

疲労による RC 床版の劣化と その対策

松井繁之

大阪大学名誉教授・大阪工業大学客員教授

疲労によるRC床版の劣化とその対策

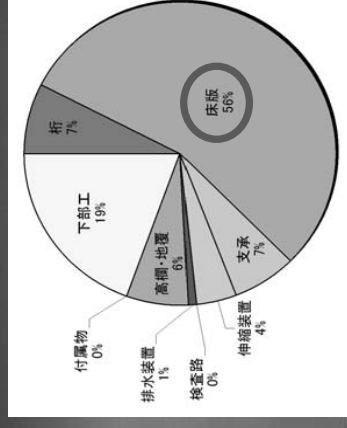


大阪大学名誉教授・大阪工業大学客員教授
工学博士 松井 繁之

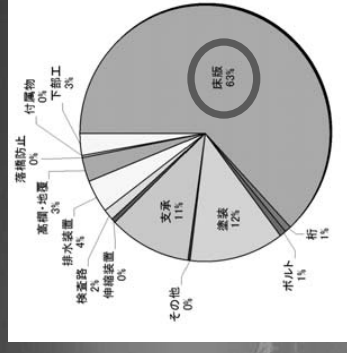
コンテンツ

1. RC床版ひび割れ損傷の原因解明
2. 輪荷重走行試験機の普及と外国の損傷例
3. 高耐久性床版の開発－プレストレスした床版－
4. 損傷対策－補修・補強－
5. 鋼・コンクリート合成床版
6. 特殊合成床版
7. おわりに

種別毎の損傷状況



コンクリート橋の損傷状況



鋼橋の損傷状況

『コンクリート橋、鋼橋ともに床版の損傷が60%で、圧倒的に多い。』

1. RC床版ひび割れ損傷の原因解明

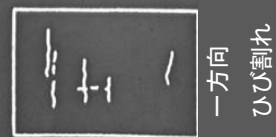
1.1 床版の最終破壊



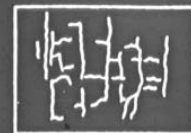
油圧ジャッキによる疲労実験(定点載荷)



床版損傷のプロセス



一方向
ひび割れ



二方向
ひび割れ

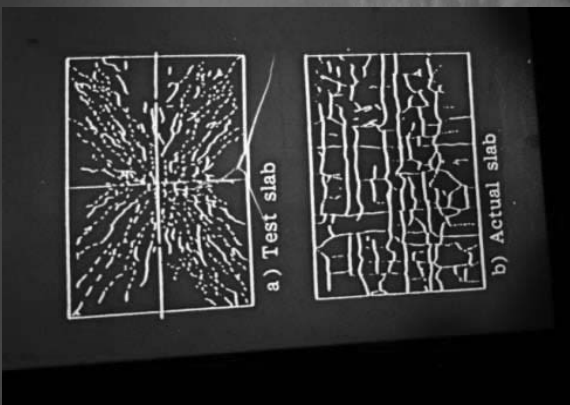
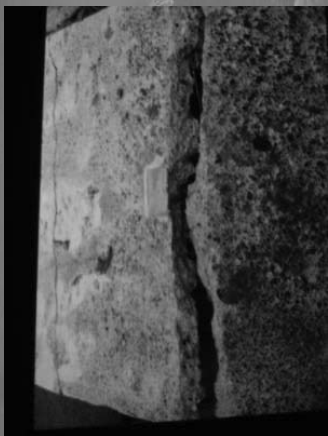


格子状
ひび割れ



陥没破壊
(最終)

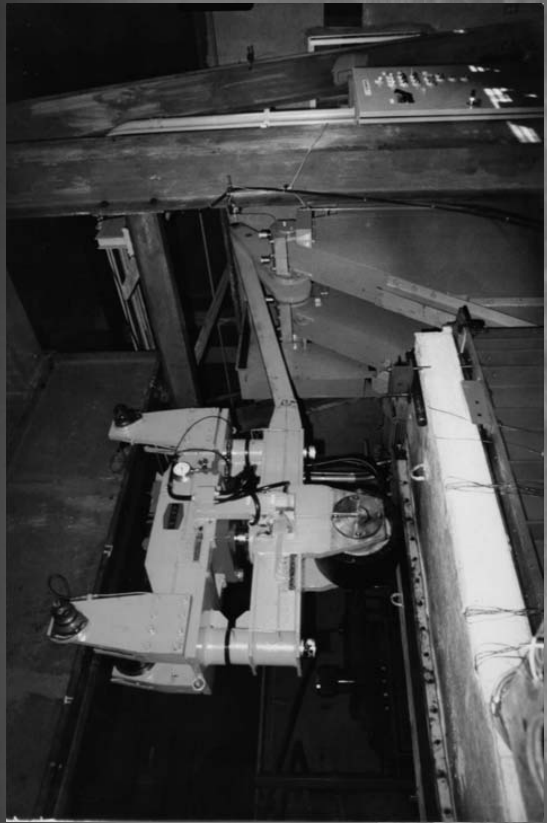
実験結果は



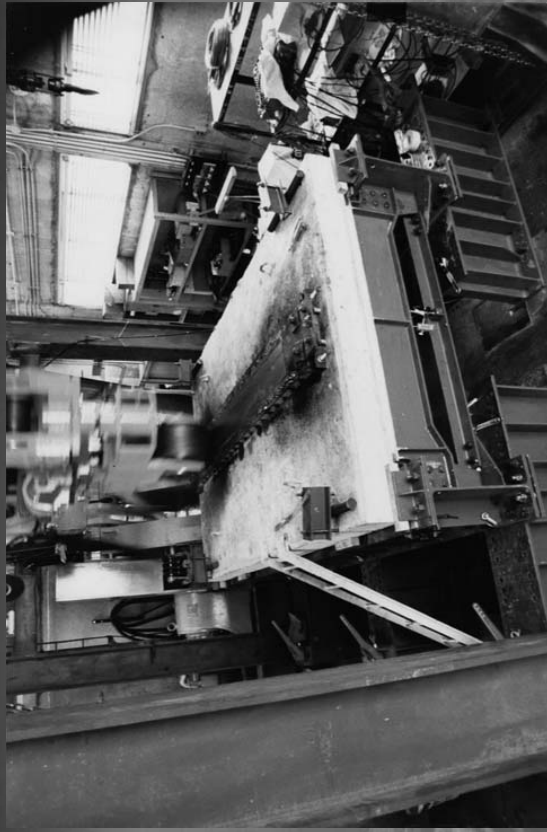
多点移動載荷の疲労試験



1.2 一定荷重往復走行疲労試験(ゴンゴロ)

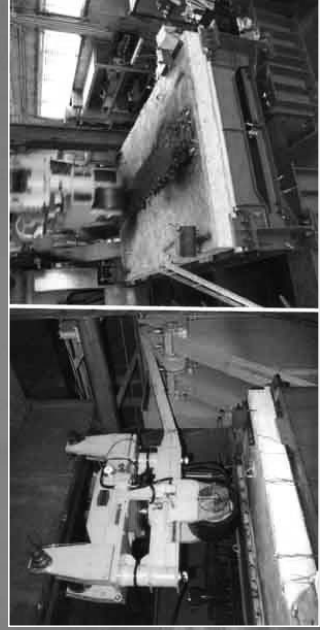


設置直後のゴンゴロ実験



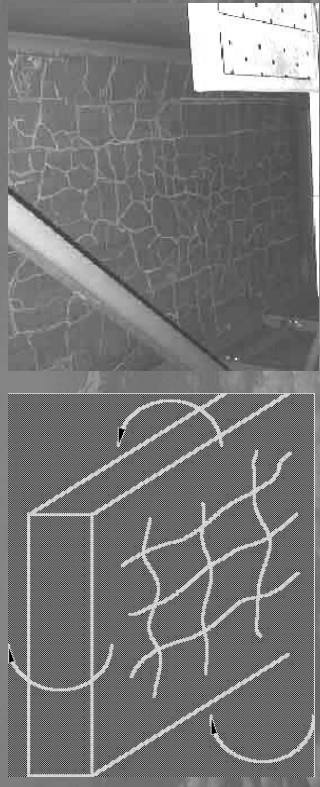
大阪大学の一号機(ゴンゴロ)

載荷能力 : 98~294kN(10~30tf)
輪荷重の走行範囲 : 200cm
載荷速度 : 28cycle/min
車輪 - 鉄輪 : W=500mm φ=500mm

