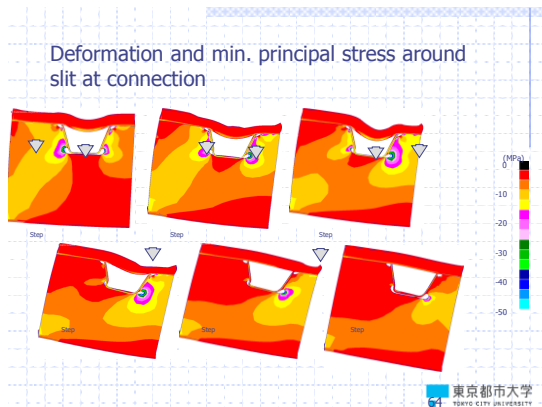
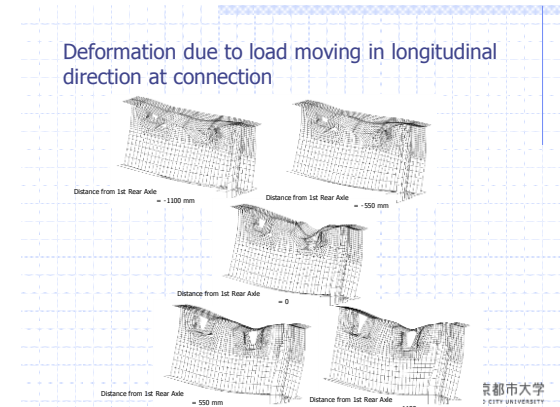
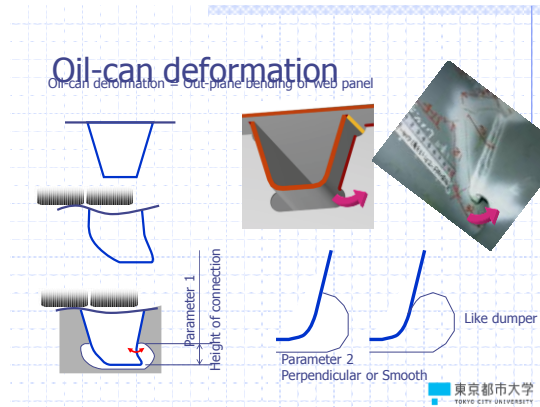
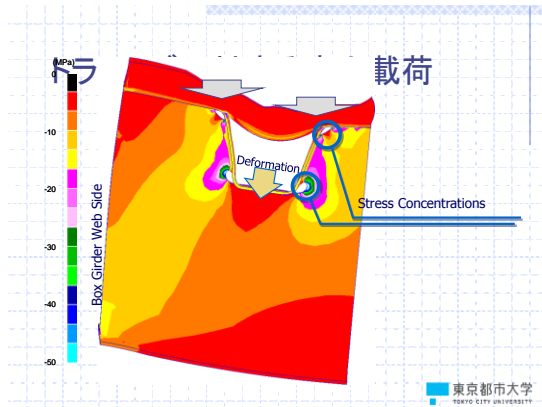
面外変形がまわし溶接に高い応力を発生

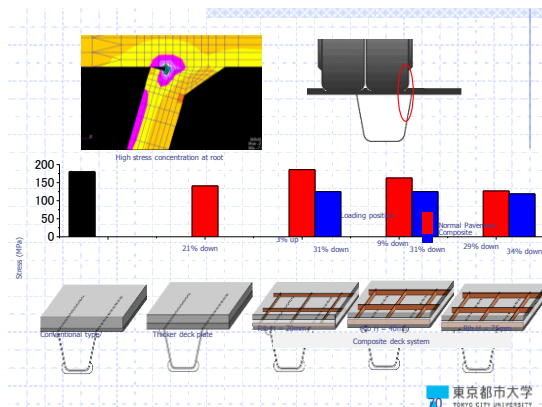
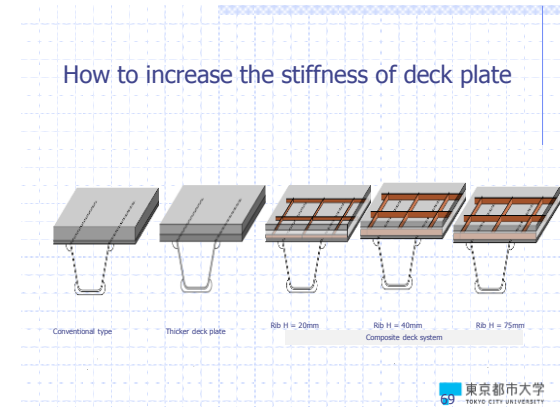
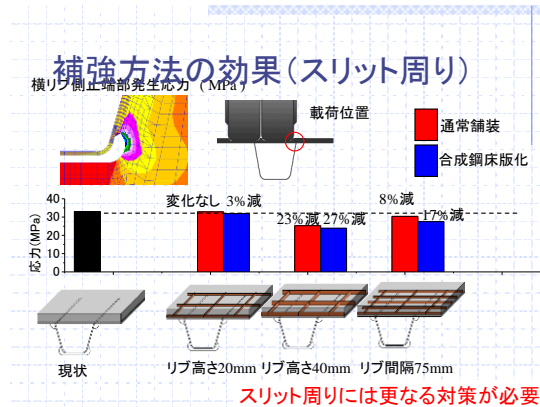
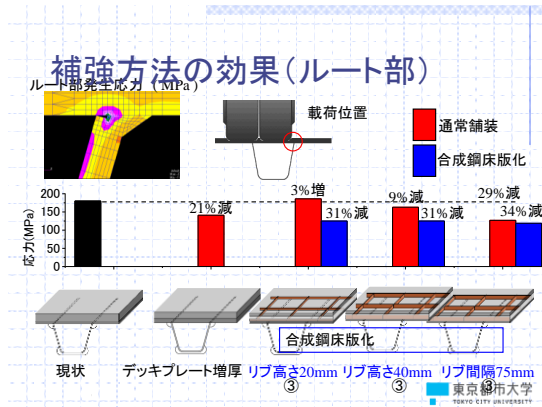
スリットまわし溶接部 トラフリブ側



