

(一社)コンクリートメンテナンス協会
2024大阪フォーラム

道路橋床版の長寿命化技術

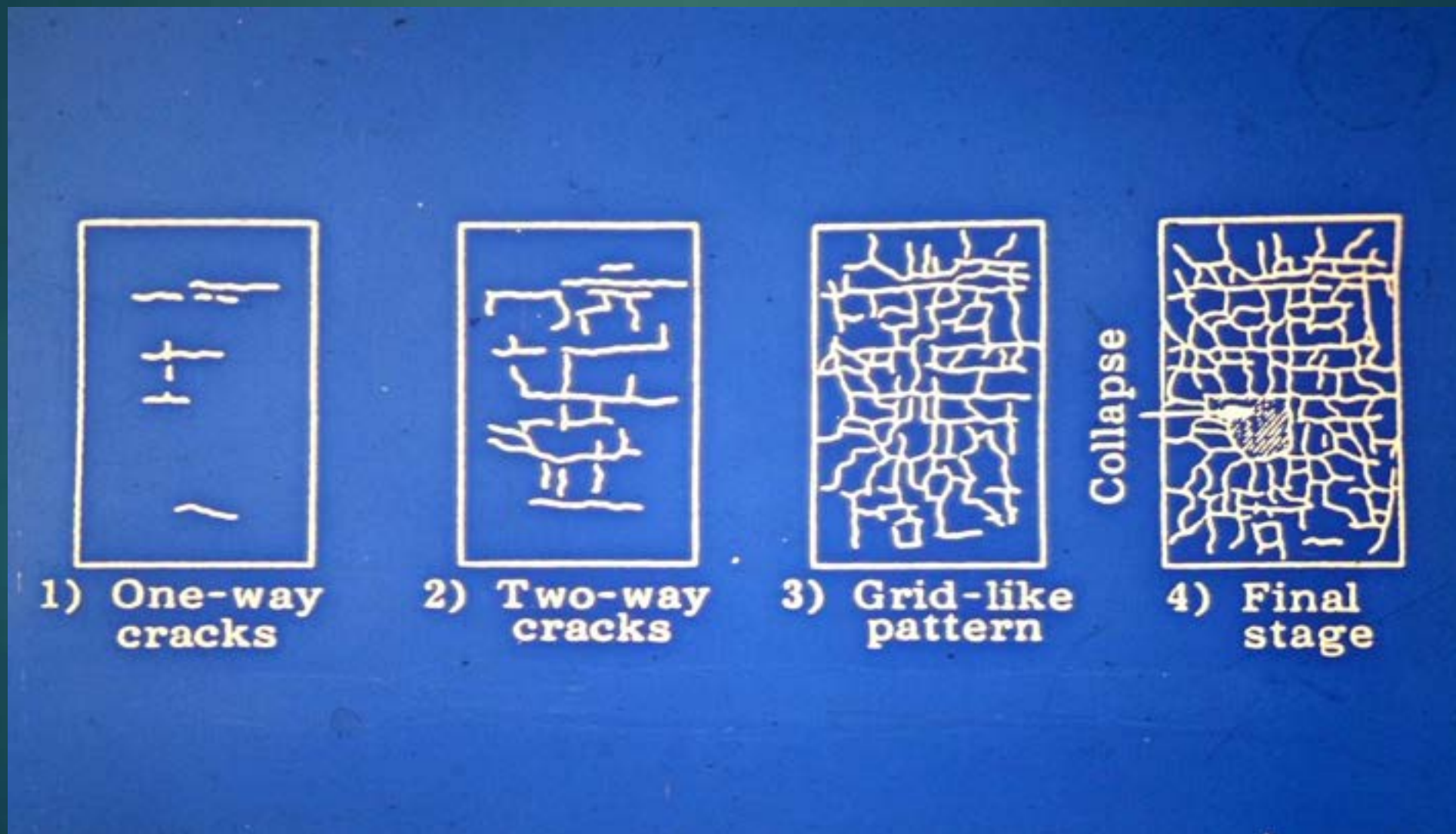
(令和6年5月31日)

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

(1) RC床版の陥没破壊！



(2) 床版損傷のプロセス



阪神公団と土木学会関西支部の調査研究会！

委員長 岡田清教授

- ▶ 主要メンバーはコンクリート専門
京都学派（藤井教授、小柳教授、
児島教授、小野部長（鴻池）
- ▶ 構造系
 - ・ 大阪工大 岡村教授
 - ・ 大阪市大 園田教授
 - ・ 阪大 松井助教授

▶ 討議内容

- ・ 陥没は疲労か？
材料・施工の問題！
- ・ 補修・補強

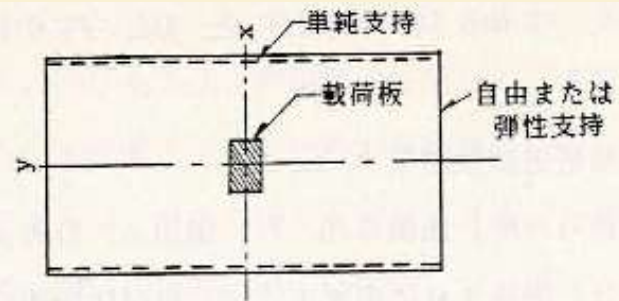
首都高は増桁工法

阪高は鋼板接着工法

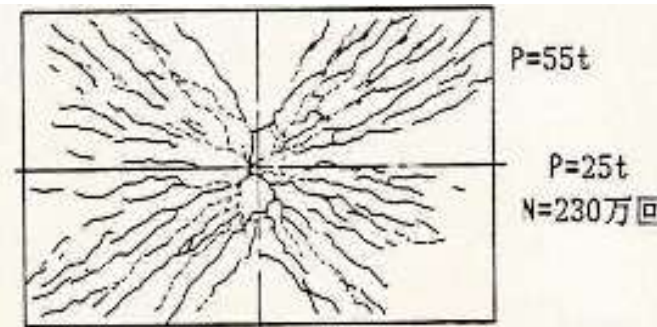
会計検査院からどちらが
が良いか？ 住金のブラッ
クジャックで試験！

阪神公団から報告書

平成3年12月

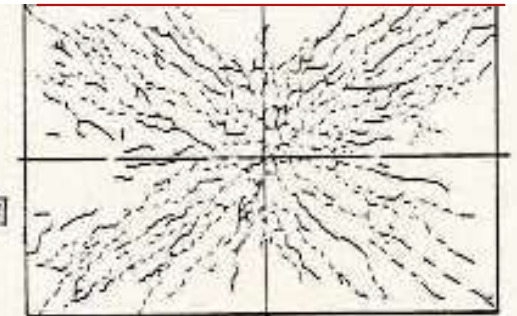


一定点荷の疲労実験方法。



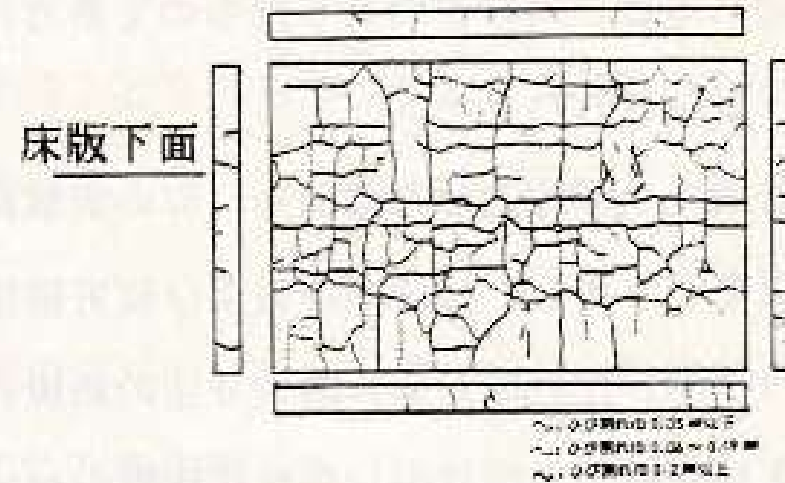
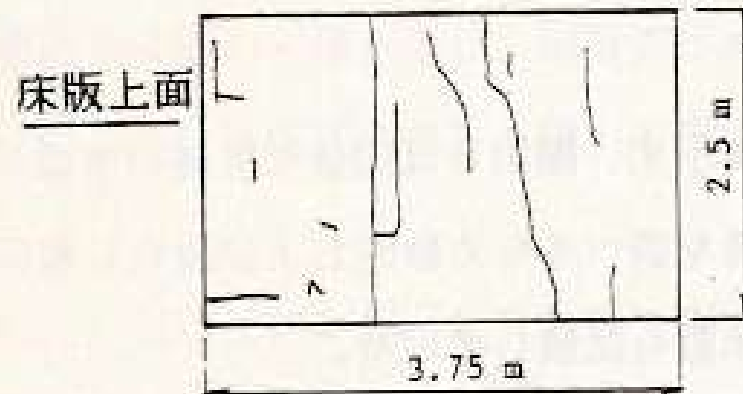
供試体 Ns