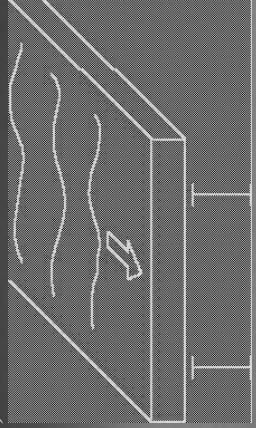


説明された疲労劣化のプロセス

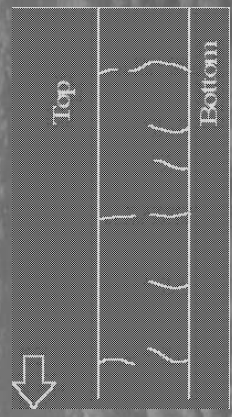
a) 下面での格子状ひびわれ網の形成



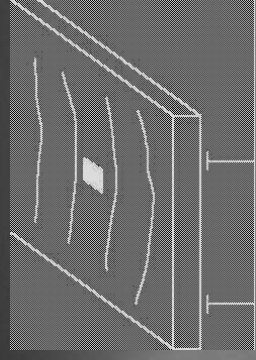
b) 上面でも直角方向ひび割れ



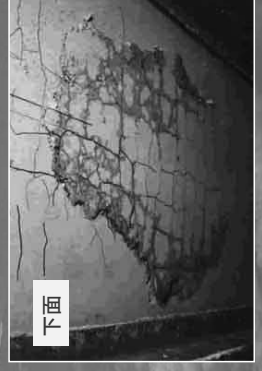
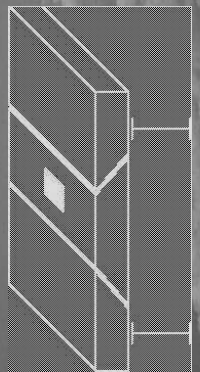
c) 上下のひび割れの貫通



d) ひび割れ面の磨耗によるはり状化



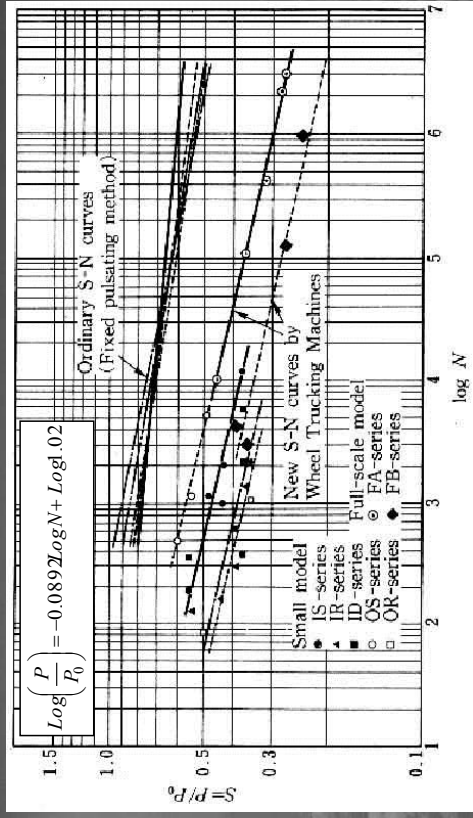
e) 主鉄筋断面の過大負担によるせん断疲労破壊



中央切断面での破壊状況(せん断破壊)



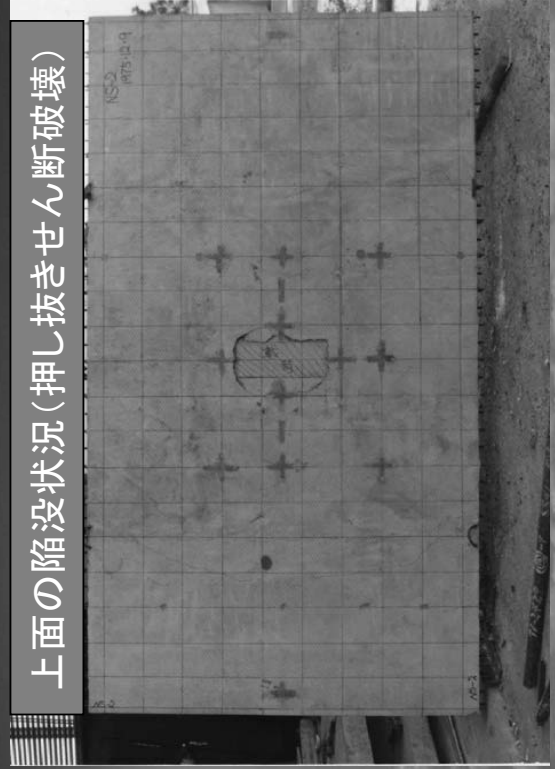
疲労強度曲線(S-N結果)
走行する輪荷重による疲労!



定点での静的載荷試験



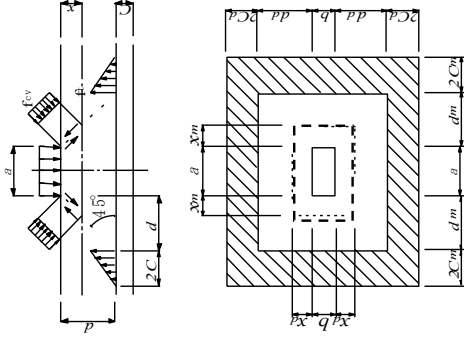
上面の陥没状況(押し抜きせん断破壊)



下面の破壊状況(広い)

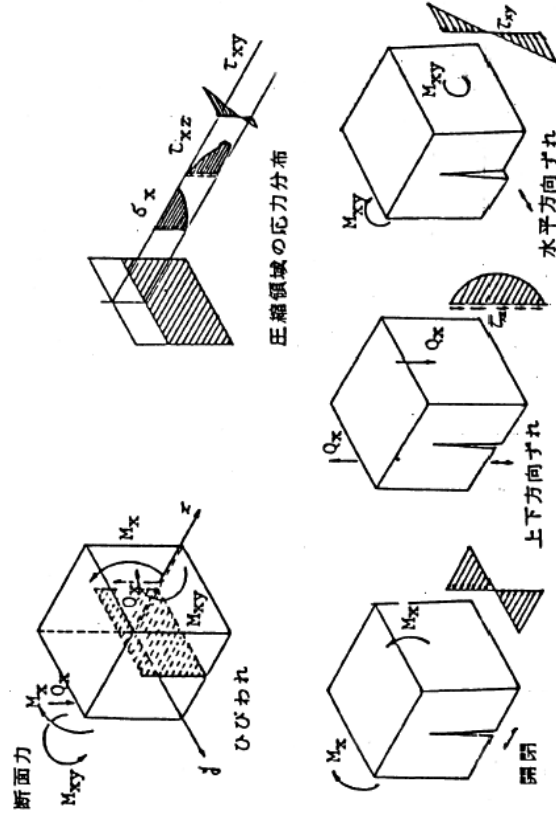
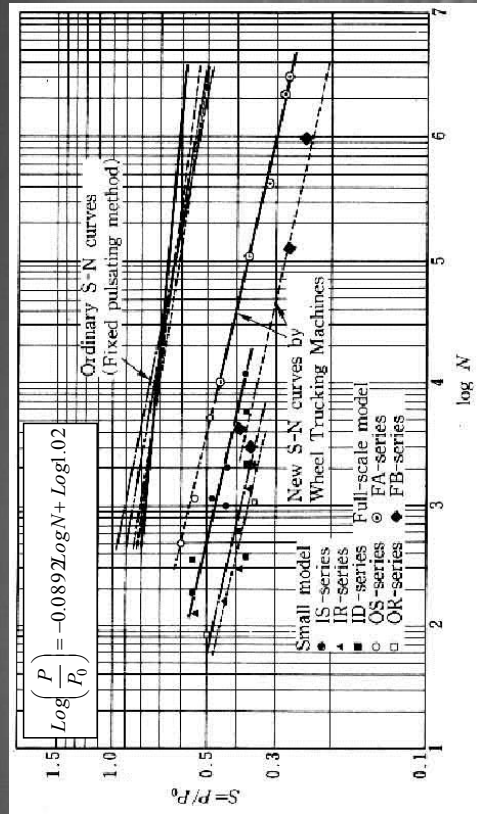


押し抜き
せん断破壊
モデル

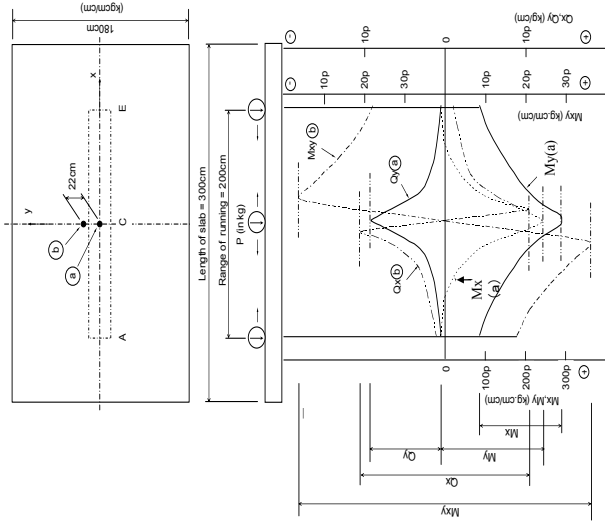


$$P_0 = f_v \{ 2(a + 2x_m)x_d + 2(b + 2x_d)x_m \} + f_c \{ 2(a + 2d_m)C_d + 2(b + 2d_d) + 4C_d \} C_m$$

疲労強度曲線(S-N結果)
走行する輪荷重による疲労!