トラフリブウェブの面外変形

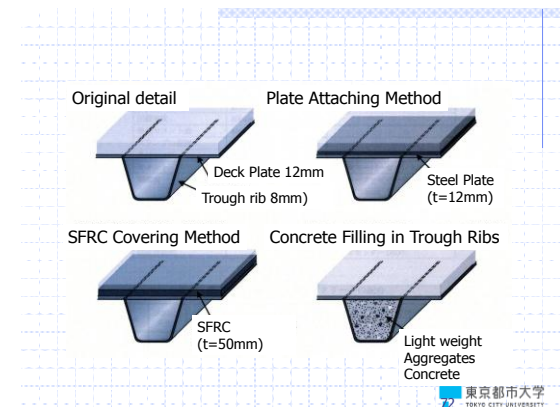




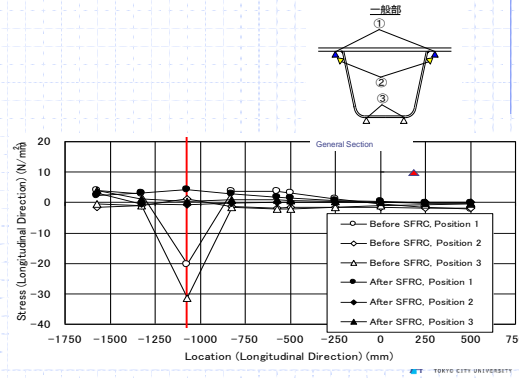


既設鋼床版を対象とした改善

東京都市大学

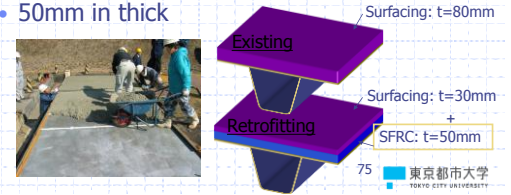


Specimen is installed into loading stage

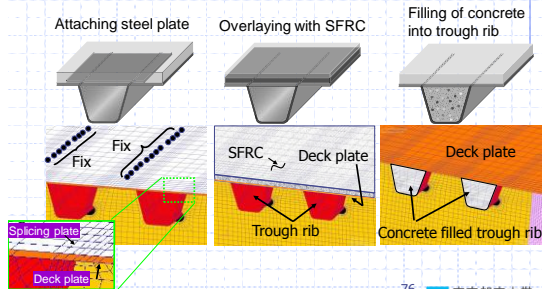


Overlaying with stiffening material method

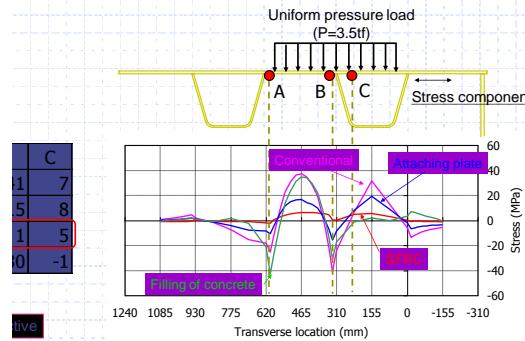
- Steel Fiber Reinforced Concrete (SFRC) To resist cracking
- Rapid hardening cement Time constraints
- Epoxy adhesive (no studs)
- 50mm in thick