(a) 静的荷

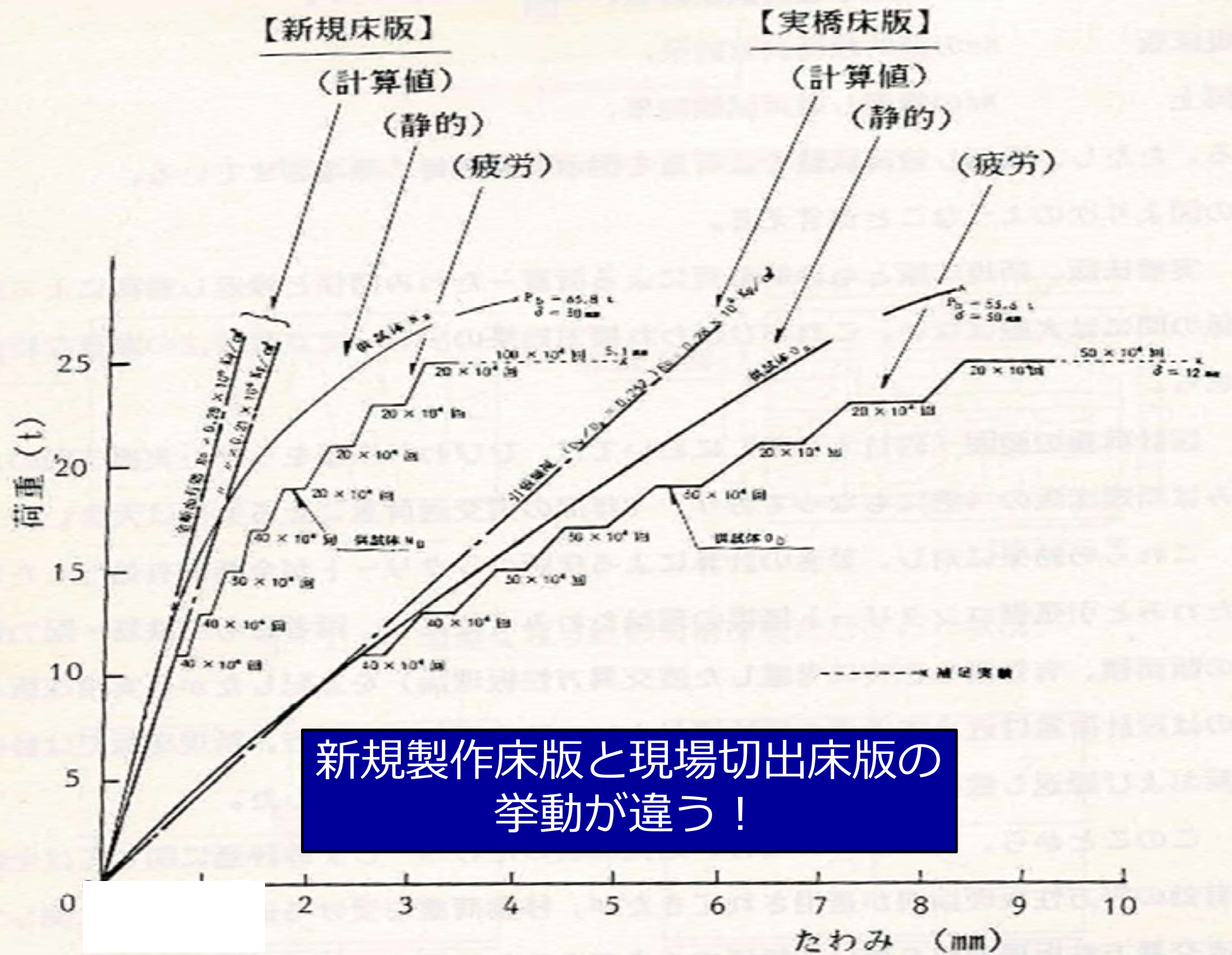


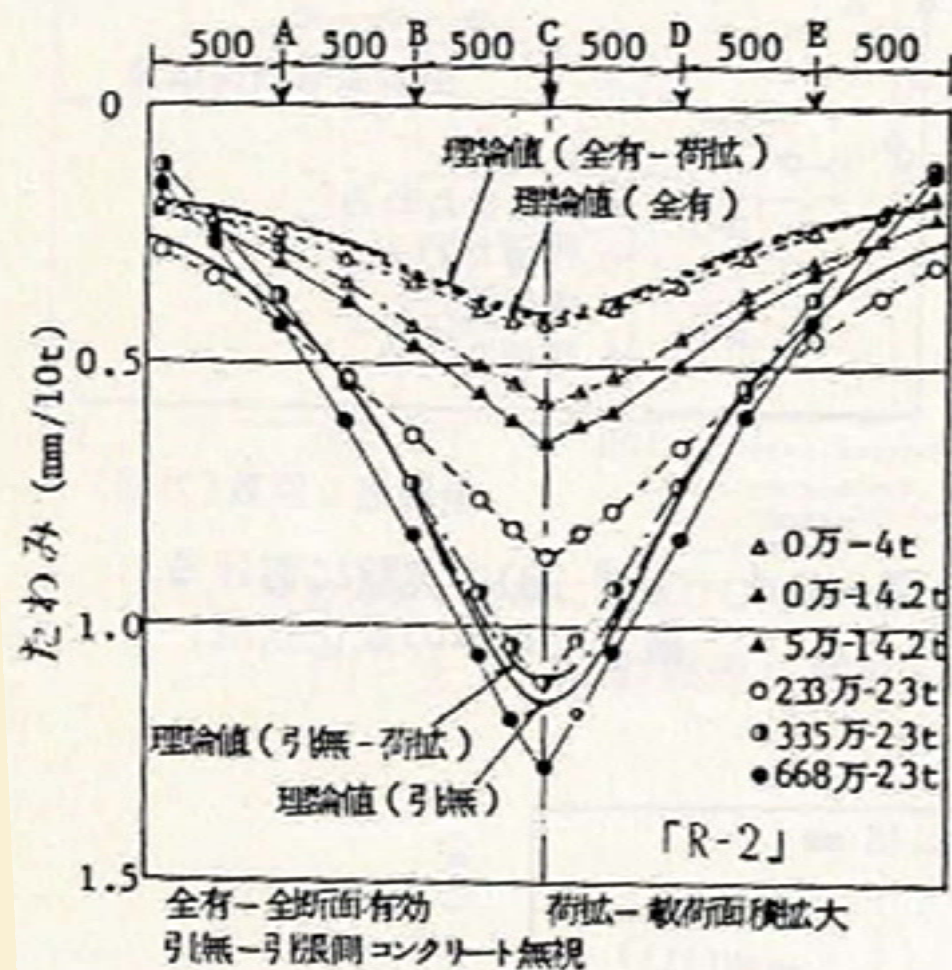
供試体 Nd

(b) 一定点での繰返し荷

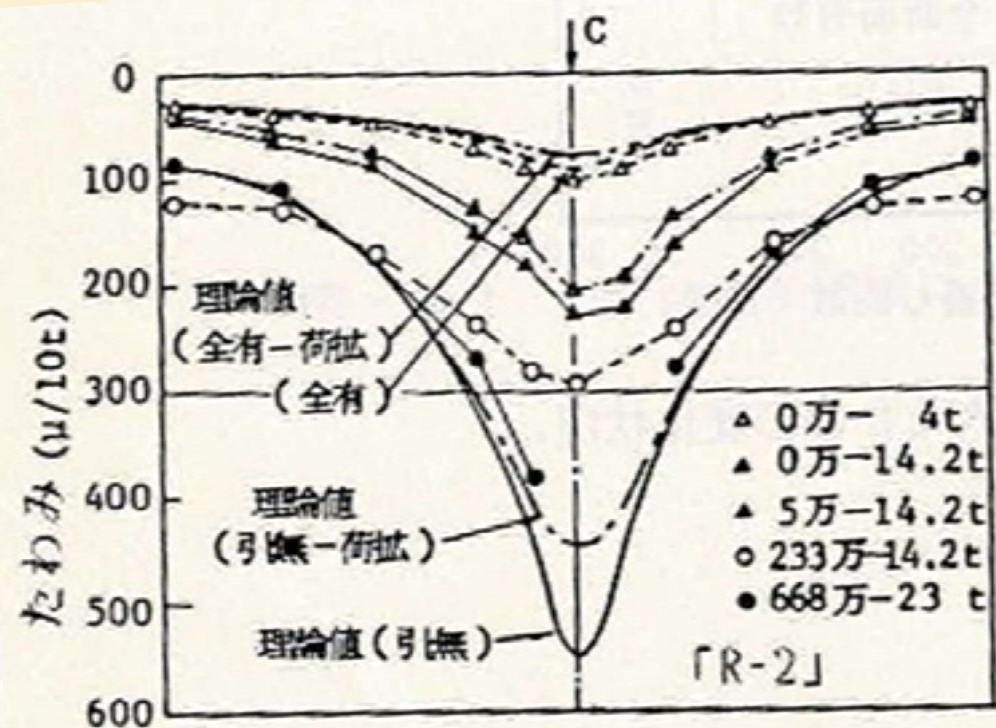


号線の実橋床版のひびわれ状況。





(a) C点載荷時の橋軸方向たわみ分布変化



(a) C点載荷時の主鉄筋ひずみの分布変化

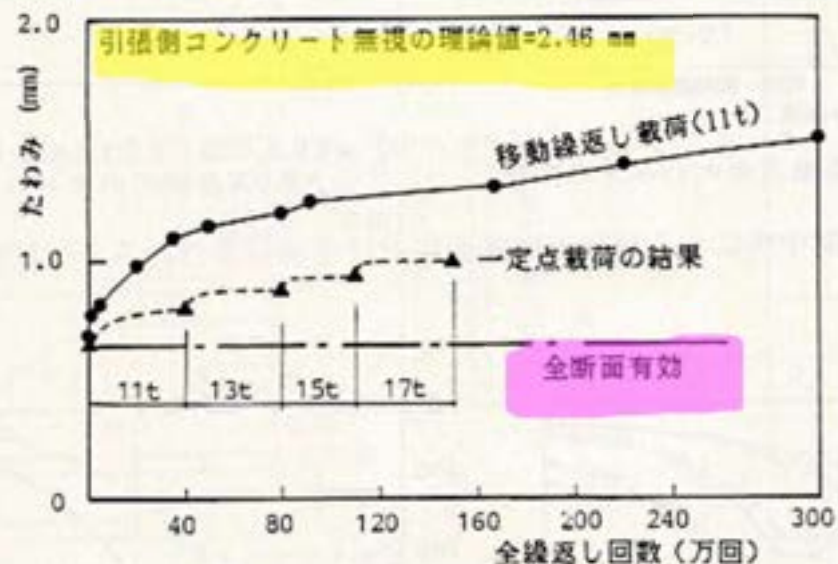


図-25 文献 27)の実験における

破壊は鉄筋が数本疲労破断し、その後、陥没破壊！

実橋では鉄筋は全く疲労破断なしで、コンクリートが陥没抜け落ちする！

実験は大変な労力を要する！

一回づつ移動させるべき！

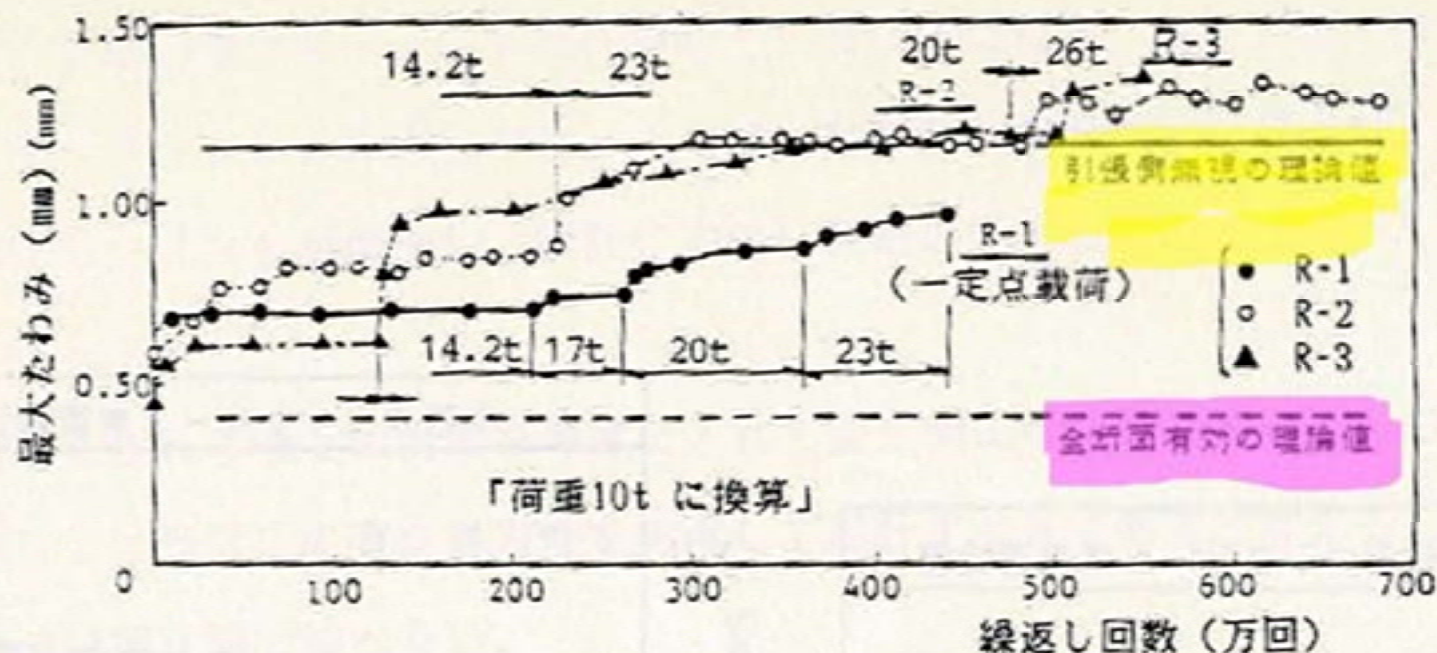


図-26 床版中央の最大たわみの繰返し数に伴う変化状況。

定点载荷の疲労実験ではダメ

多点移動载荷による実験を開始

なかなか壊れない！

多点移動载荷では移動回数が極僅か！

常時移動する必要がある！！

実験装置がない！！！！ 途方に暮れる！

天の助けあり！

装置を作ることを全力で支援しよう！！！！

さて、これらの装置をどこで作ってもらえるのか！

栗本鐵工所の機械部門の部長に相談！

ゴンゴロの誕生！

(3) 大阪大学の一号機で再現

載荷能力 : 98~294kN(10~30tf)