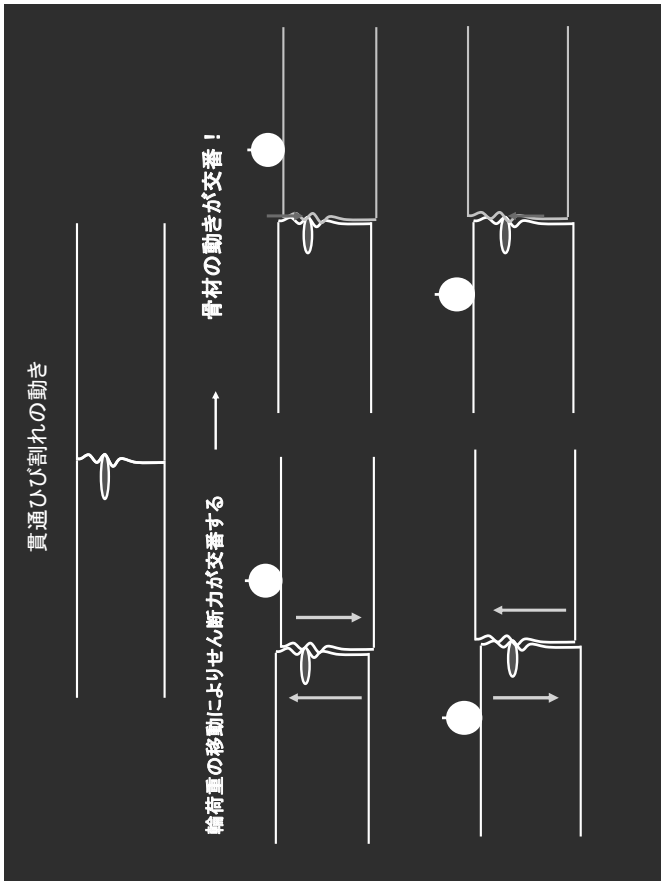


ひび割れの動きと断面力の関係

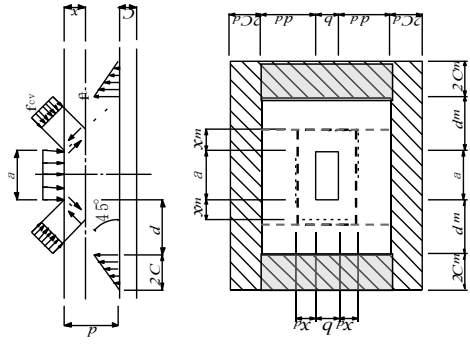


断面力の影響線

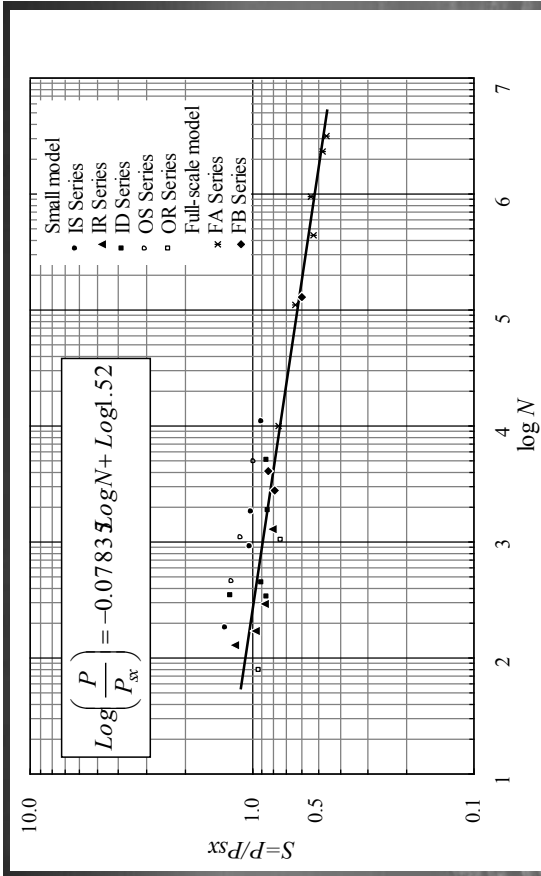
- M_x, M_y および Q_y の振幅は定点載荷のものと同様！
- ねじりモーメント M_{xy} と 配力鉄筋断面に作用するせん断力 Q_x は交番断面力で、これらの振幅は定点載荷の2.2倍！
- この交番断面力はひび割れ断面を擦り合わせを起させ、磨耗させる！
すなわち、貫通ひび割れ形成とより状況に最も影響の大きな断面力！



押し抜きせん断破壊モデル



$$P_0 = f_v \{ 2(a + 2x_m)x_d + 2(b + 2x_d)x_m \} + f_t \{ 2(a + 2d_m)C_d + 2(b + 2d_d + 4C_d)C_m \}$$



統一化したS-N曲線

床版の疲労はせん断疲労

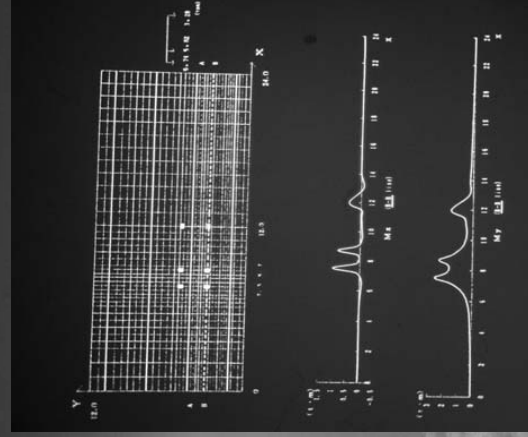
- 床版スパンをパラメーターとして実験荷重、床版厚、鉄筋量、コンクリートは同じ

支間長	1.4m	1.6m	1.8m
疲労寿命	50万回	72万回	103万回
せん断力ヒ	1.073	1.027	1.000
計算寿命	44万回	75万回	103万回

1.3 過積載車が外的要因!

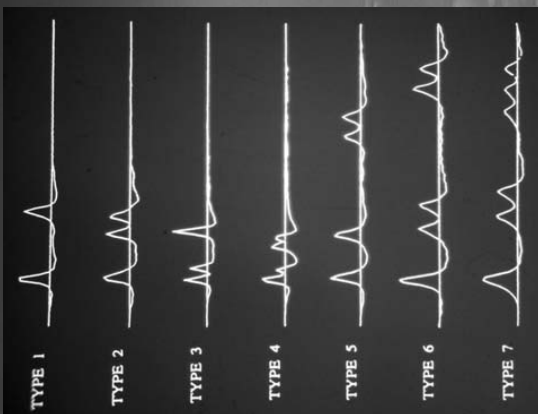
TYPE	Sort of trucks	Axle arrangement
TYPE 1	2-Axles Truck	
TYPE 2	3-Axles Truck (rear tandem)	
TYPE 3	3-Axles Truck (front tandem)	
TYPE 4	4-Axles Truck (tank truck)	
TYPE 5	4-Axles Truck (semitrailer)	
TYPE 6	5-Axles Truck	
TYPE 7	6-Axles Truck	

Fig. 5. Sort of Trucks and Axle Arrangement.



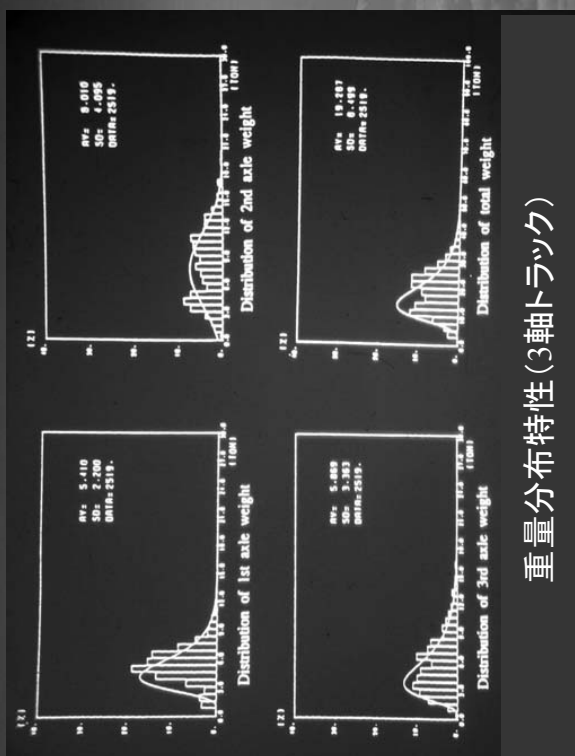
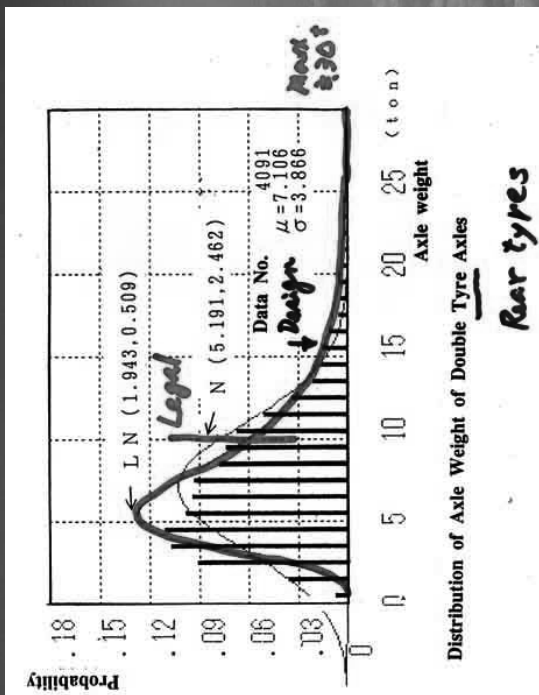
軸重によるひび割れの動き

SHIGEYUKI
MATSUI:



車種による応答特性

過積載車の実態



1.4 床版に対する水の振る舞い

雨水

加速!

鉄筋の腐食

骨材化現象



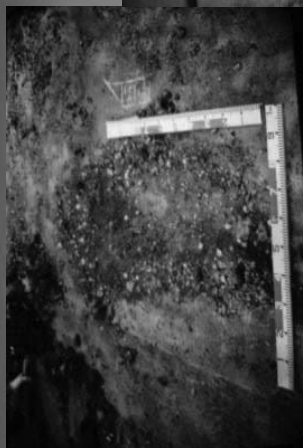
実験室での再現性？



骨材化



水の影響



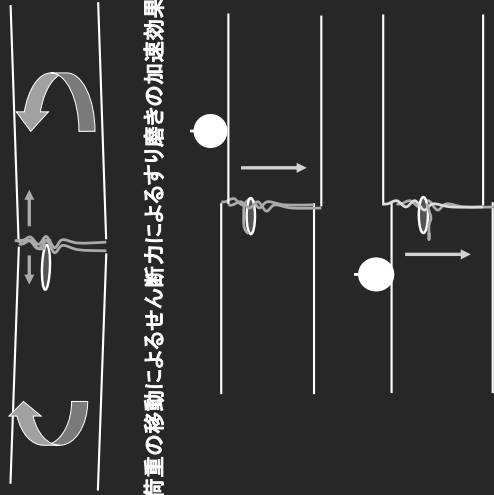
やはり起こった骨材化!