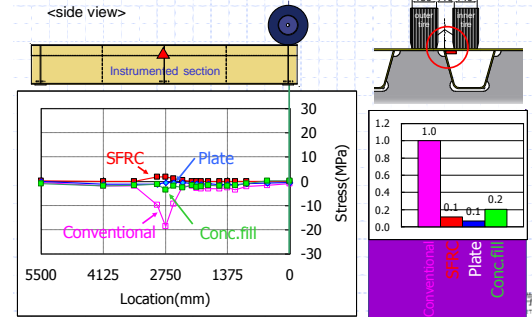
FEM models for evaluations



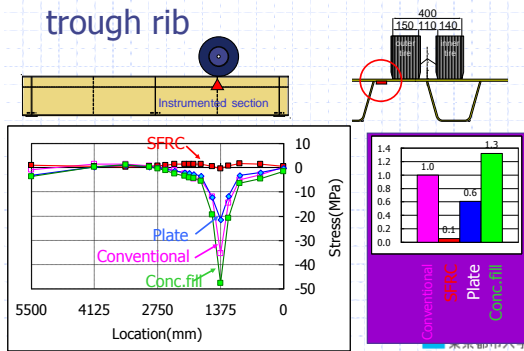
Evaluation of effectiveness by FEM



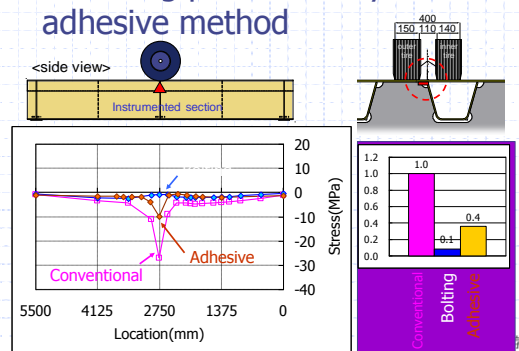
Effectiveness at transverse rib intersection



Effectiveness at outside trough rib



Attaching plate fixed by adhesive method

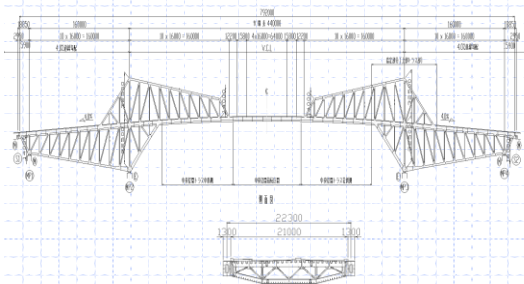


東京ゲートブリッジ用の新鋼床版構造

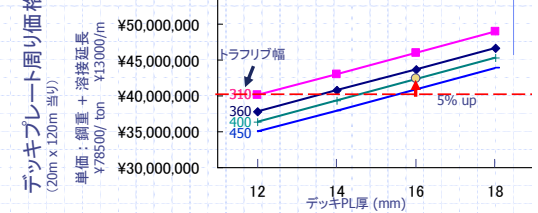


Total length: 760m
Span: 160m+440m+160m
3 span continuous girder bridge
Truss – Box Hybrid structure

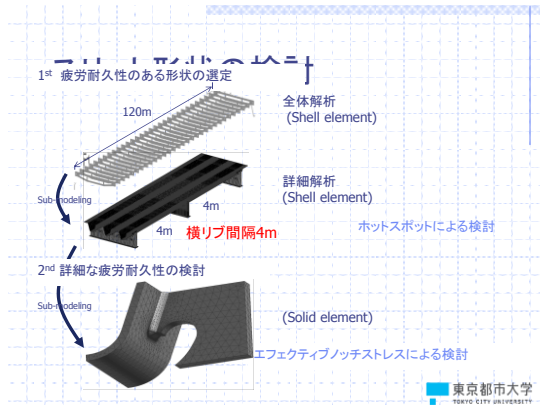
General view of Tokyo Gate Bridge



パラメータとコストとの関係



ルート部応力の27%低減はほぼ同じ価格(5%UP)で実現可能



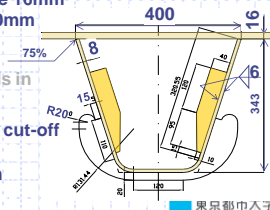
Details of OSD for Tokyo Gate Bridge

Fatigue between deck plate and long. ribs

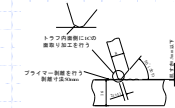
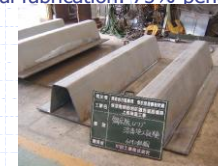
Thickness of deck plate 16mm
Width of long. Ribs 400mm
And 75% penetration

Fatigue along boxing welds in long. and trans. Ribs

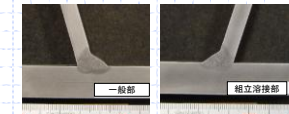
Inner ribs and smooth cut-off details
Space of Trans. ribs 4m



Trial fabrication: 75% penetration of long. welds



Steels: BHS500
16t × 8t
SM490Y 16t × 8t



東京都市大学
TOYO CITY UNIVERSITY



新しい鋼床版構造の開発

デッキPLとトラフリップ溶接のルートき裂

デッキPLの局所変形が要因

デッキとトラフリップの溶接状態

デッキPL厚とトラフリップ幅を検査

スリット周りからの疲労き裂

横リブ側の疲労き裂

スリット形状をパラメータとしたFEM解析

トラフリップ側の疲労き裂

スリット形状をパラメータとしたFEM解析

クラックの発生点をENSJにより照査

スリット形状の決定



東京都市大学
TOYO CITY UNIVERSITY

Hot Spot Stress (H.S.S.)