輪荷重の走行範囲 : 200cm

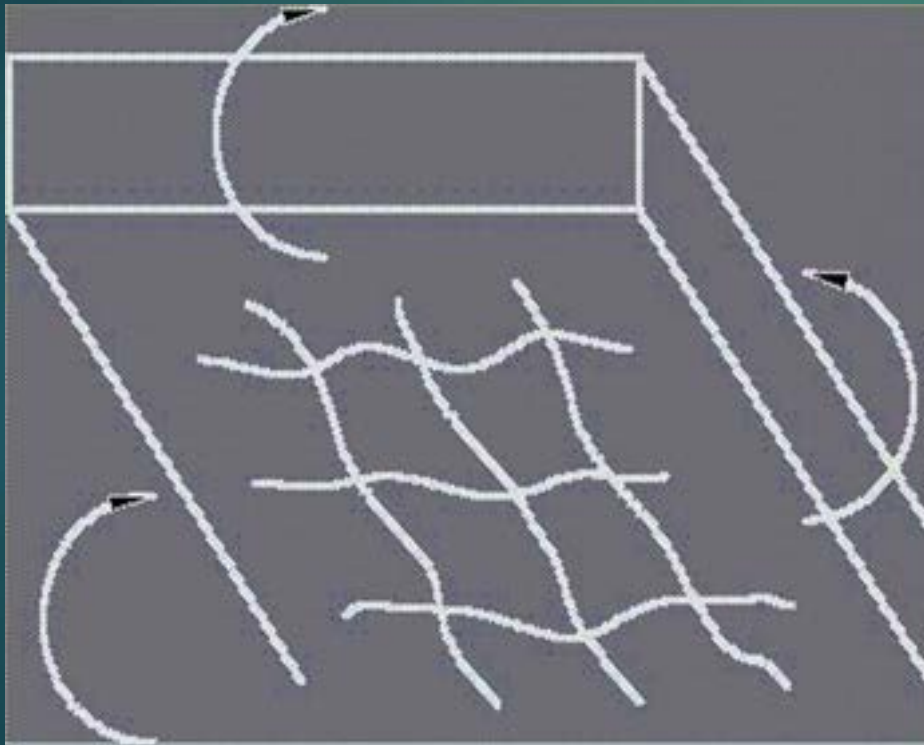
載荷速度 : 28cycle/min

車輪－鉄輪 : $W=500\text{mm}$ $\phi=500\text{mm}$

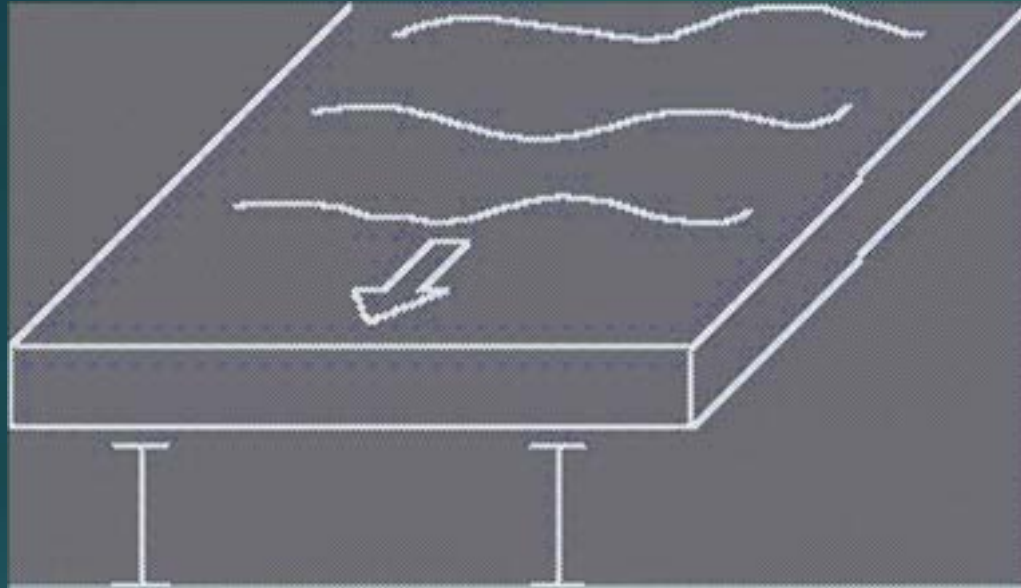


解明された疲労劣化のプロセス

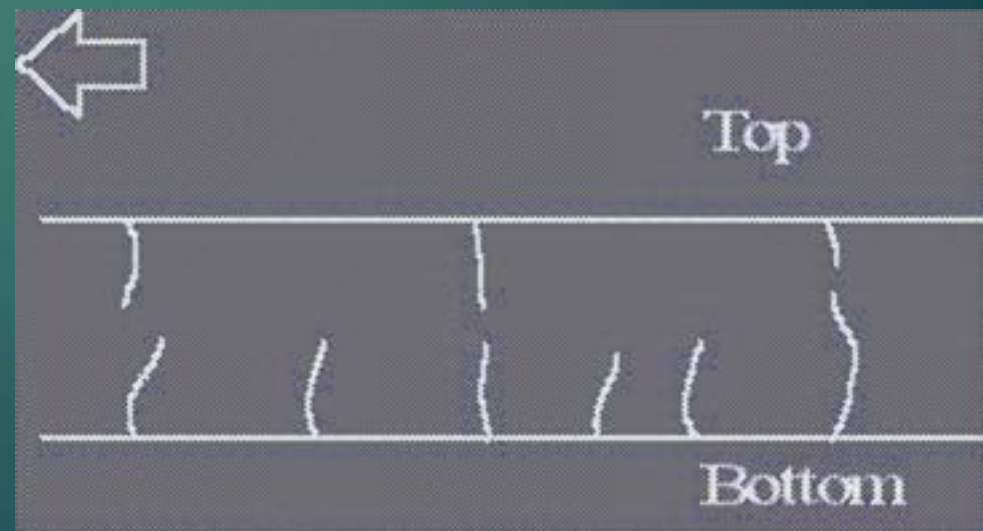
a) 下面での格子状ひびわれ網の形成



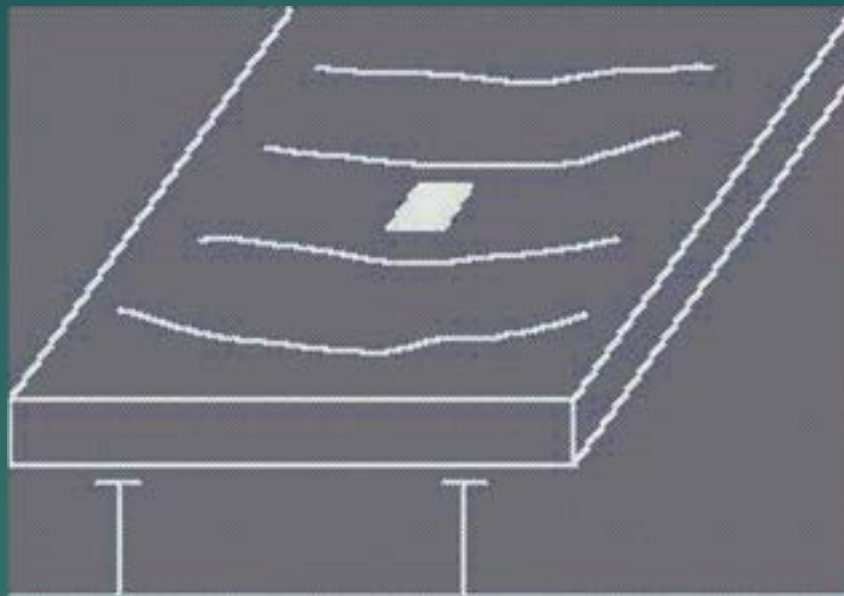
b) 上面でも直角方向ひび割れ



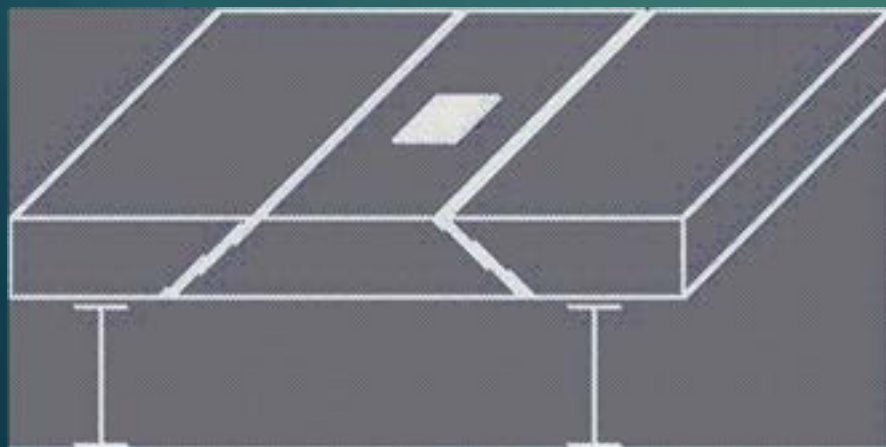
c) 上下のひび割れの貫通



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



切断面(走行直角)



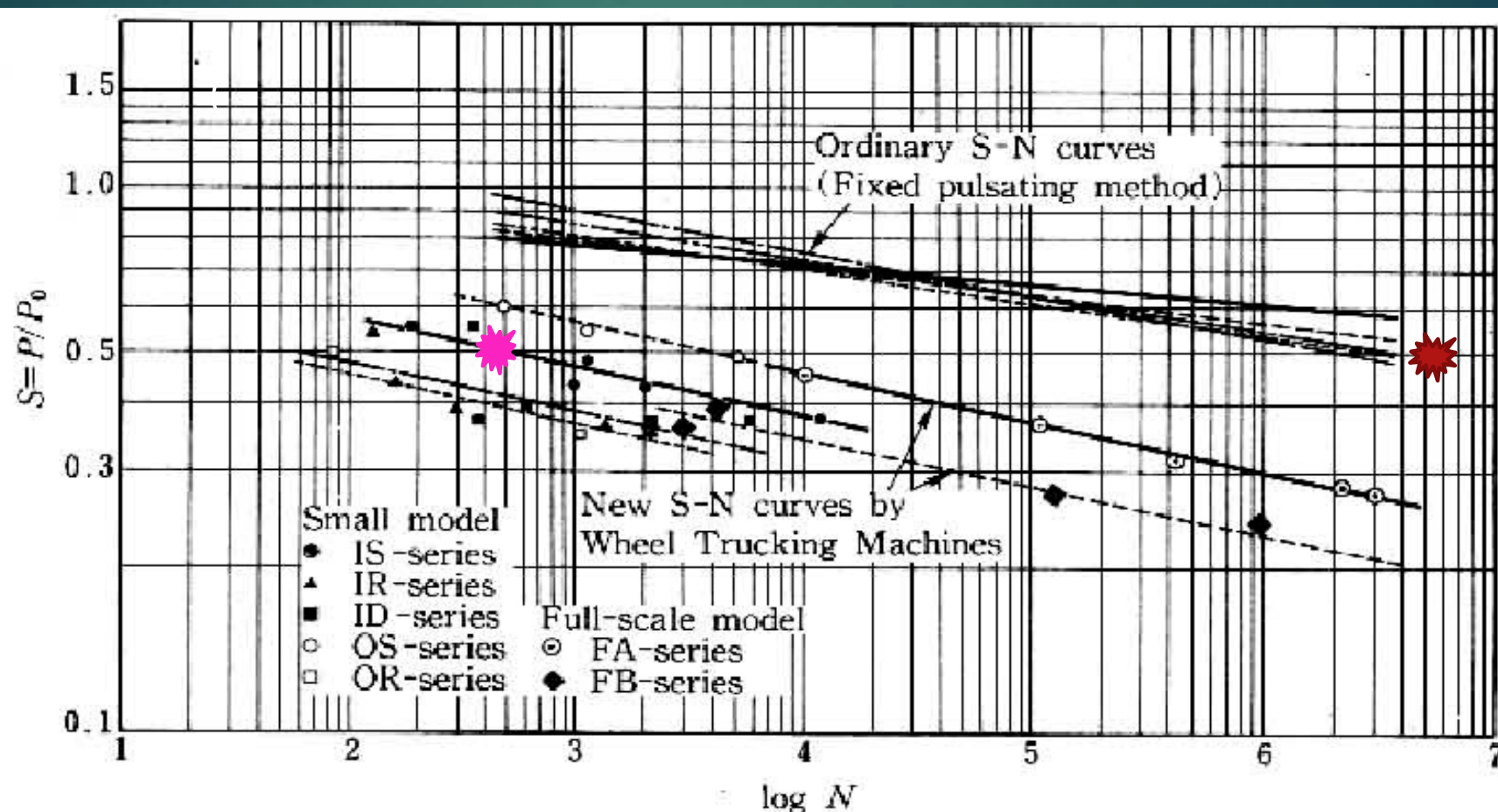
(4) 疲労強度曲線- I (S-N結果)