WS-1

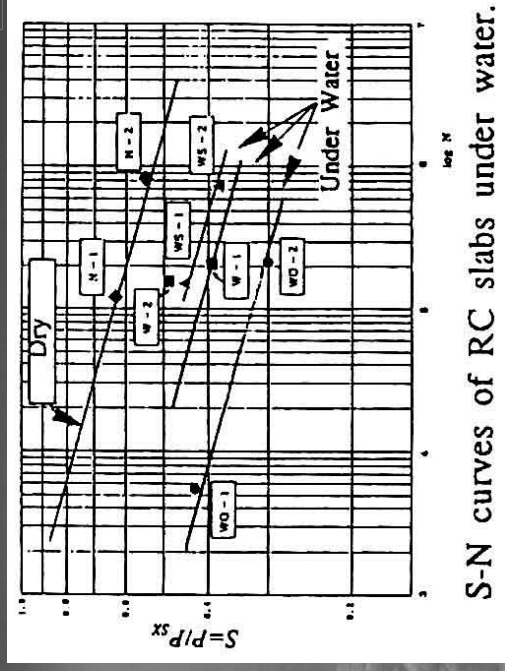
貫通ひび割れへの水の浸入

曲げモーメントによる水圧発生



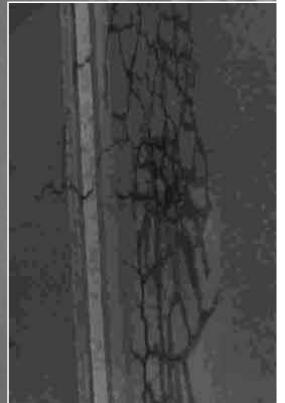
輪荷重の移動によるせん断力によるすり磨きの加速効果！

水によって寿命の大幅低下！！



S-N curves of RC slabs under water.

鉄筋の腐食は塩の浸入による！



防水工の必要なわけ？



越前海岸の橋梁床版

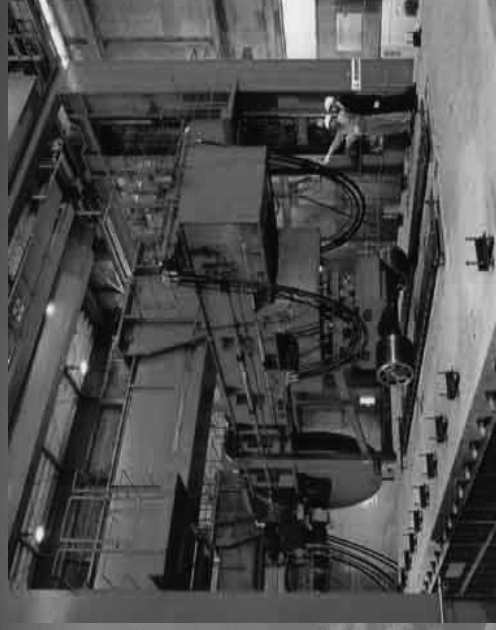


2. 輪荷重走行試験機の普及と 外国の損傷例

2.1 輪荷重走行試験機の普及 国土交通省(50トン) ギンゴロイロウ、 ゴンゴロレッド



JHの輪荷重走行試験機 輪荷重、軸重、タンデム軸重載荷可能



大阪工大型輪荷重走行試験機 ダブルタイヤ、ジャンボタイヤ(25トン)



その他の輪荷重走行試験機

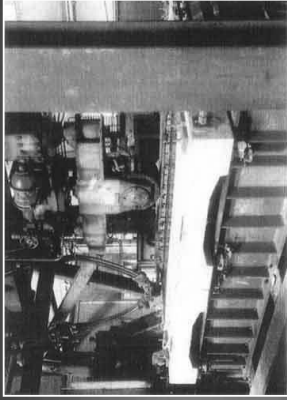
- 山口大学(走行歯車式)
- 横河ブリッジ(荷重は鉄板)
- 大阪大学コンコロ(鉄板2トンまで)
- 住友金属ブラックジャック(自走トラック)
- 大阪大学コンコロ(5m移動)
- 日本大学(円軌道回転)
- 日本大学(床版+支持装置が移動)
- 寒地土木研究所(GONGORO DO)

3. 高耐久性床版の開発 —プレストレスした床版—

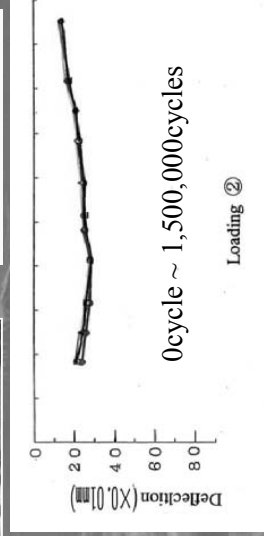
3.1 縦締めPC床版



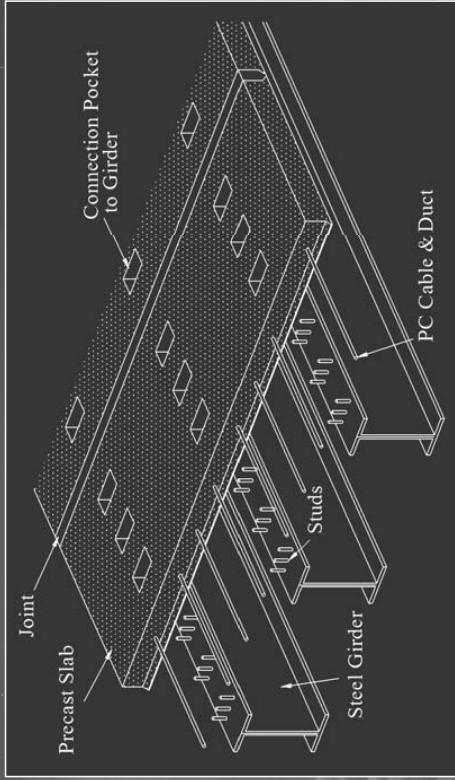
ゴングロによる耐久性評価



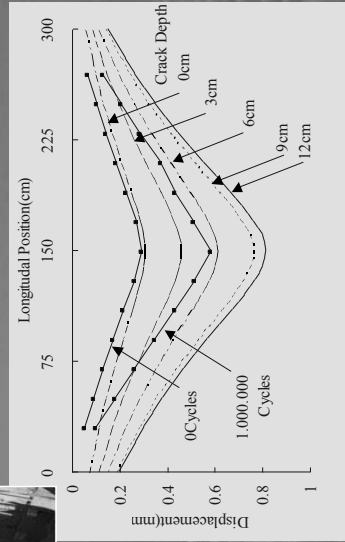
全く変化なし！



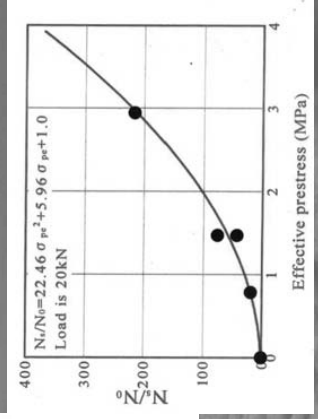
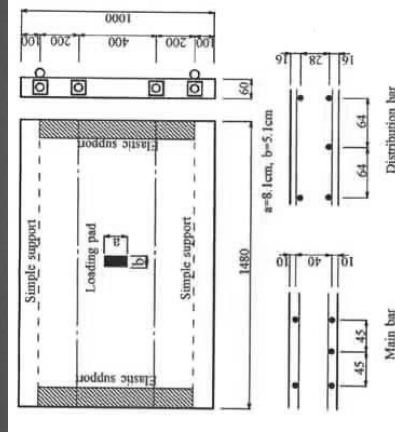
橋軸方向プロレストレスが最も効果的