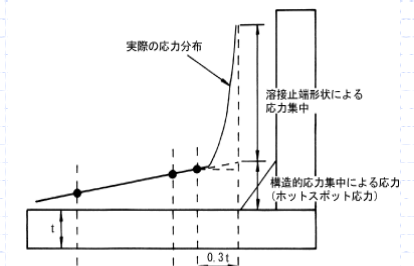
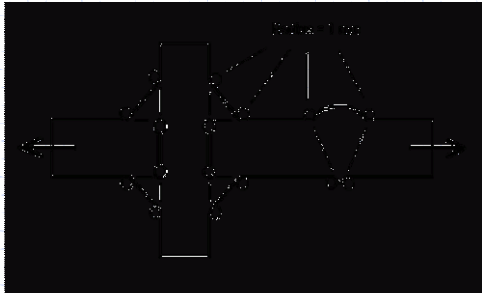


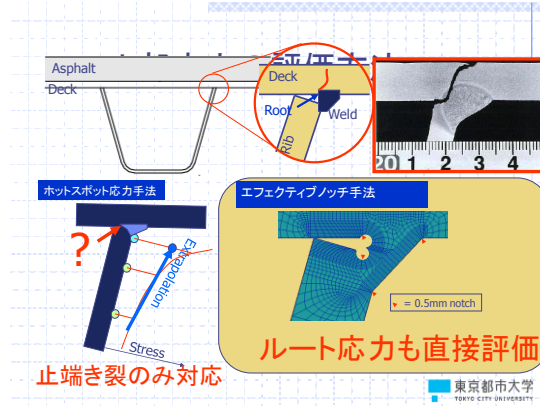
図 1

東京都市大学
© (社)日本溶接協会, 2004

Definition of Effective Notch Stress (E.N.S.)

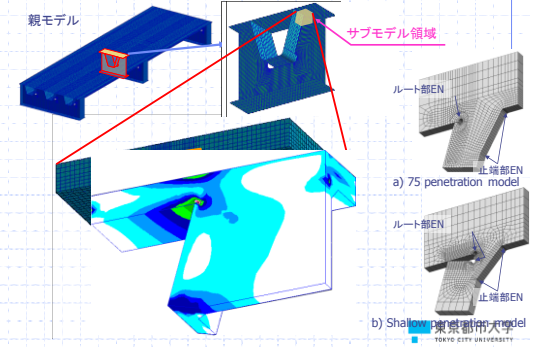


東京都市大学
TOKYO CITY UNIVERSITY



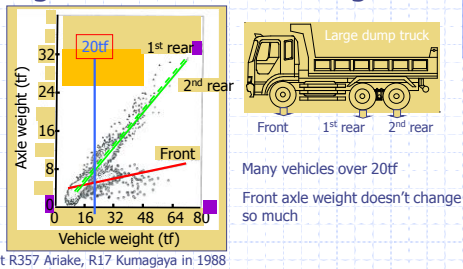
東京都市大学
TOKYO CITY UNIVERSITY

エフェクティブノッチを有するFEM



東京都市大学
TOKYO CITY UNIVERSITY

Relation between vehicle weight and each axle weight



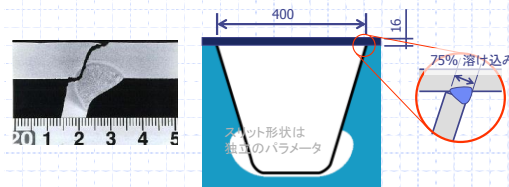
Many vehicles over 20tf
Front axle weight doesn't change so much

at R357 Ariake, R17 Kumagaya in 1988

It is necessary for fatigue assessment to evaluate stresses due to both rear and front axle loads.

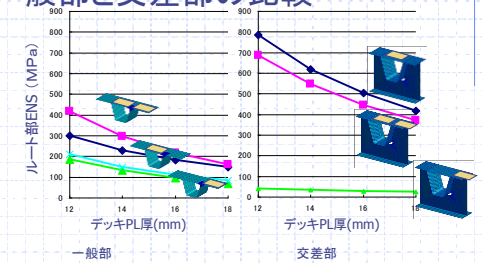
デッキPL厚とトラフリブ幅について

- >16mm デッキプレート厚
- >400mm トラフリブ幅
- >75% 溶け込み(デッキPLとトラフリブ)