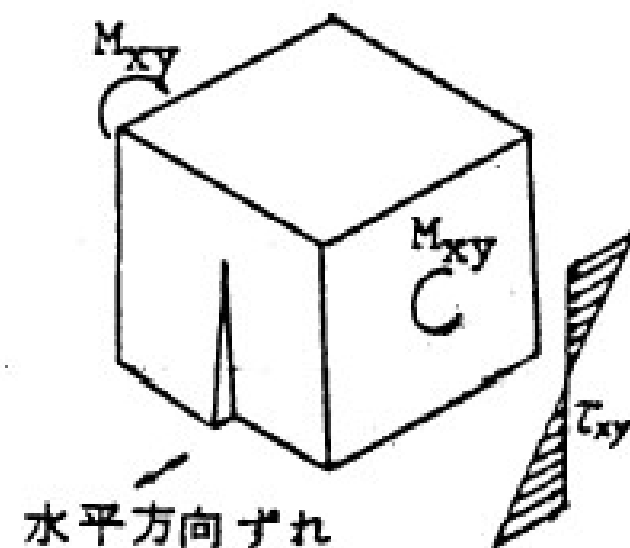
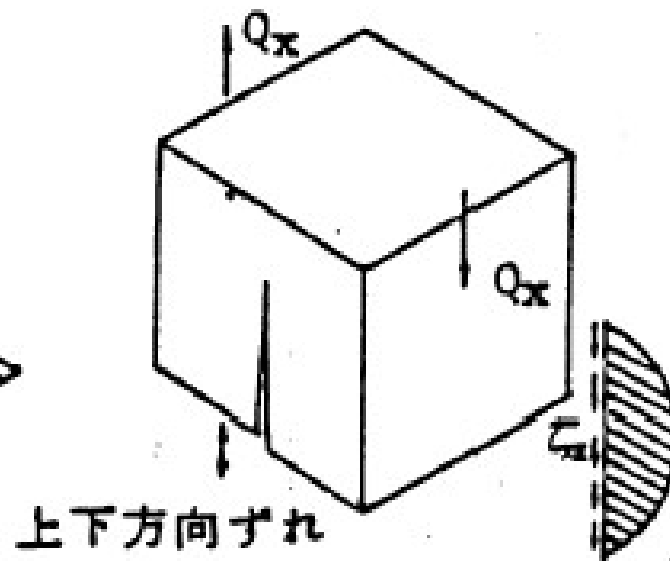
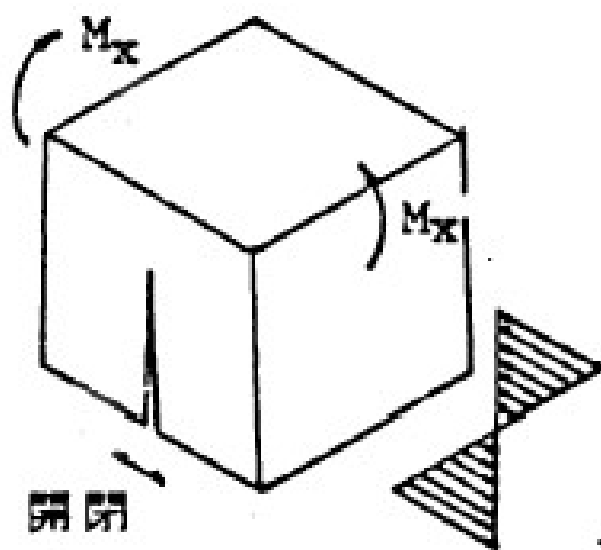
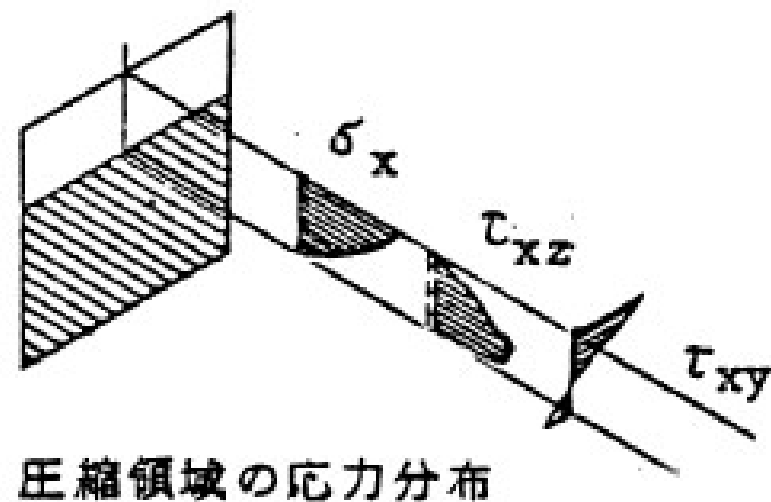
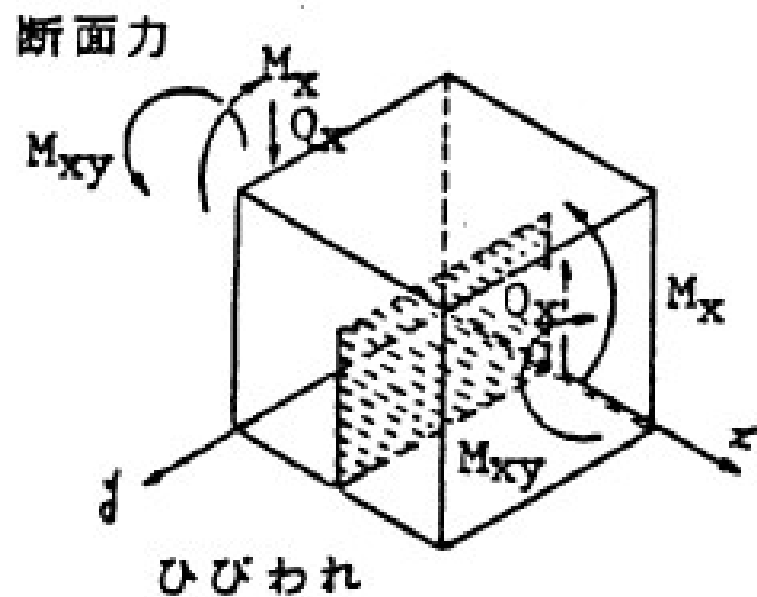
定

点疲労の場合より 1 万倍速く破壊

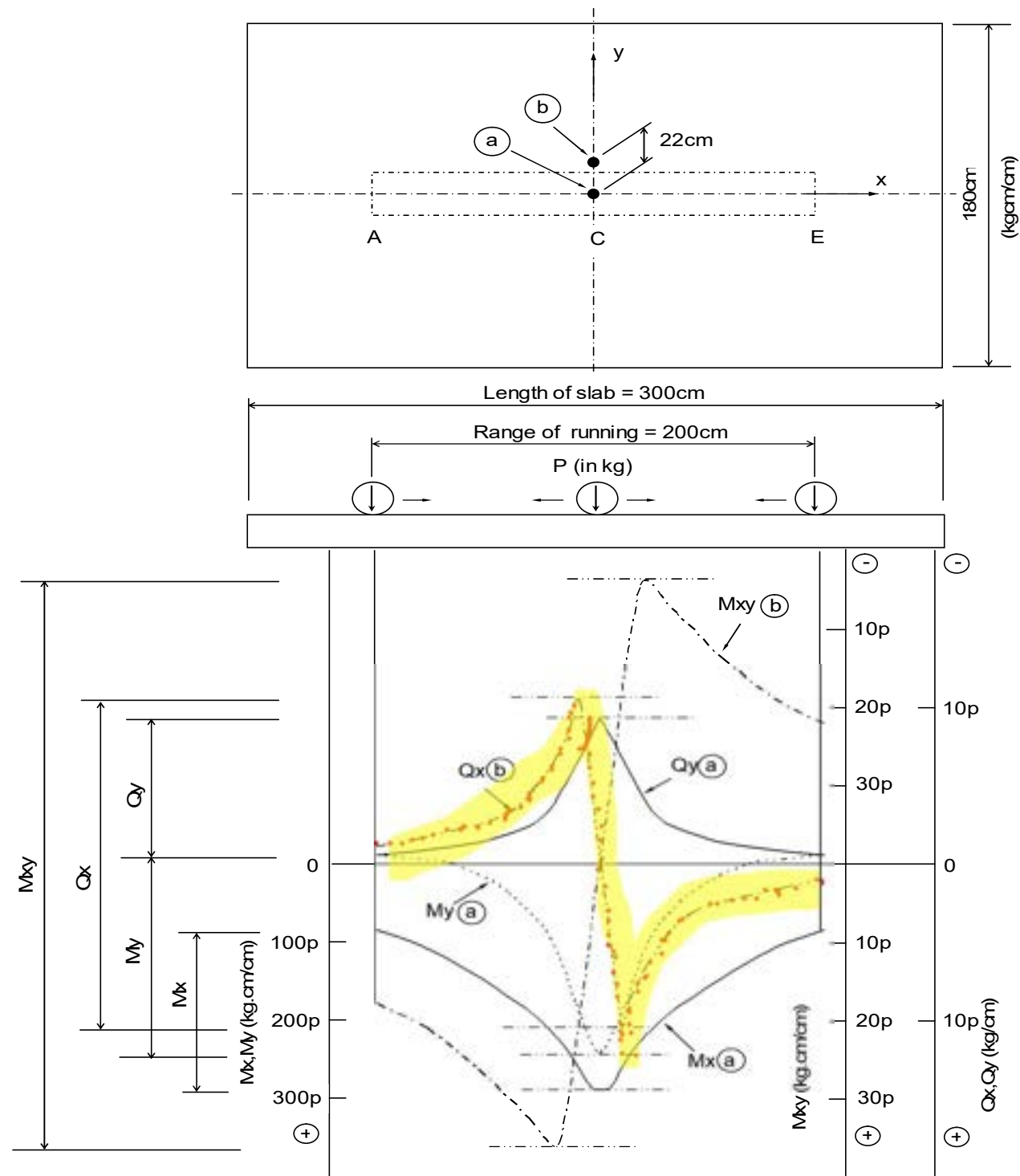
橋軸直角方向に作用するせん断力とねじり

モーメントが交番し、
ひび割れ面の劣化が早くなるため！



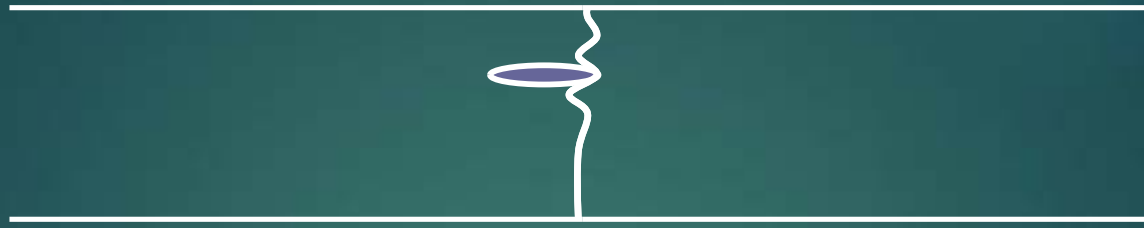


ひび割れの動きと断面力の関係



断面力の影響線

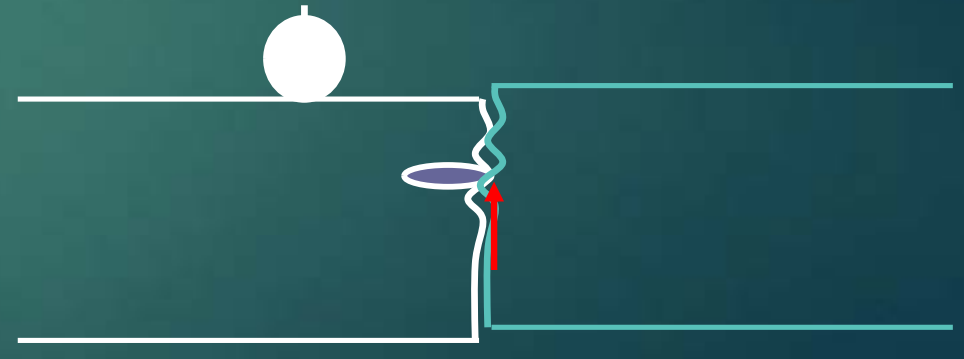
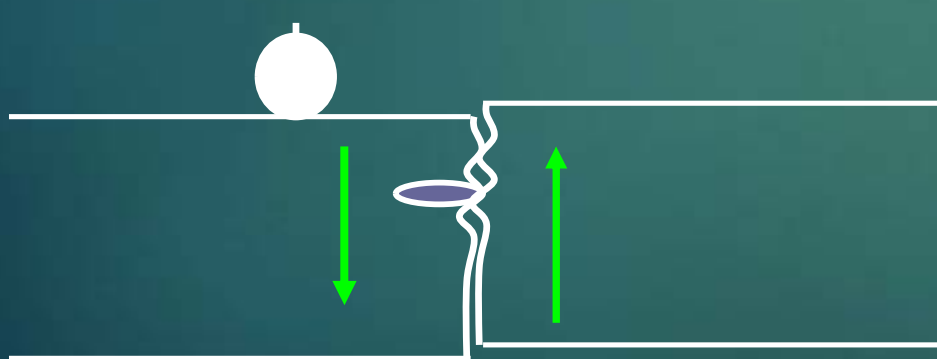
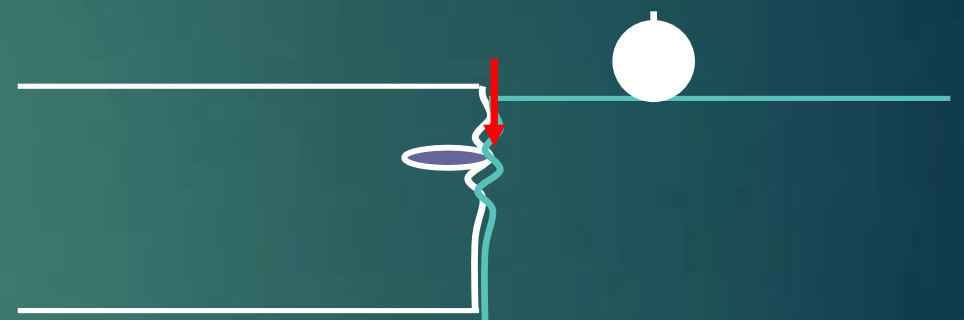
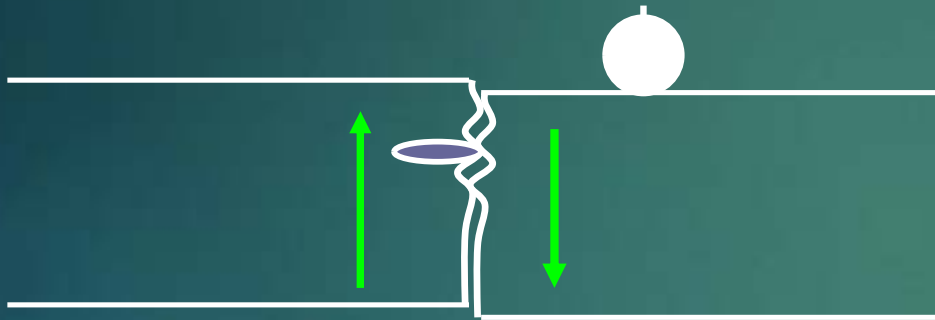
貫通ひび割れの動き