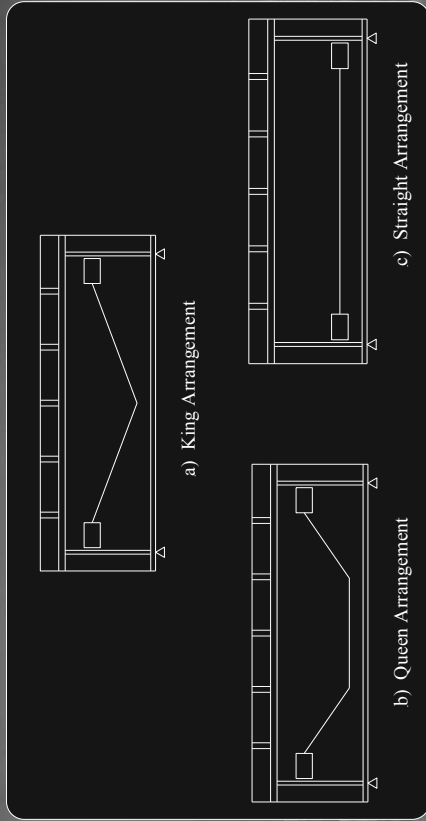
RCのプレキャスト床版でもOK



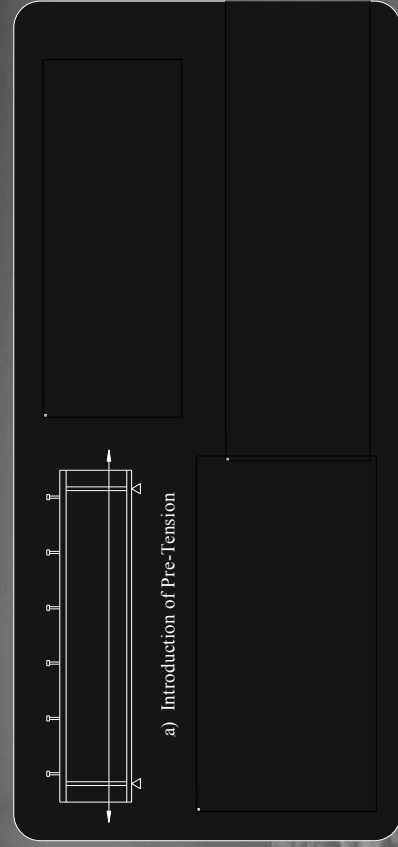
縦締めPCの威力は？



外ケーブルによるプレストレス

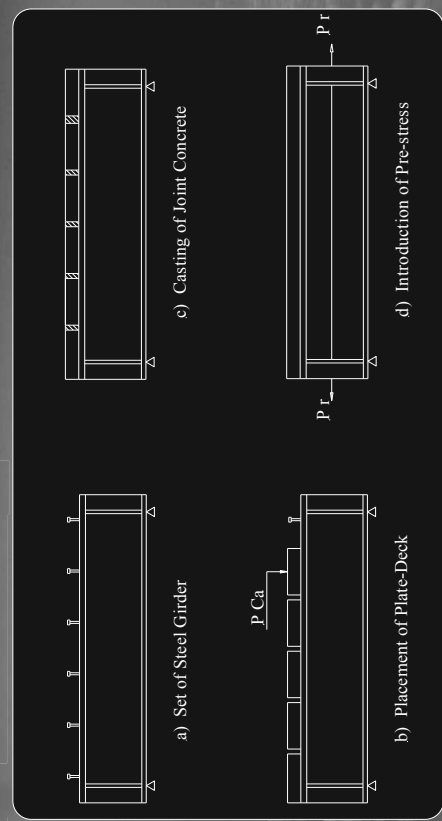


プリテンション方式

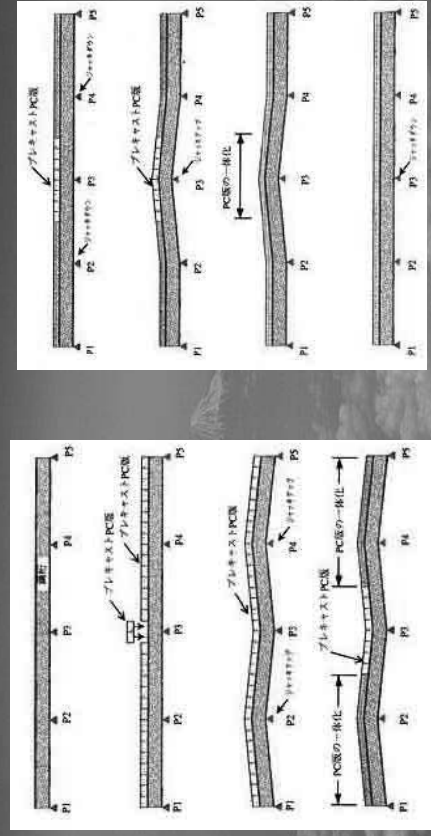


外ケーブルによる橋軸方向PS

・ポストテンション方式



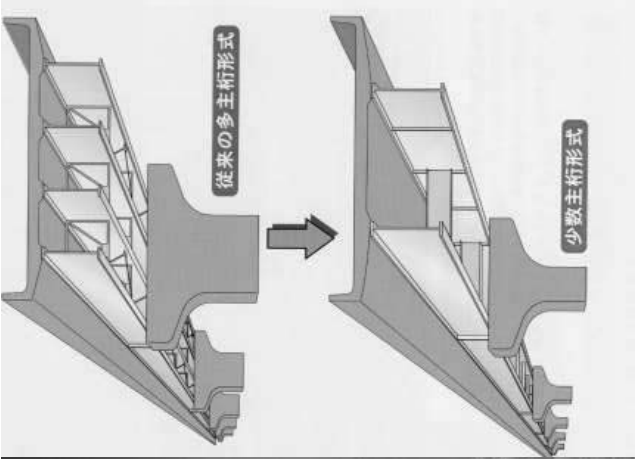
3.2 中間支点のジャッキアップダウンによるプレストレス導入



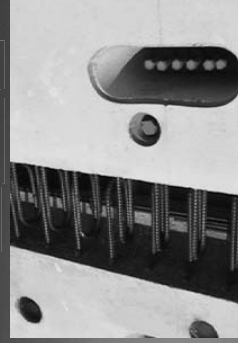
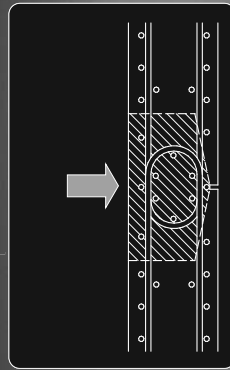
東海大府の主桁間隔6m！



3.3 横締めプレ
キャストPC床版
+ループ継手



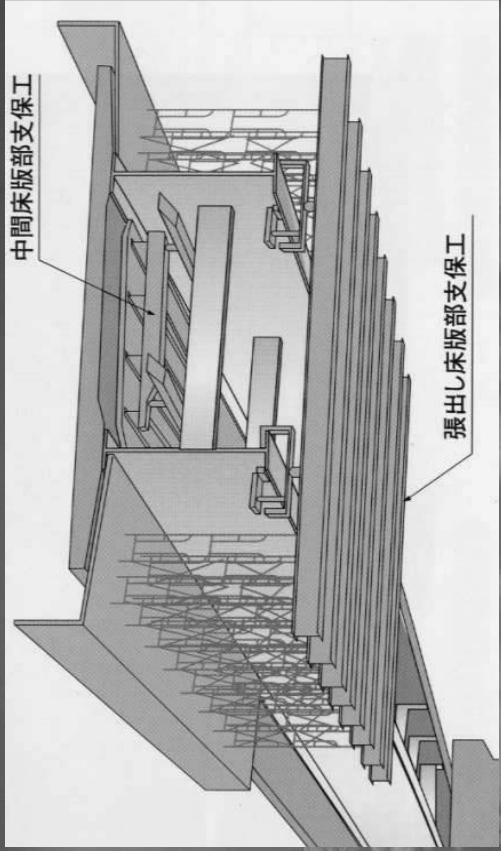
ループ継手の開発+横締めPC版



3.4 場所打ちPC床版の開発(第二東名)