東京都市大学
TOKYO CITY UNIVERSITY

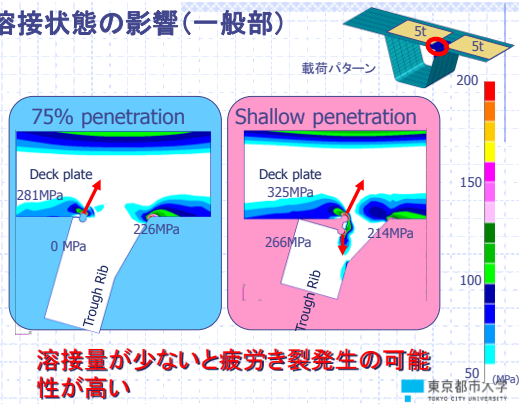
一般部と交差部の比較



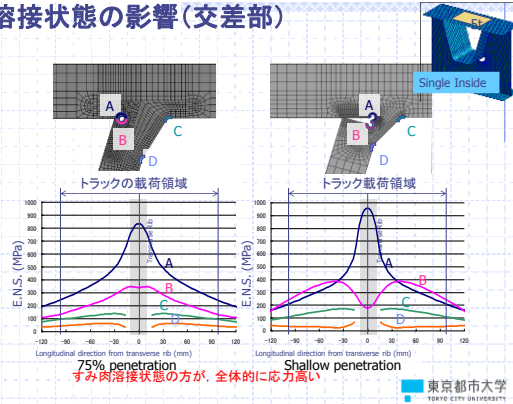
・交差部の方が一般部より厳しい

東京都市大学
TOKYO CITY UNIVERSITY

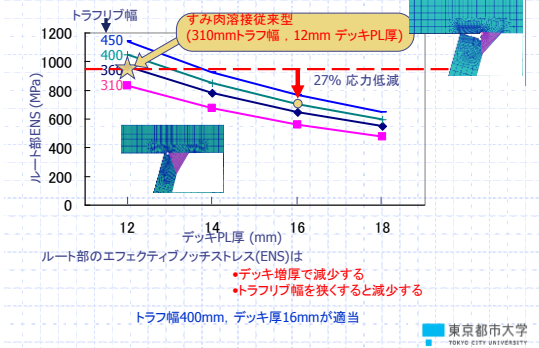
溶接状態の影響 (一般部)



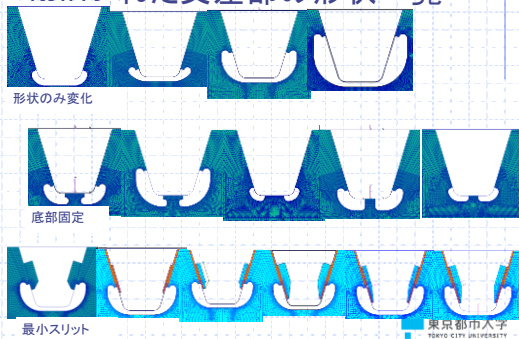
溶接状態の影響 (交差部)



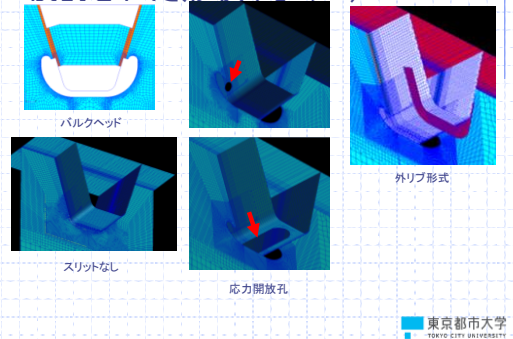
デッキ厚とトラフリブ幅のパラメータ解析



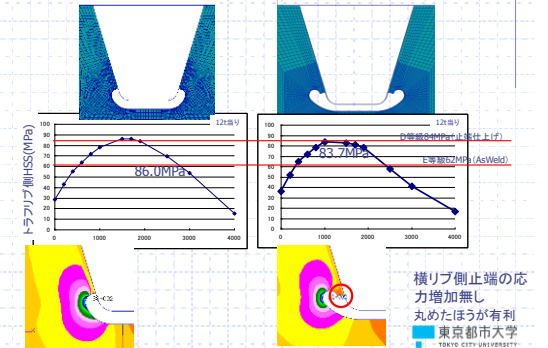
検討された交差部の形状一覧



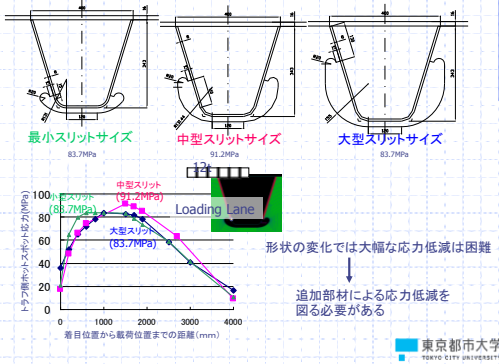
検討された形状 (その2)