輪荷重の移動によりせん断力が交番する



骨材の動きが交番！



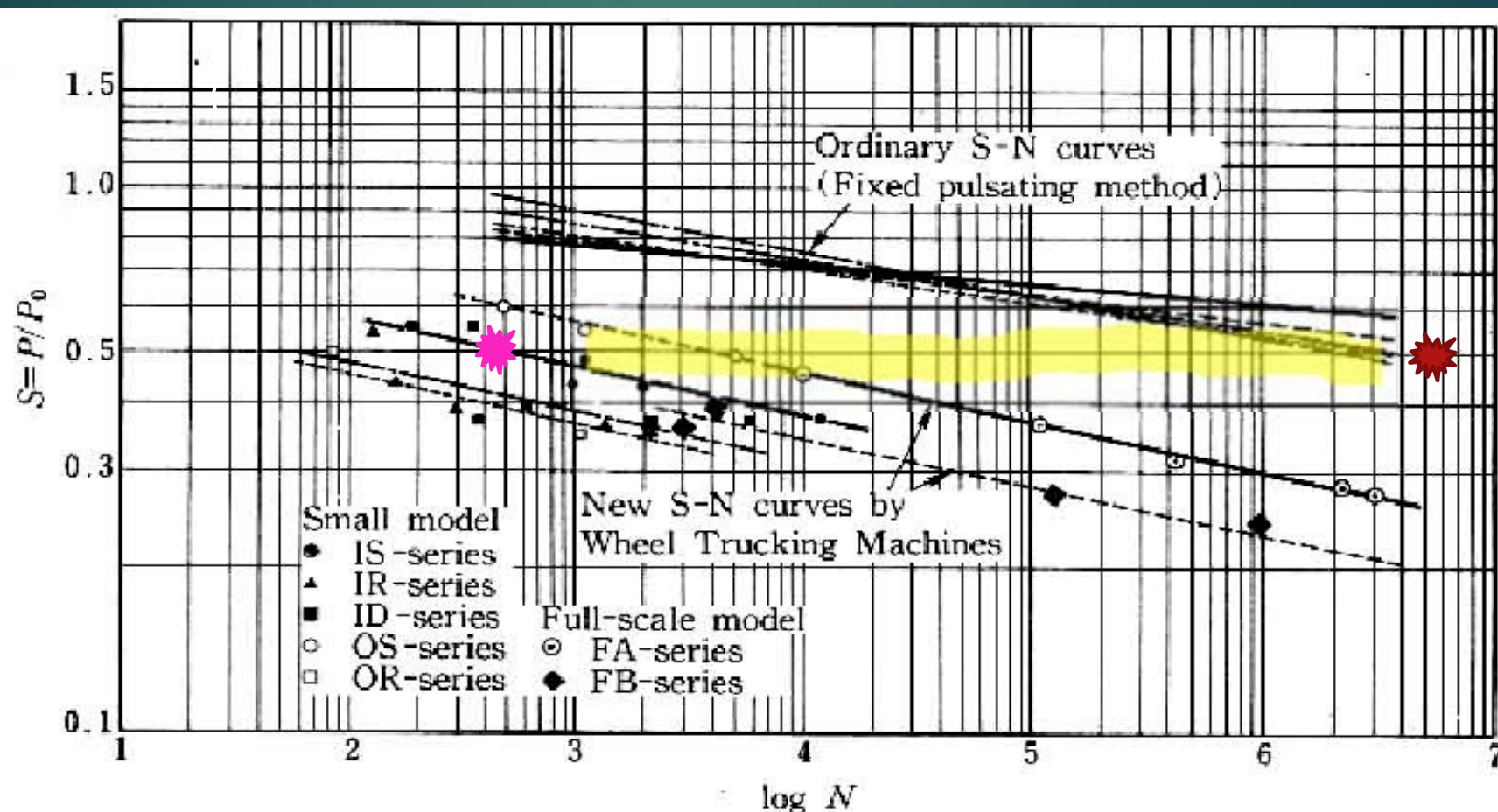
(4) 疲労強度曲線- I (S-N結果)

定

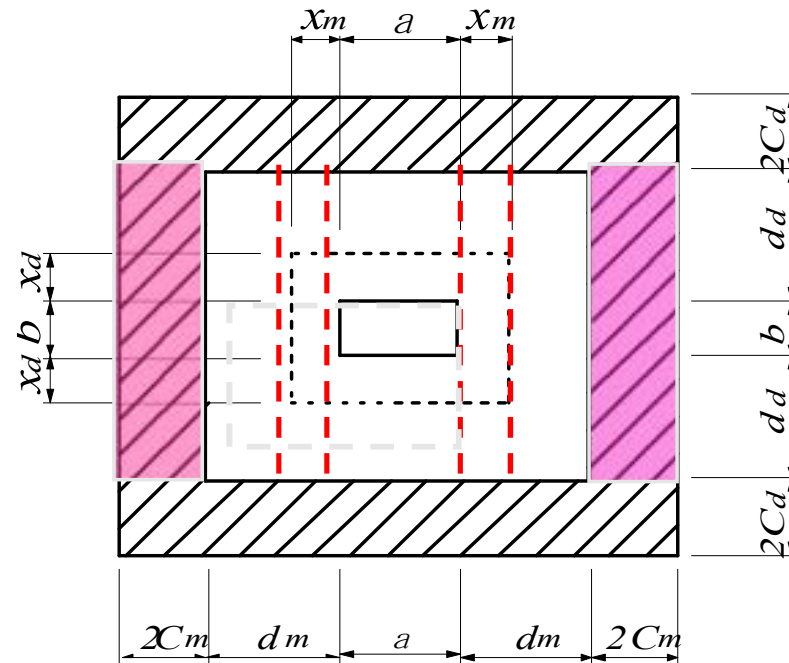
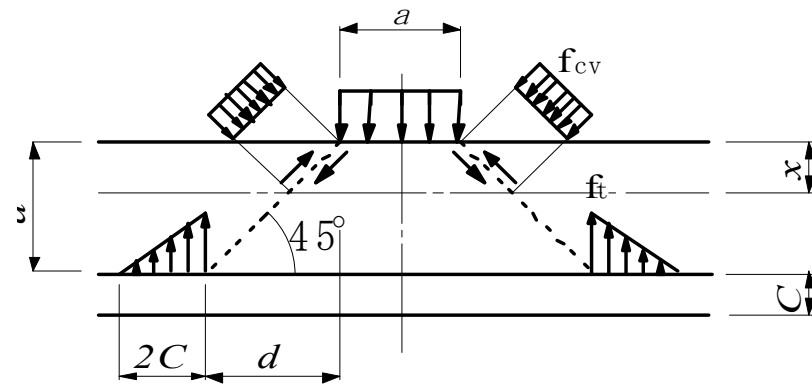
点疲労の場合より 1 万倍速く破壊

橋軸直角方向に作用するせん断力とねじり

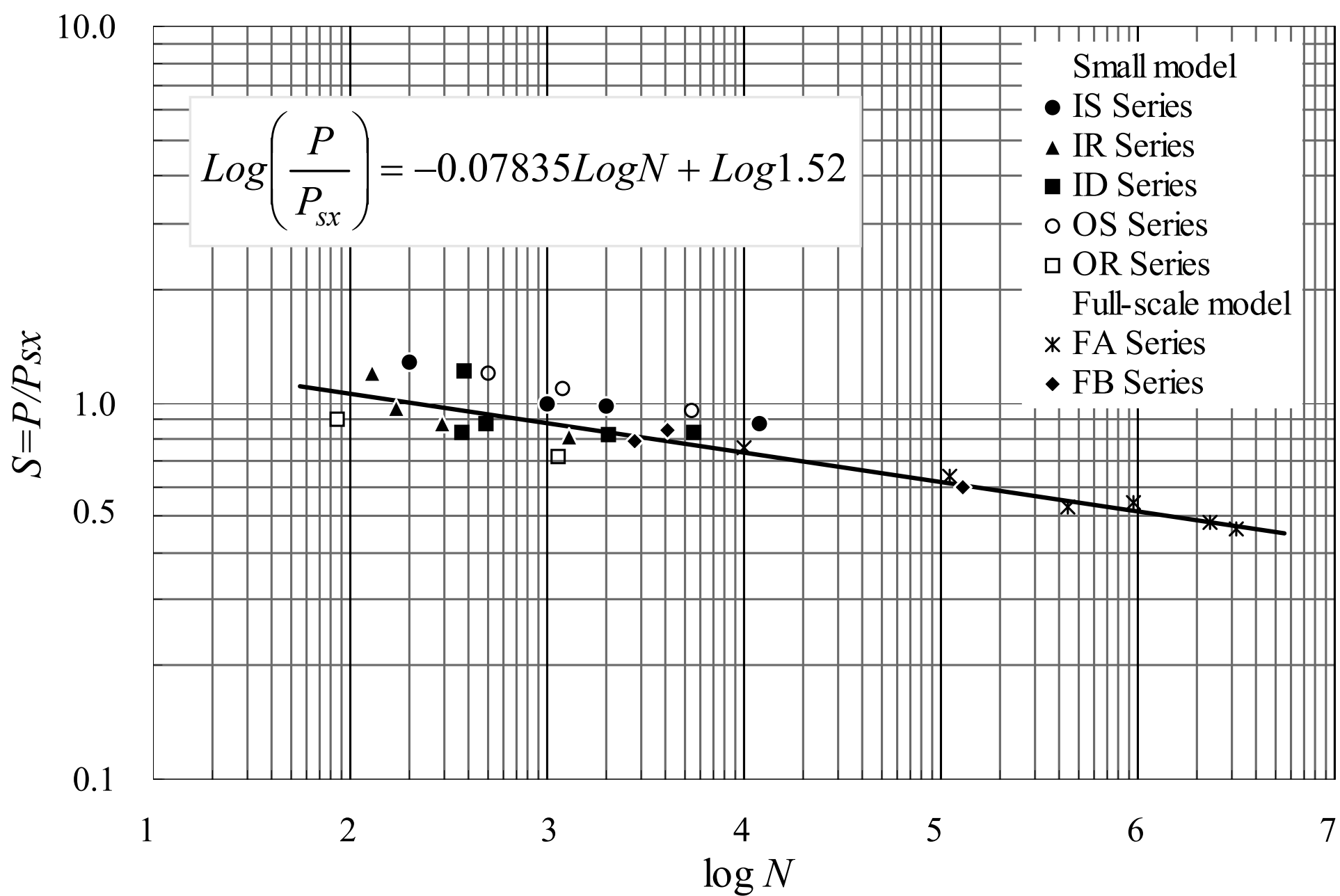
モーメントが交番し、
ひび割れ面の劣化が早くなるため！



(5)押し抜き せん断破壊 モデル



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



統一化したS-N曲線

(6) 最近の 国交省の論文

道路橋コンクリート床版の土砂化対策 に関する調査研究

令和2年
2020

国土交通省 道路局 国道・技術課
国土技術政策総合研究所
東北地方整備局
北陸地方整備局
中部地方整備局
九州地方整備局
北海道開発局
国立研究開発法人 土木研究所