移動型枠による現場打ち床版の建設工法

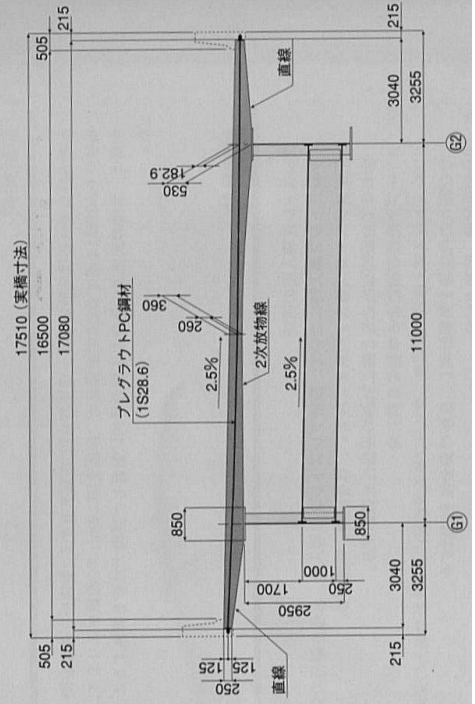


10m毎にコンクリート打設



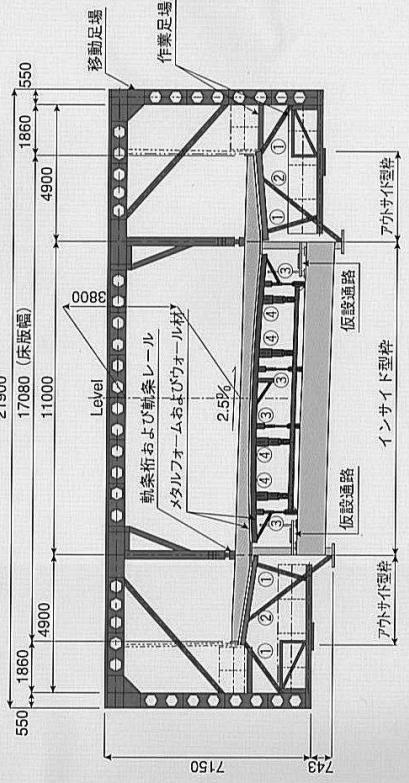
藁科川橋 主桁間隔11mの2主桁橋

試験体の断面図/鉄桁



移動型枠のワーゲン

【鉄桁部断面図】

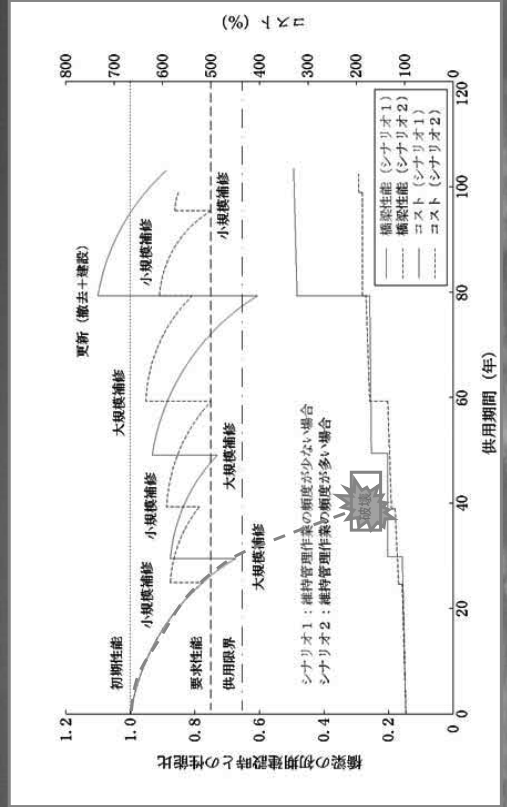


第二東名・藁科川橋の完成



4. 損傷対策—補修と補強—

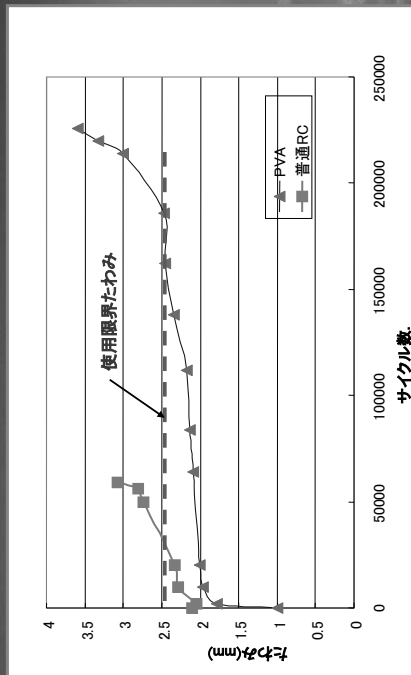
4.1 床版の損傷と対策の関係 性能とコストの推移(イメージ図)



床版の最終破壊例

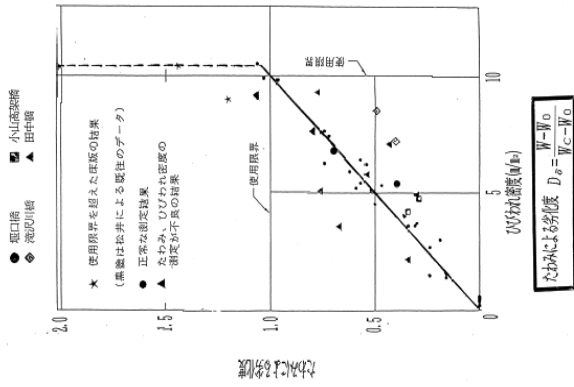


輪荷重走行試験における床版中央のたわみ変化



普通コンクリート床版(普通RC)
耐久性コンクリートを用いた床版(PVA)

たわみによる劣化度とひび割れ密度の関係



床版パネルの損傷度判定基準

項目	ひび割れ間隔・形状	ひび割れ幅	ひび割れ密度
I	<ul style="list-style-type: none"> 0.2m以下 格子状に発生 	0.2mm以上が目立ち連続的な角落ちが生じている。	8 m ² /m ² 以上
II	<ul style="list-style-type: none"> 0.5~0.2m 格子状に発生 	0.2mm以上がかなり目立ち部分的な角落ちもみられる。	4~8 m ² /m ²
III	<ul style="list-style-type: none"> 0.5m程度 格子状直前のもの 	0.2mm以下が主であるが一部に0.2mm以上も存在する。	4 m ² /m ² 程度
IV	<ul style="list-style-type: none"> 1.0~0.5m 一方方向が主で直角方向は従、かつ格子状でない。 	0.1mm以下が主であるが一部に0.1mm以上も存在する。	2~4 m ² /m ²
OK	<ul style="list-style-type: none"> 1.0m以上 一方方向のみ 	0.05mm以下 (ヘアークラック程度)	

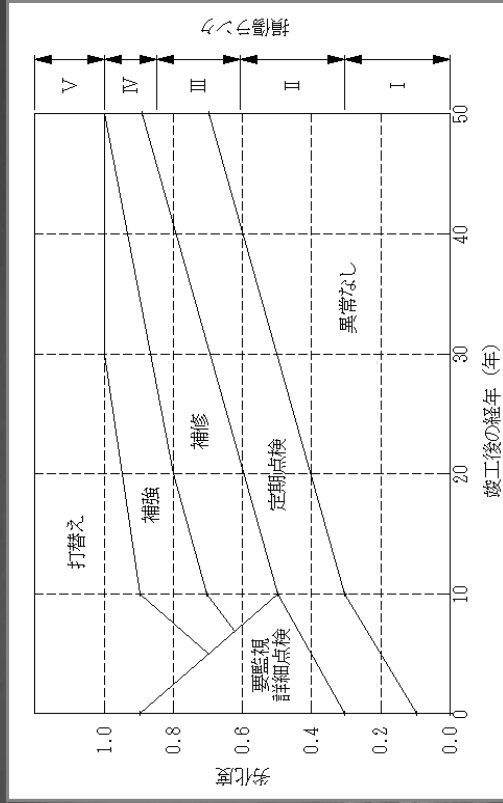
橋梁全体の床版損傷度判定基準

項目	詳細調査パネルの損傷割合
I	<ul style="list-style-type: none"> ランク I のパネルが存在する ランク II のパネルの合計が70%以上
II	<ul style="list-style-type: none"> ランク II のパネルの合計が50~70%
III	<ul style="list-style-type: none"> ランク III のパネルの合計が50~70%
IV	<ul style="list-style-type: none"> ランク IV のパネルの合計が50~70%
OK	<ul style="list-style-type: none"> ランク IV のパネルの合計が50%未満 概略調査結果で、詳細調査の必要なし

損傷ランクと対策の関係

対策 ランク	特に 必要なし	要注意	補修	補強	打替え
OK	■				
I		■	■		
II			■	■	
III				■	
IV					■

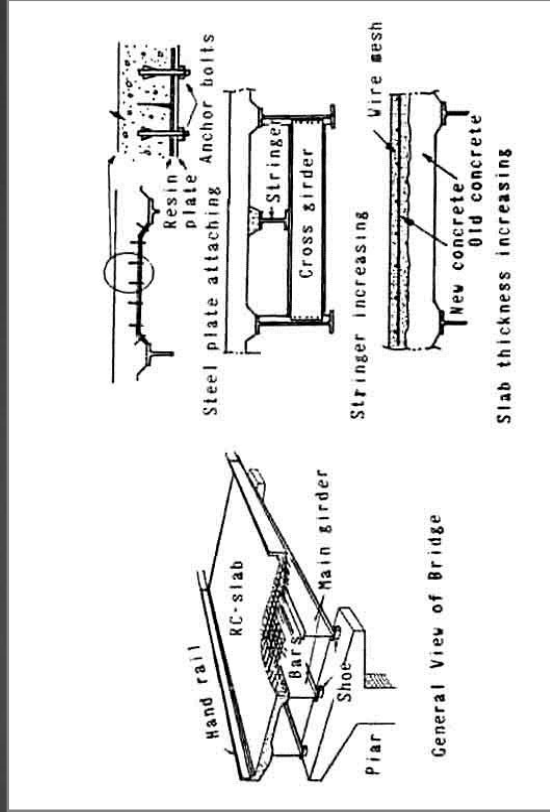
時間を考慮したひび割れ床版の損傷ランクと対策の区分



補修・補強工法の選定

対策	工法	補	要
打換	全面打換		床版が抜け落ちる状態に近い場合に採用する。
補修	部分打換		
	上面増厚		床版厚の不足する場合に採用する。
補強	縦桁増設		床版、床組などの構造の変形剛性が不足している場合に採用する。
	下面増厚		床版厚の不足する場合に採用する。
補強	鋼板接着		配力筋不足を補う場合に採用する。
	カーボンシート接着		
	FRP接着		ひび割れ以外の損傷が目立つ場合に採用する。
樹脂注入			応急処置程度で、他の工法との併用が計画されている場合に採用する。

4.2 代表的な補修・補強工法



鋼板接着工法



上面増厚工法(JH)



縦桁増設工法



床版の凍害例



増厚部の打継ぎ目の剥離



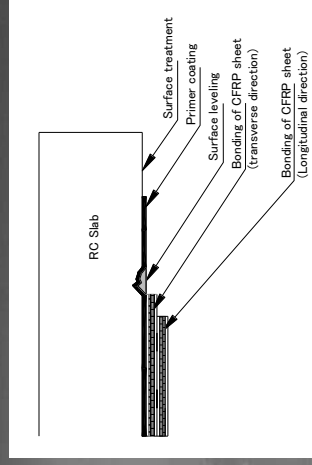
下面増厚工法



4.4 損傷対策の新工法

1. エポキシ樹脂の注入
2. 縦けた補強工法
3. 増厚工法
 下面増厚、上面増厚
4. 鋼板接着工法
5. FRP積層貼付工法

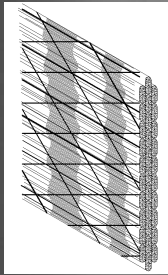
炭素繊維シート接着工法



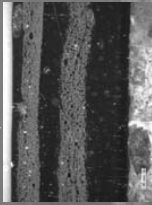
ゴングロによる耐久性評価



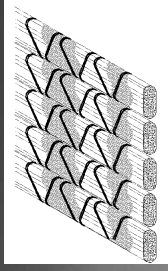
Knit of CFRP Sheets



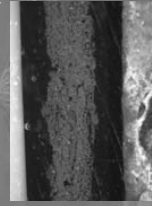
Laminated type
(積層タイプ)