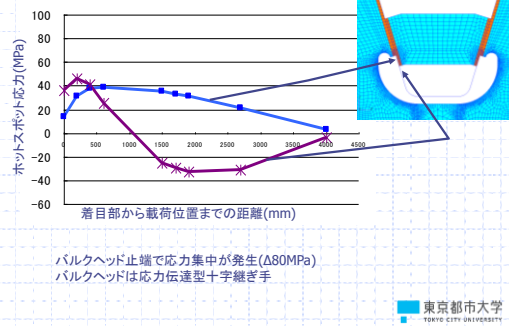
スリット端の形状の違い



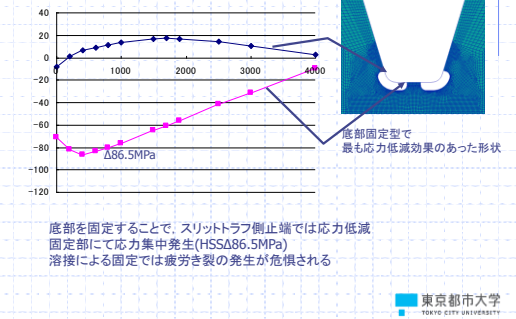
スリット形状の違い



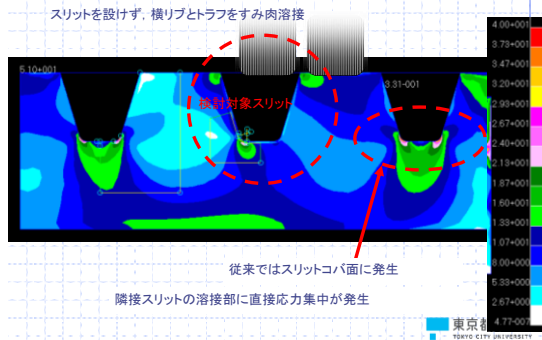
バルクヘッド型



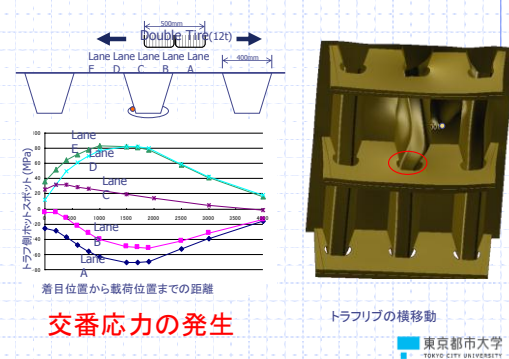
底部固定型



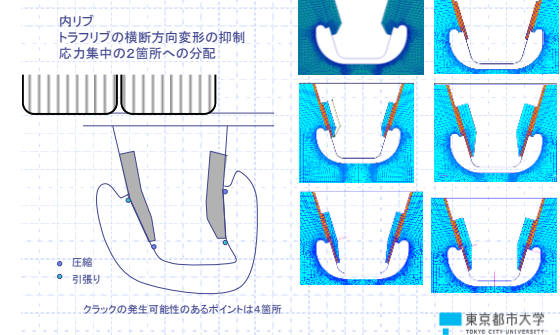
スリット無し



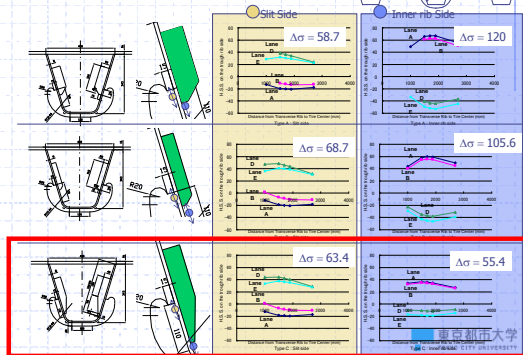
トラフリップ変形の特徴



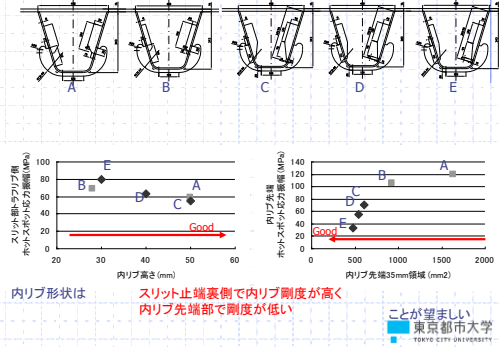
内リブ形状



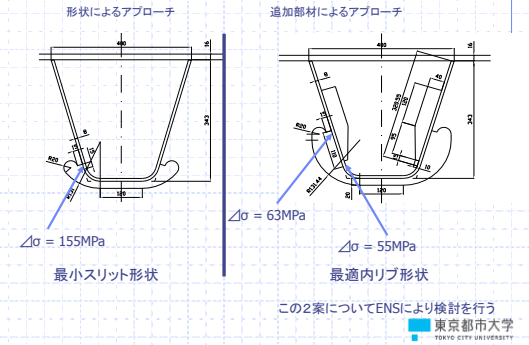
内リブ形状と発生応力



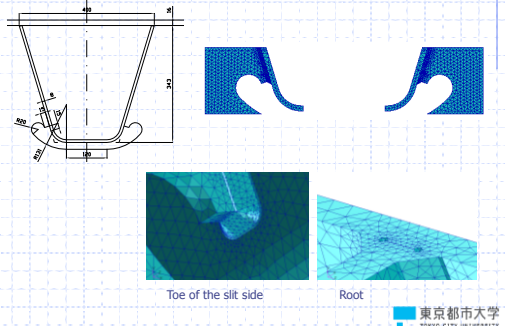
内リブ形状と止端応力の関係



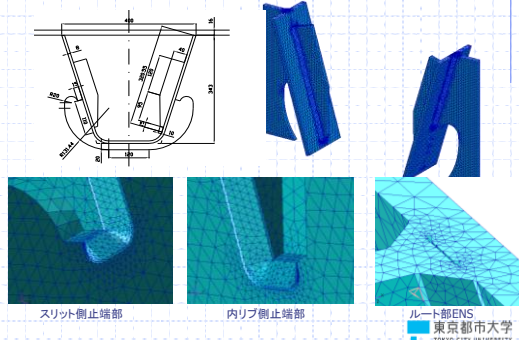
新しい鋼床版形状案



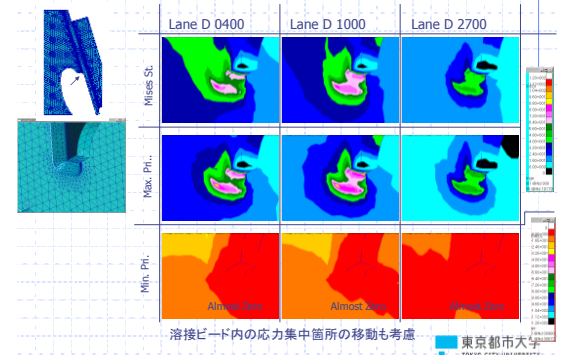
最小スリット形状 (ENS付き)



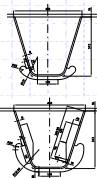
最適内リブ形状 (ENS付き)



ENSの解析



ENS解析の結果

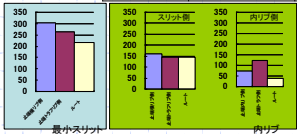


最小スリット形状

	縦リブ阻止端	トラフリブ阻止端	ルート