道路橋RC床版のひびわれ損傷と耐久性

1991

阪神高速道路公団
阪神高速道路管理技術センター

RC床版のひび割れ・陥没損傷は走行する輪荷重による疲労損傷！

1983年開発の輪荷重走行試験で！

オリジナル論文

松井繁之：移動荷重を受ける道路橋RC床板の疲労強度と水の影響、コンクリート工学年次論文報告集、pp.627-632、1989

(7) 松井が水の影響を最初に評価した！



床版表面は骨材化！



実験室での再現性？



骨材化を再現！



載荷すぐに漏水、
コンクリート紛含み！

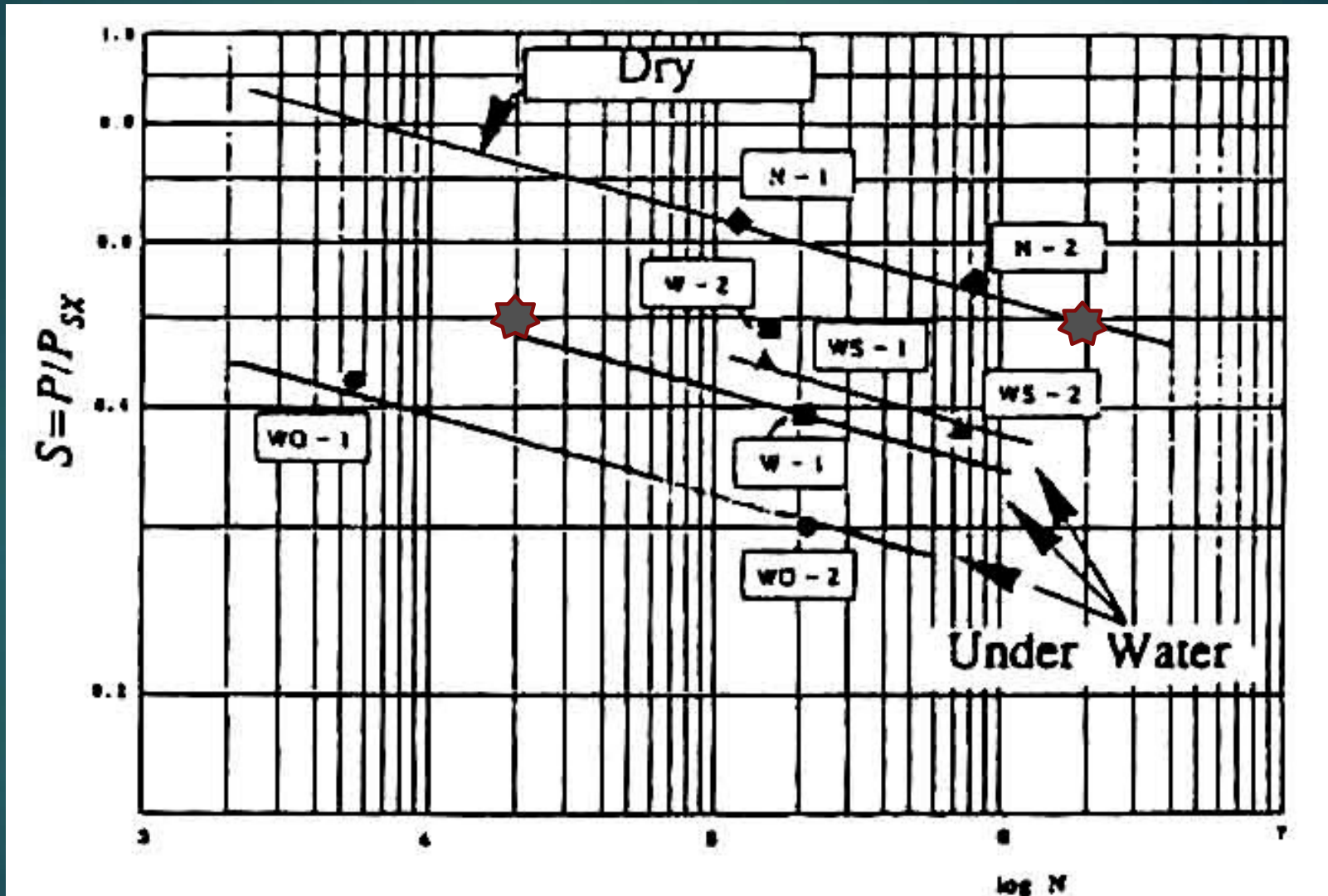


深さは中立軸付近まで



水によって寿命の大幅低下！！

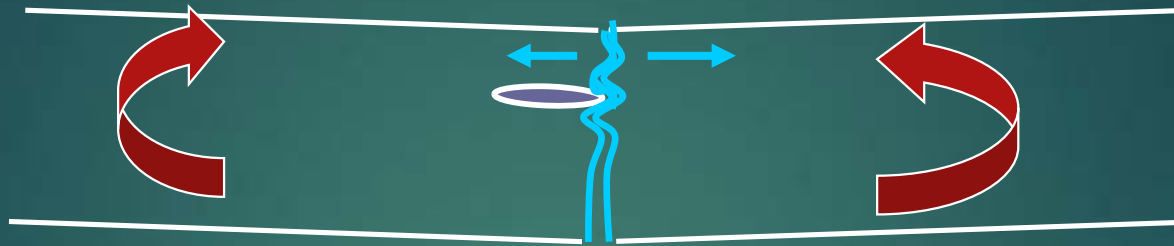
1/80~1/100に！



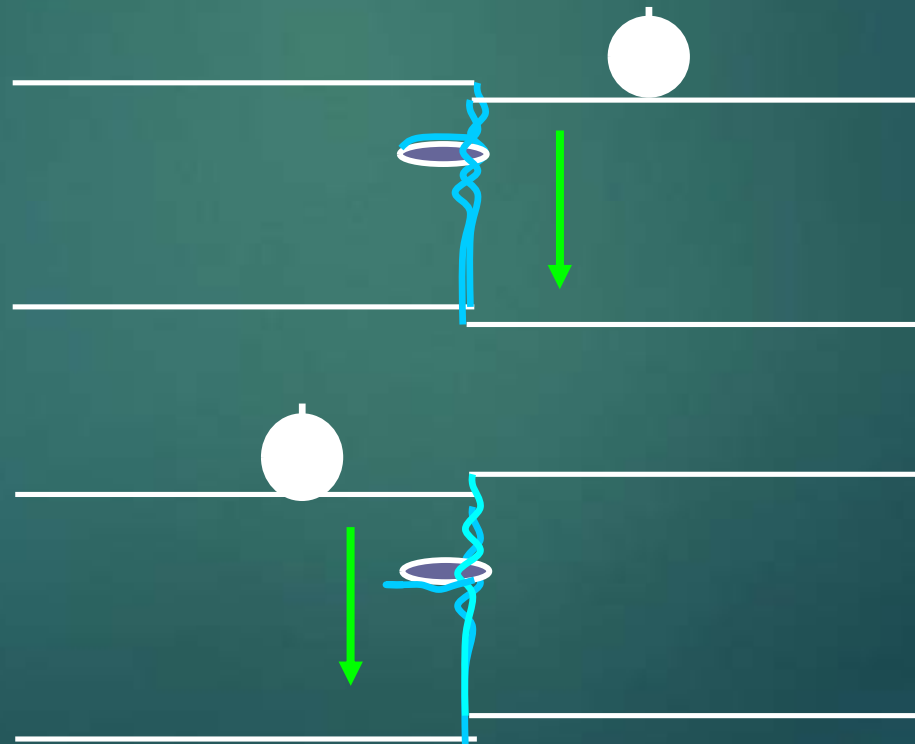
S-N curves of RC slabs under water.