Laminated type
300g/m² x 2 layers

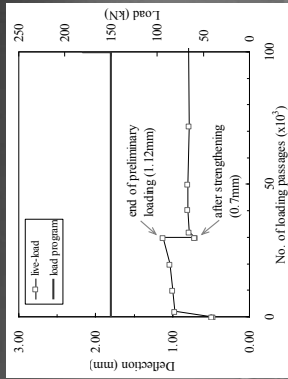
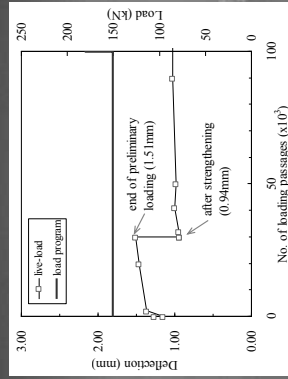


Warp-knitted type
(経編みタイプ)

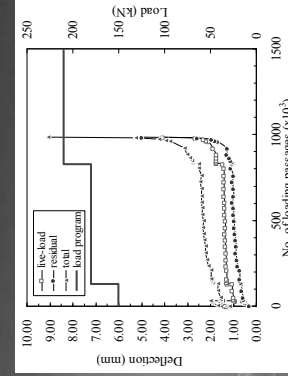
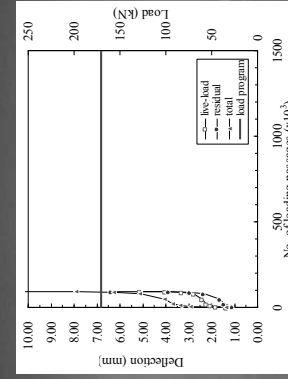


Warp-knitted type
600g/m² x 1 layer
樹脂の含浸度

たわみの減少度



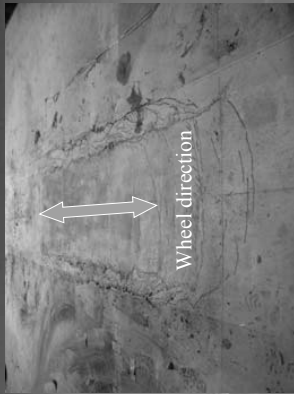
たわみ変化



破壊性状



W600



W600D

Failure state



W600D

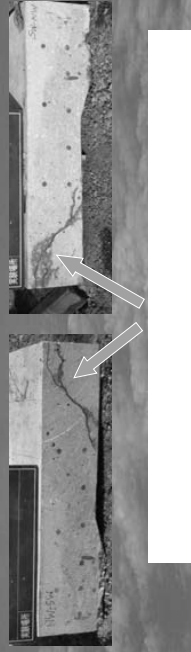


W600D



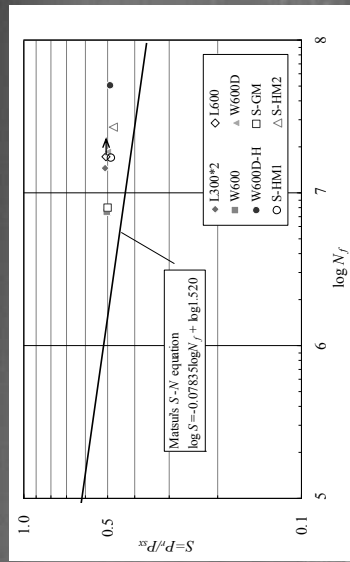
W600D-H

Debonding of CFRP sheet

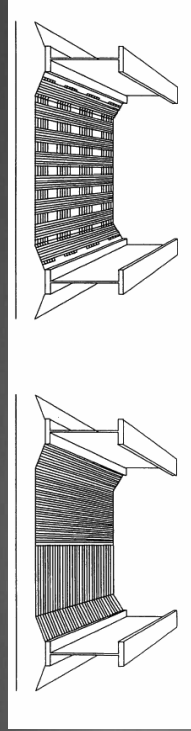


S-N Relations

Specimen	P_{sx} (kN)
L300*2	295
L600	296
W600	300
W600D	300
W600D-H	309
S-GM	302
S-HM1	310
S-HM2	316



格子貼り



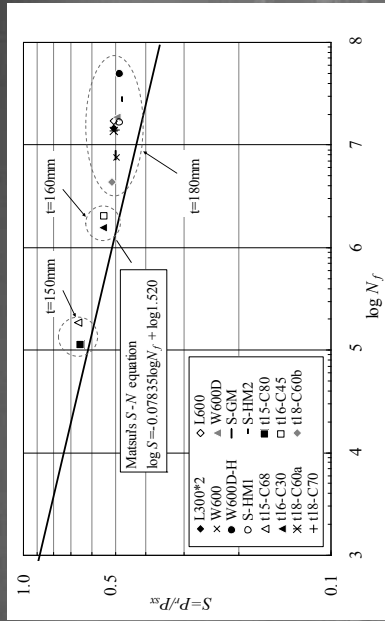
Full-surface covering

Grid pattern

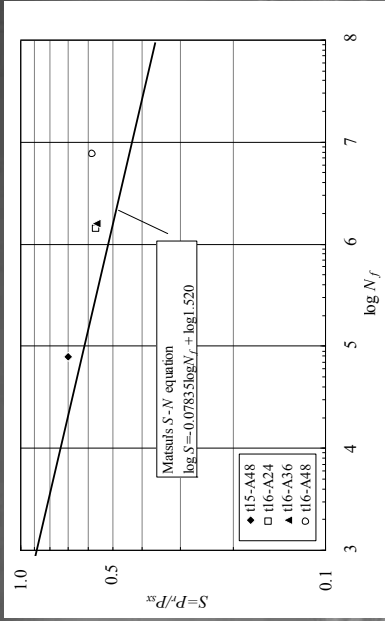
メリット:

- 材料コストの低減
- 水分の残留を最少に
- コンクリートの劣化のモニタリングが必要

S-N Relations (CFRP-strengthened specimens)



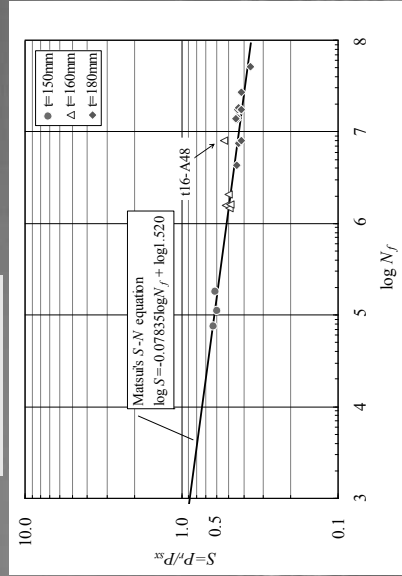
S-N Relations (AFRP-strengthened specimens)



Proposed Method (2)

$$P_{sx} = 2\tau_{s \max} \cdot x_m \cdot B + 2\sigma_{t \max} C_m B'$$

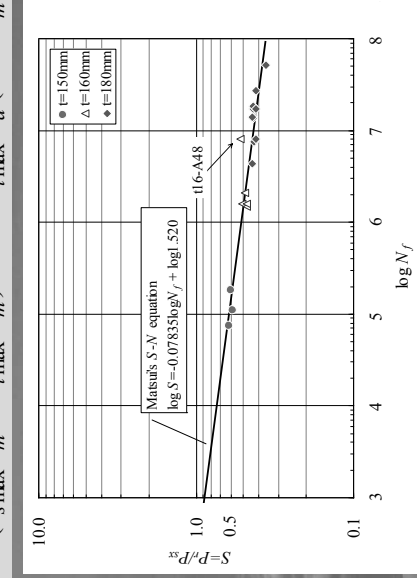
$$B' = b + 2d_d + C_d$$



Proposed Method (2)

$$P_{sxt} = 2(\tau_{s \max} x_m + \sigma_{t \max} C_m) B + 2\{0.25\sigma_{t \max} C_d(a + 2d_m)\}$$

$$= 2(\tau_{s \max} x_m + \sigma_{t \max} C_m) B + 0.5\sigma_{t \max} C_d(a + 2d_m)$$



5. 鋼・コンクリート合成床版

5.1 床版の分類と架設方法

- フルプレキャスト床版
コンクリート系、合成床版も
- ハーフプレキャスト床版
合成床版、コンクリート系も
- 現場打ち床版
RC床版、PC床版

パネル敷設の工法

- ①トラッククレーンによる敷設
- ②小型機材による橋上から敷設
- ③桁と一体での敷設
- ④桁と一体で送出し架設

SCデッキ (鋼・コンクリート合成床版)



送り出し架設(道路・鉄道上)



大ブロック架設 (高速道路上)



5.2 合成床版の特徴と課題

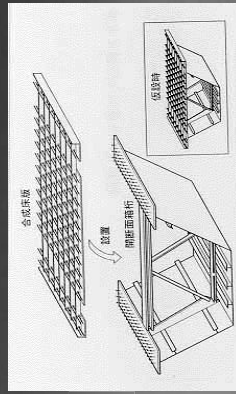
■ 特徴

(1) 構造面 (合成構造)

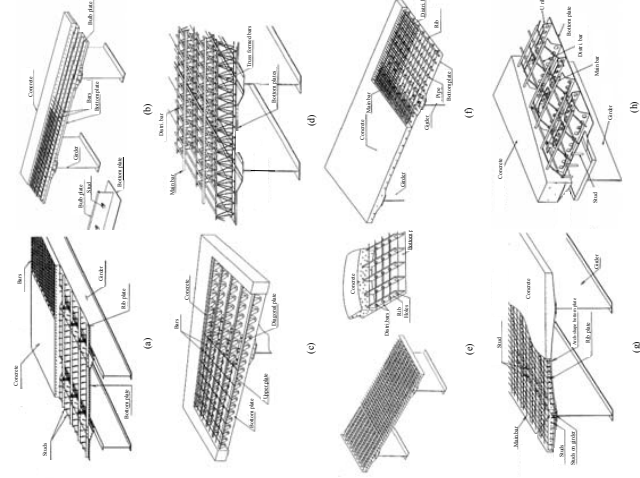
- ・床版厚の低減
- ・高耐荷力
- ・高疲労耐久性
- ・斜角や曲線桁への高い適用性
- ・コンクリート片の落下事故の心配がない。
- ・架設時の桁補強材としての利用