Stress Range	304.8	261.7	214.8

最適内リブ形状

	縦リブ阻止端	トラフリブ阻止端	ルート
スリット側 応力範囲	159.2	145.1	143.8
内リブ側 応力範囲	73.0	122.0	39.1



危険なルートき裂の発生可能性は低い
スリット側より内リブ側が強い
(内リブ側は直し難い)

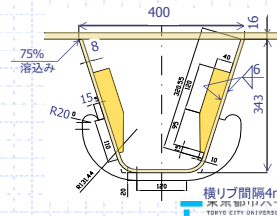
FEM検討結果

デッキPLとトラフリブの溶接に発生する疲労き裂に対して

16mmデッキPL厚、400mmトラフ幅、75%溶け込み

スリット周りに発生する疲労き裂に対して

- スリット接合部丸め型(すみ肉溶接)
- 適切な内リブを導入

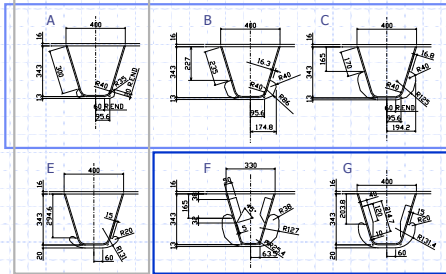


静的載荷試験と疲労試験による確認

- 静的載荷試験により、FEMで検討された事項の確認 および挙動の特徴を確認する
- 疲労試験により、検討された鋼床版形状が十分な疲労耐久性を有していることを確認する

試験体形状

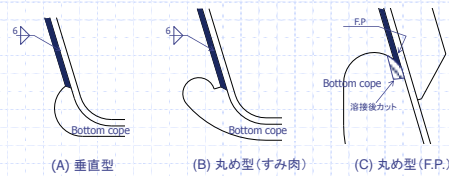
スリット形状の違い



接合ディテールの違い

内リブつき

試験体形状の特徴



(A) 垂直型 (B) 丸め型(すみ肉) (C) 丸め型(F.P.)

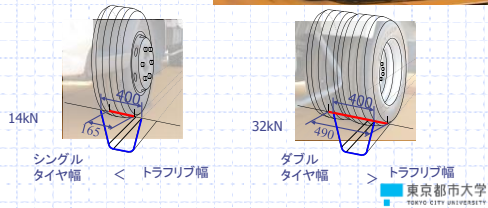


内リブを導入することによる応力の分配

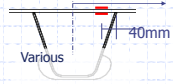
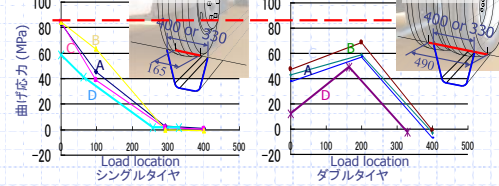
Photo of Specimen