貫通ひび割れへの水の浸入

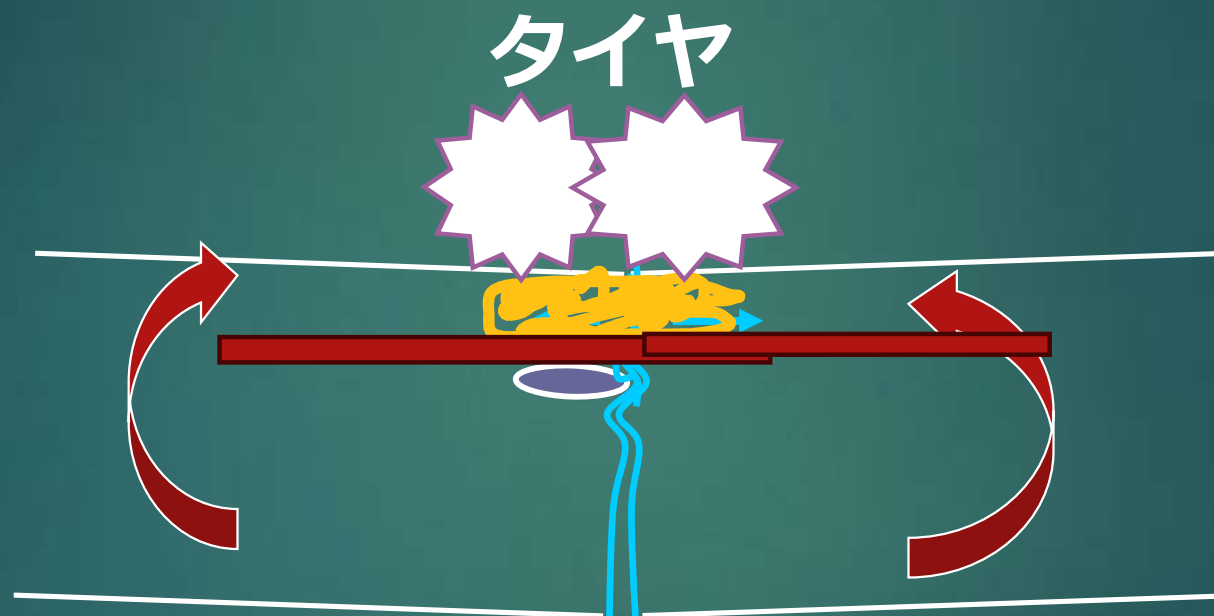
曲げモーメントによる水圧発生



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！



鉄筋腐食を伴って剥離した上側かぶりが
破砕され、水によって土砂化！



その後、疲労以外に塩害や凍害による複合劣化が進展していることがほとんどと判る！

高速道路では砂利化が車輪の通化位置で連続！



疲労が無い環境でも、
浸入・貯留した水が凍結融解を繰り返し、
コンクリートが砂利化！



(8) 橋梁床版の長期耐久化！

高速道路では9000kmのうち、供用30年の経過した橋梁が約4割を超え、経年劣化のリスクが高まっていると懸念！

- ▶ H24年11月「高速道路資産の長期ほぜん及び更新のあり方」の技術検討委委員化設立

- ▶ H24年12月に笹子トンネルの天井板落下事故！

H26年1月 長期保全等検討委員会「提言」

平成27年1月 NEXCO 3社による高速道路の更新計画発表！

社会資本メンテナンス戦略小委員会の提言を受けて、
NEXCOでは床版取替を実施する計画発表

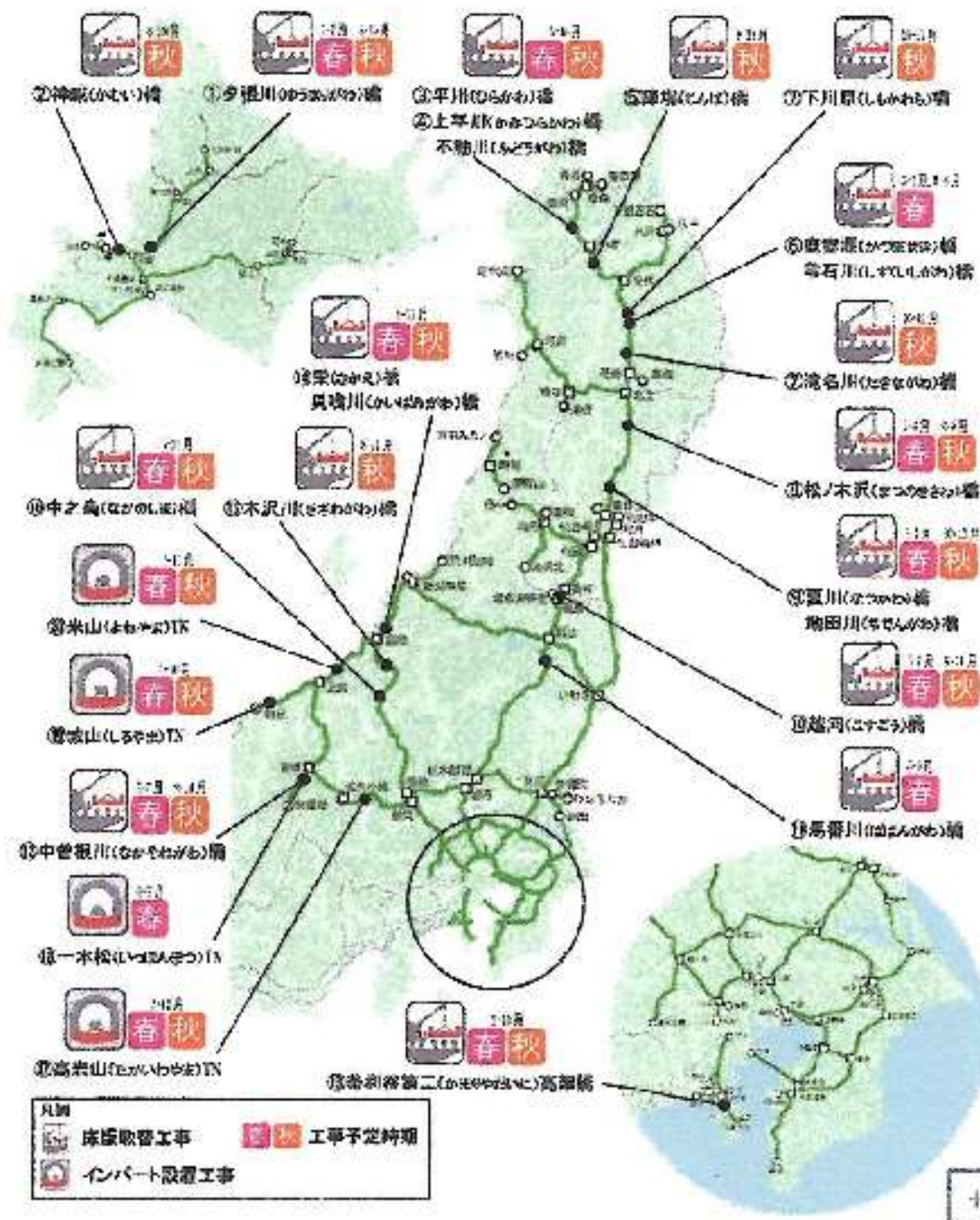
NEXCO3社における 大規模更新・大規模修繕の事業

分類		東	中	西	計	事業費（億）
更新	床版（km）	52	74	98	224	16429
	桁（km）	1		12	13	1039
修繕	床版（km）	148	100	111	359	1601
	桁（km）	56	59	37	151	2628

NEXCO
東日本

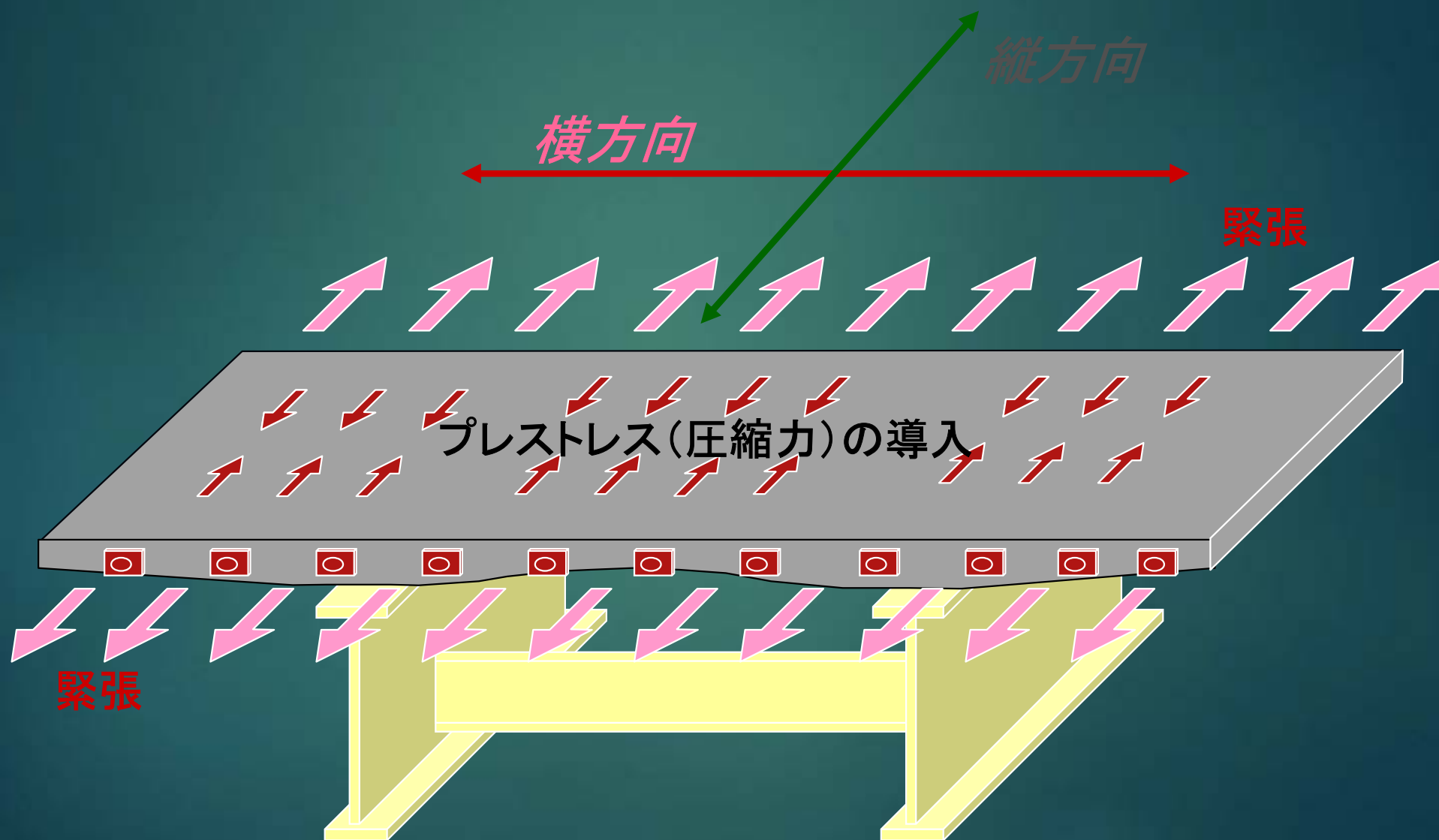
2022年度 床版取替

28橋



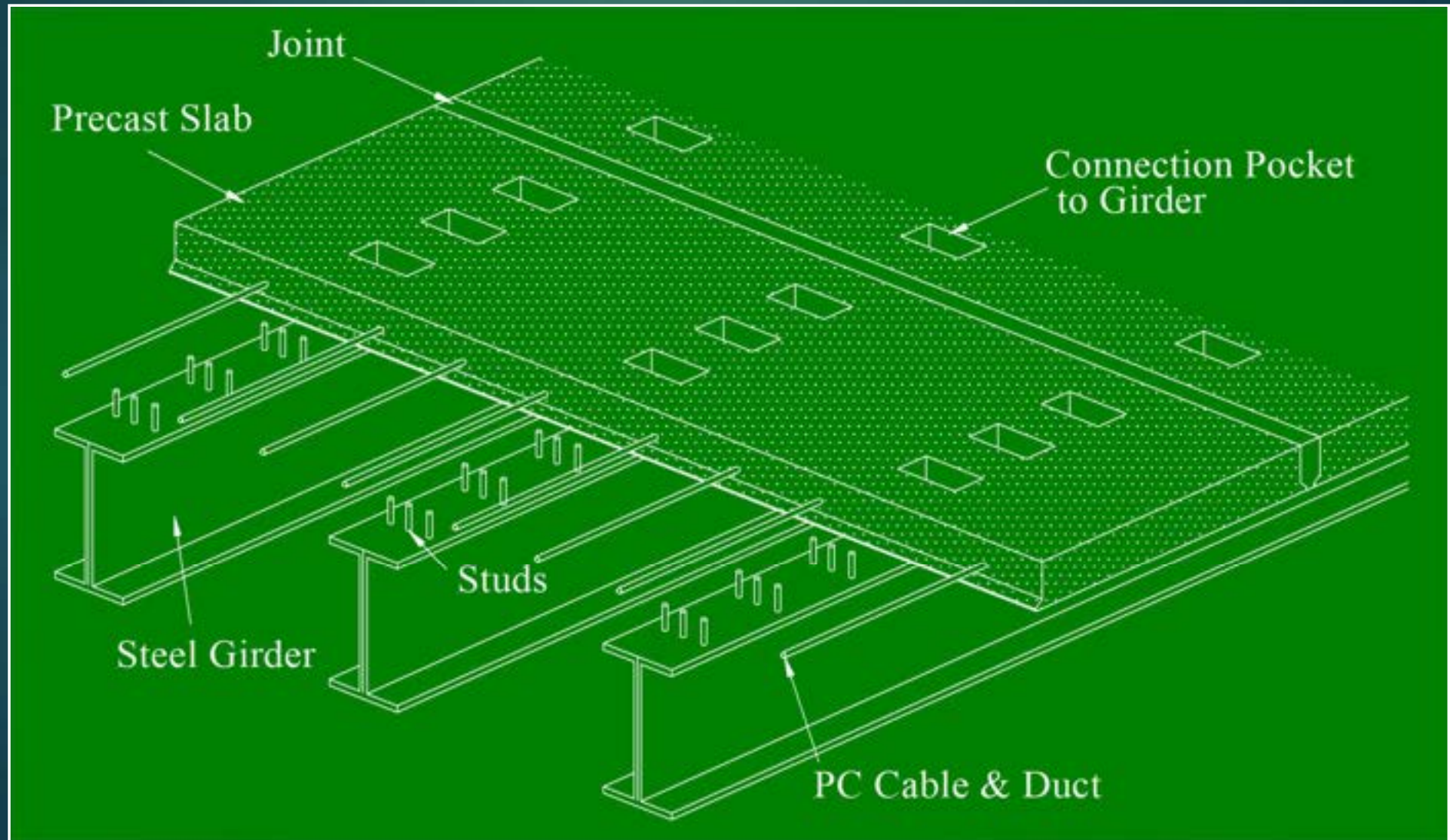
新設では橋軸方向のプレストレスの活用！

V



Pre-stressing !