(2) 施工面 (ハーフプレキャスト版)

- ・桁架設と同時施工
- ・足場設備・支保工の省略、高速施工
- ・工事の安全性



5.3 開発された 合成床版



(9) Fig.19 Typical Composite Decks

合成床版の疲労耐久性評価

建設省土木研究所の
輪荷重走行試験機による階段載荷

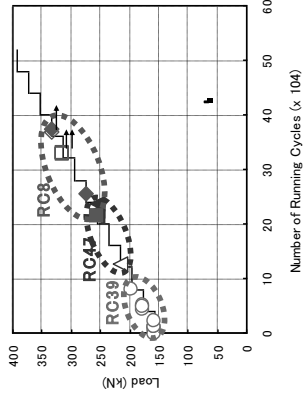


Fig.14 Loading program at Public Works Institute

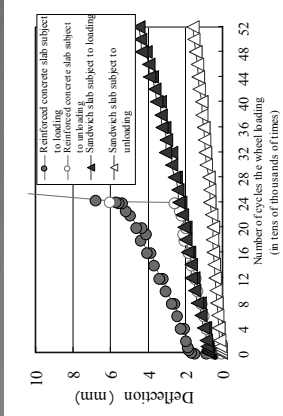


Fig.21 Maximum deflection changes of Ifis-deck with the results of a RC slab.

6. 特殊合成床版

合成床版の設計

- ・ 土木学会

合成構造物の設計指針

Part B; 合成構造物, 1997

輪荷重走行試験機による実験をベースに!

6.1 ハーフプレキャスト合成床版 コンクリート+コンクリート

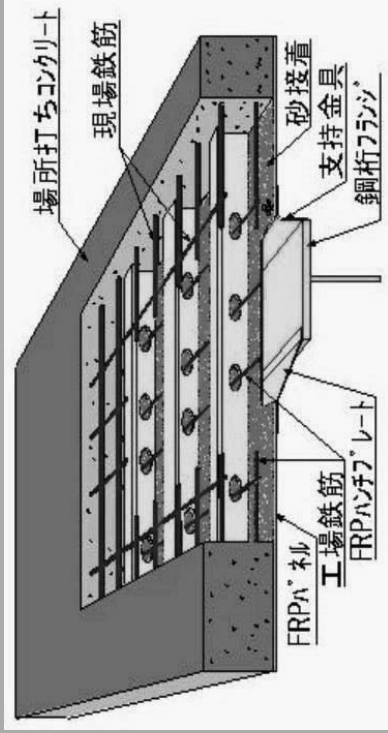


ハーフプレキャスト床版

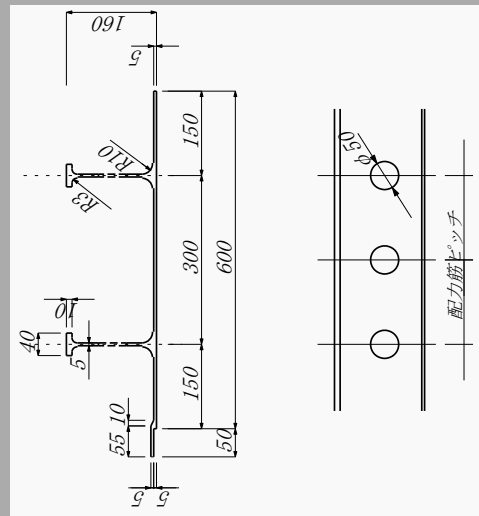


6.2 FRP 合成床版

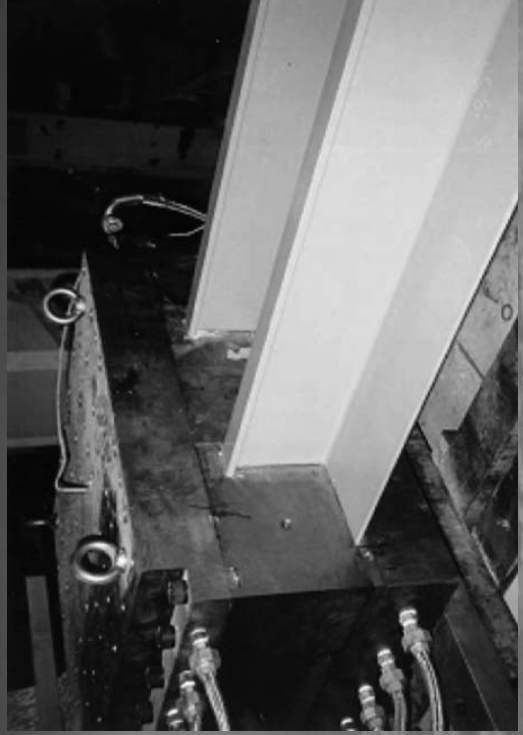
引き抜き成型材



引き抜きFRPの断面



引き抜き成型状況



FRPパネルの現場架設(小さい重機でOK)



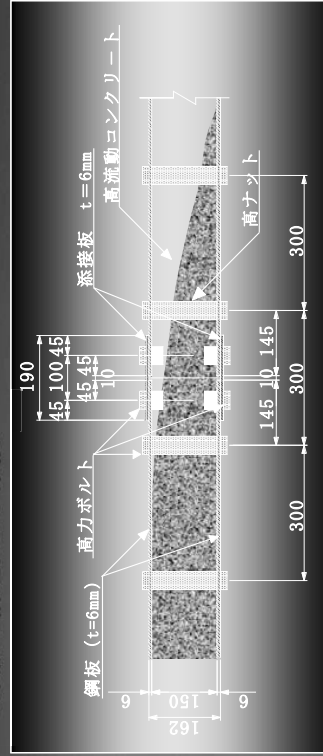
沖縄豊見城のFRP床版



6.3 サンドイッチ合成床版

構造概要

<床版の構造および添接>

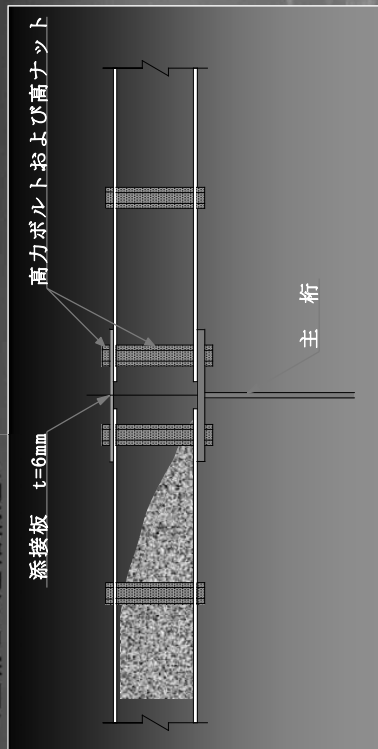


床版添接構造図(単位:mm)

- ▽上下6mmの鋼板と高ナットおよび高力ボルトで構成
- ▽同程度の剛性を有するRC床版と比較して25%程度軽量

構造概要

<主桁との連結構造>



主桁との連結部(単位:mm)

▽主桁との連結は、添接板と高力ボルトによる摩擦接合
 ▽コンクリート打設前に、主桁と連結

工場製作



レーザー加工



高力高ナット設置完了



上鋼板設置完了

施工状況



クレーンによる架設



搬送装置による架設



搬送装置駆動部



ジャッキアップ

施工状況

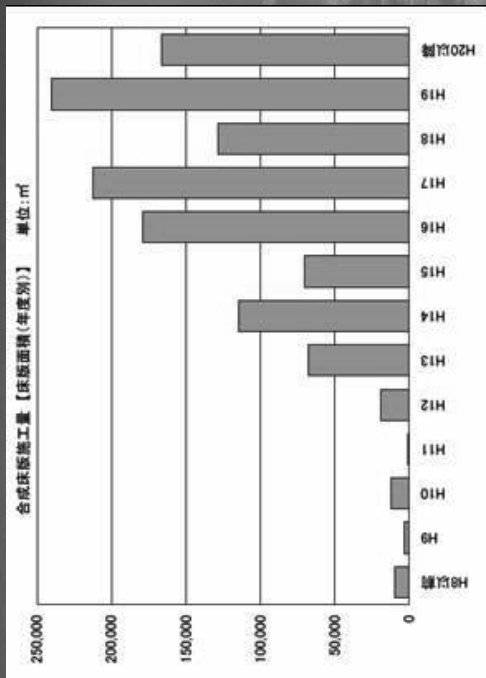


高流動コンクリート打設



床版施工完了

6.4 合成床版の採用実績



サンドイッチ合成床版の実績

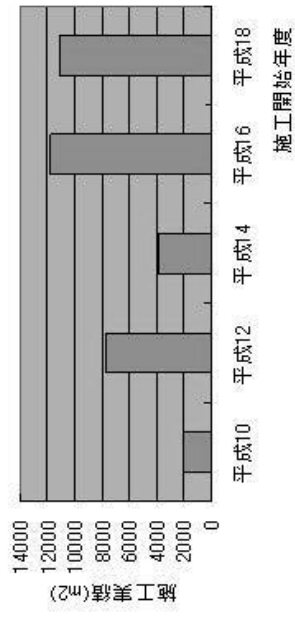


図3 サンドイッチ合成床版の施工実績変化

ご清聴を感謝します