トラックタイヤサイズ



シングル 14kN 影響

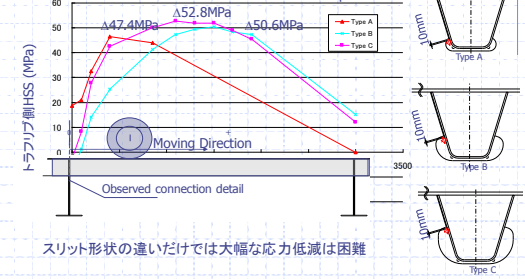


重量の軽いシングルタイヤの方が厳しい曲げ状態となった

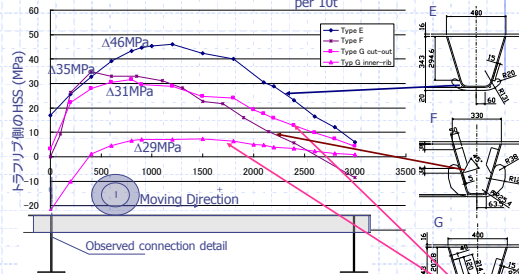
スリット形状の違いはデッキ周りの応力に影響していない

東京都市大学
THE UNIVERSITY OF TOKYO

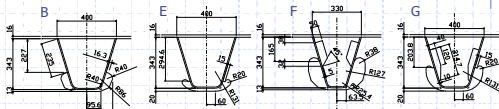
トラフリブ側のホットスポット応力



内リブの効果



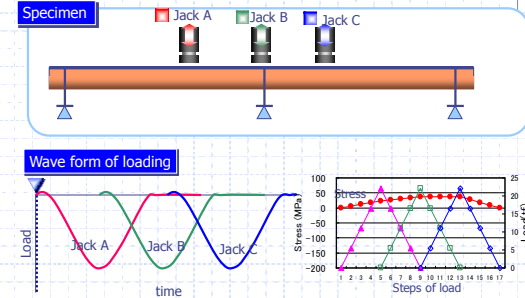
疲労試験対象 4ケース



Fatigue test was conducted to 4 specimens

東京都市大学
THE UNIVERSITY OF TOKYO

3連ジャッキシステム



Truck moving load was simulated by 3 continuous jacks

東京都市大学
THE UNIVERSITY OF TOKYO

試験体のセットアップ



22t載荷

東京都市大学
TOYO CITY UNIVERSITY

疲労試験結果

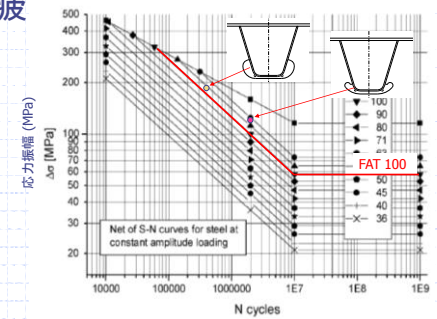
Type	Type C	Type E	Type F	Type G	
試験体形状					
荷重条件	2t - 27t	2t - 22t	2t - 27t	2t - 22t	
応力振幅 (MPa)	A End of cut-out on trough rib (H.S.S.)	Δ177	Δ108	Δ67	Δ33
	B Edge of cut-out on trans. rib	Δ108	Δ152	Δ110	Δ113
	C Tip of inner rib (H.S.S.)			Δ75	Δ20
	疲労き裂発生 at 4×10^5 cycles	疲労き裂発生 at 2×10^6 cycles	き裂なし at 2×10^6 cycles	き裂なし at 2×10^6 cycles	

内リブ付きの形状 (TypeF,G) では疲労き裂は発生しなかった。

トラフ幅が広いTypeGの方がTypeFに比べて経済的な形状である

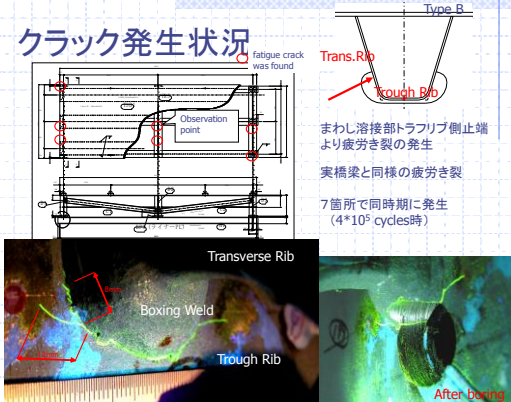
東京都市大学
TOYO CITY UNIVERSITY

疲労試験結果 (S-N) の整理

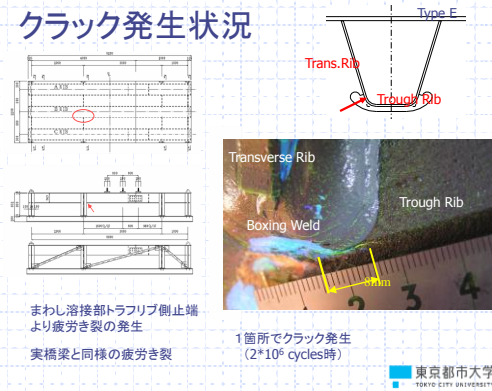


東京都市大学
TOYO CITY UNIVERSITY

クラック発生状況



クラック発生状況



東京都市大学
TOYO CITY UNIVERSITY

最終形状

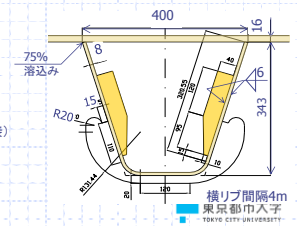
静的試験・疲労試験によりFEM検討結果の妥当性が確認された。提案する鋼床版形状が高い疲労強度を有することが判明した。

デッキPLとトラフribの溶接に発生する疲労き裂に対して

- 16mmデッキPL厚
- 400mmトラフ幅
- 75%溶け込み

スリット周りに発生する疲労き裂に対して

- スリット接合部丸め型(すみ肉溶接)
- 適切な内リブを導入



東京都市大学
TOYO CITY UNIVERSITY



■ 東京都市大学
TOKYO CITY UNIVERSITY