- PRE-STRESSING IN LONGITUDINAL DIRECTION BY INNER CABLES



プレキャスト版の設置状況 (幅2.5m、幅 8 ~ 14m)



Evaluation for Durability of Pre-stressed Slab



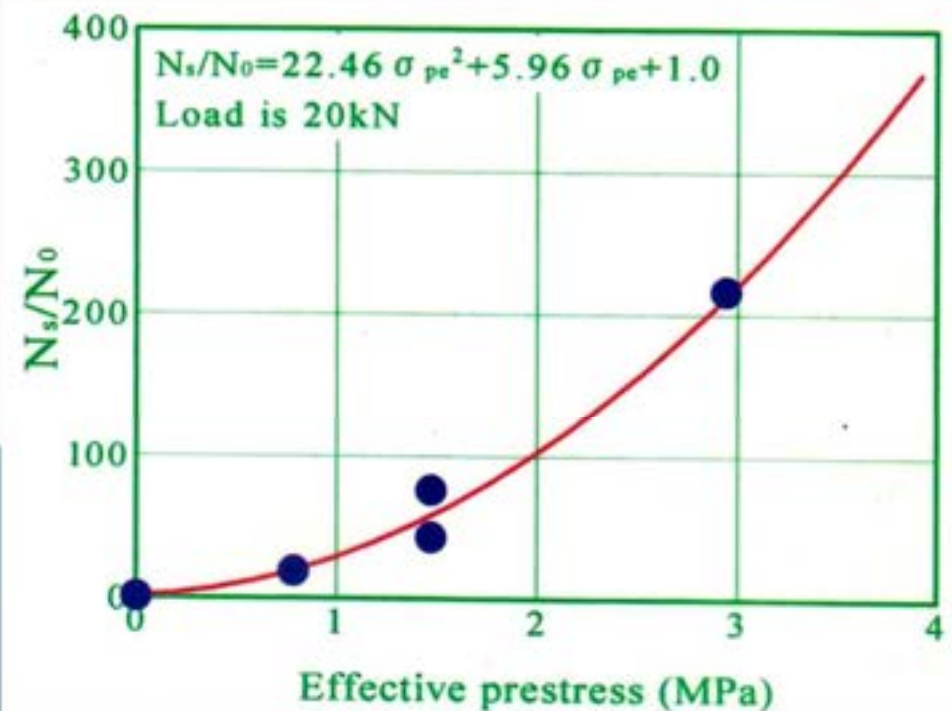
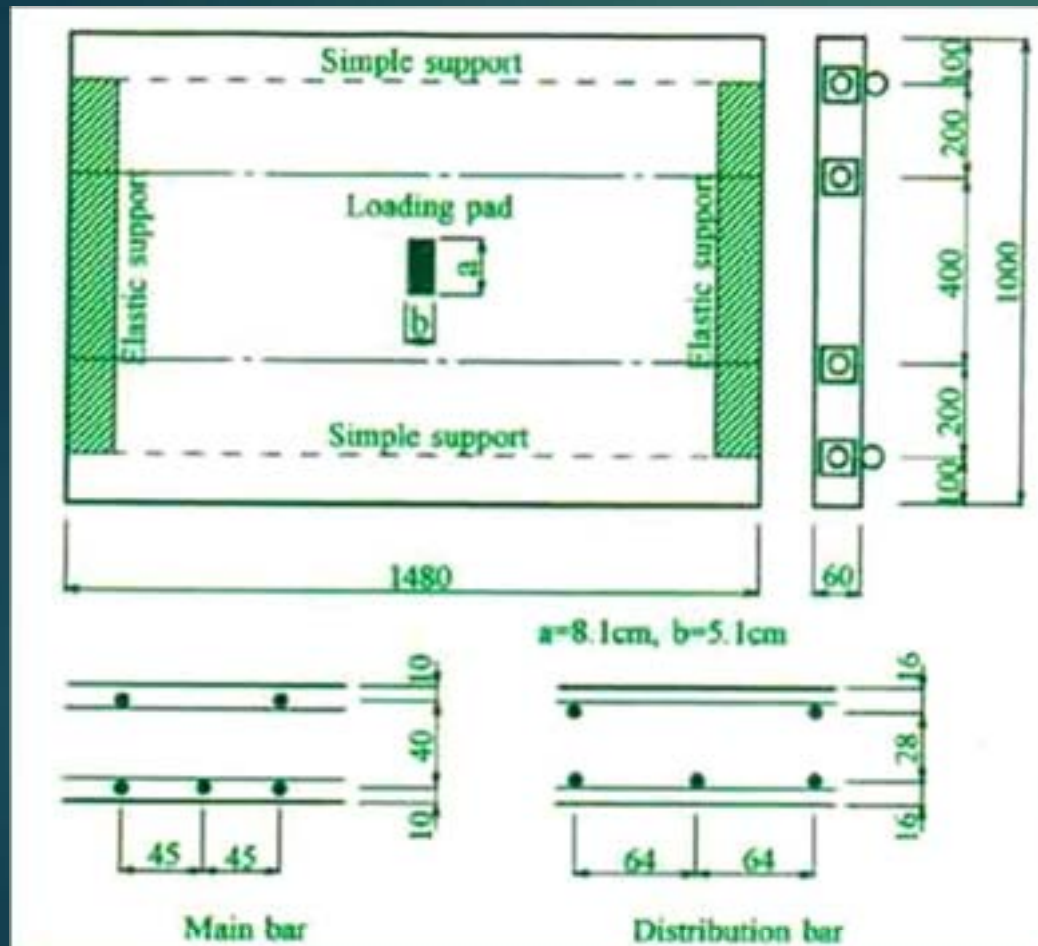
真鍋氏のチャンネル版

橋軸方向プレストレス

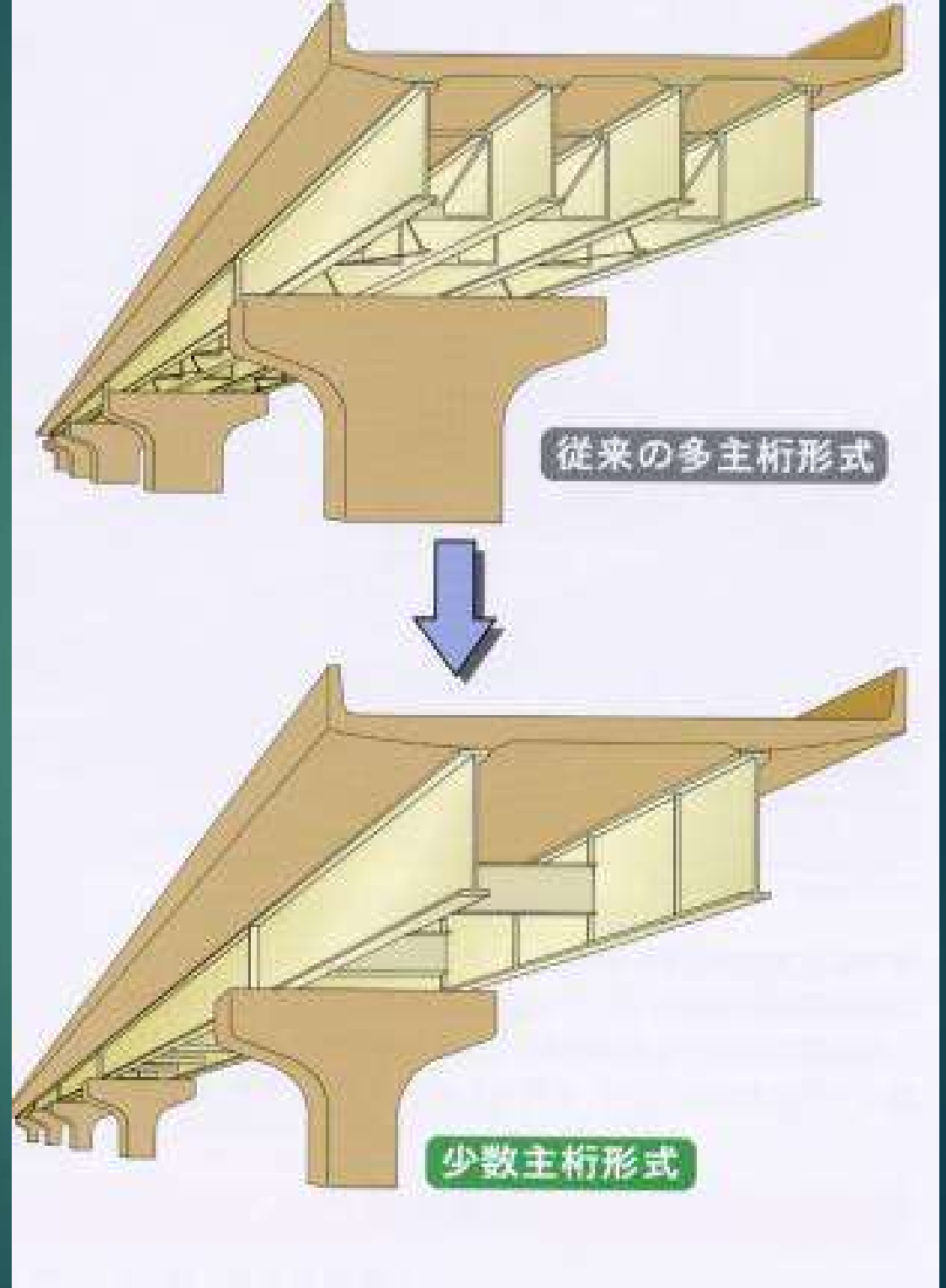
200kN・100万回
載荷しても
たわみの増加なし



プレストレスの効果？ 縮小版で評価！



少数主桁橋



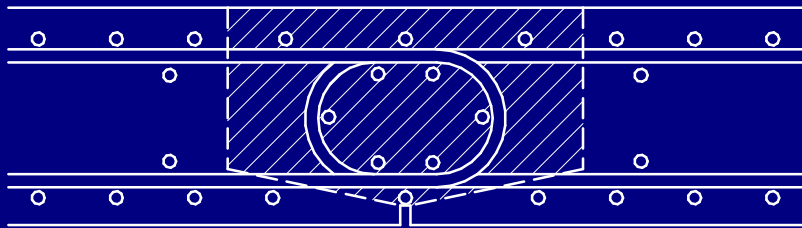
横締めPC床版（東海大府高架橋）



NEXCOが開発 で連結

横締めPCaPC版をループ鉄筋継手

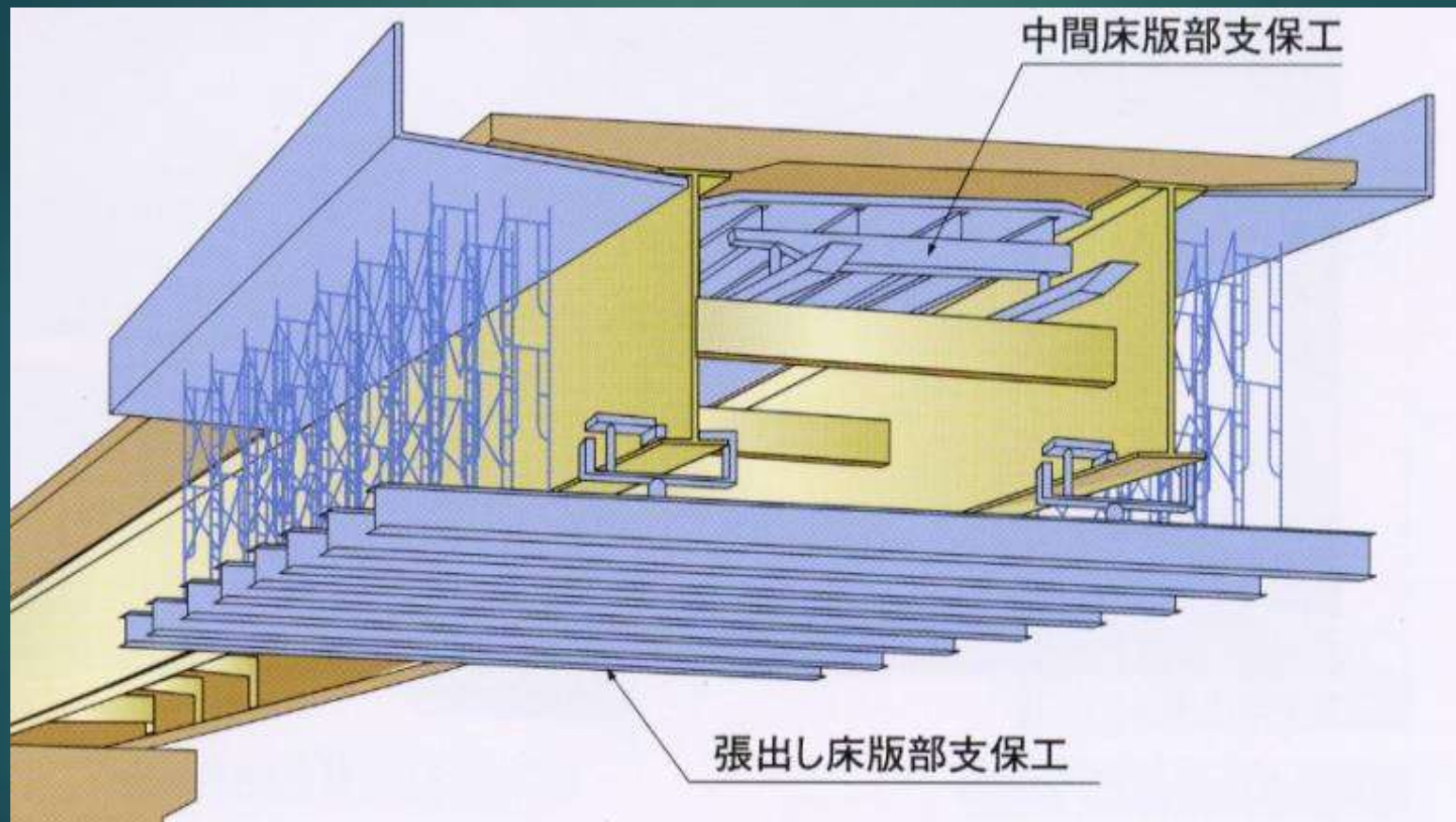
ループ内にも主鉄筋を入れる



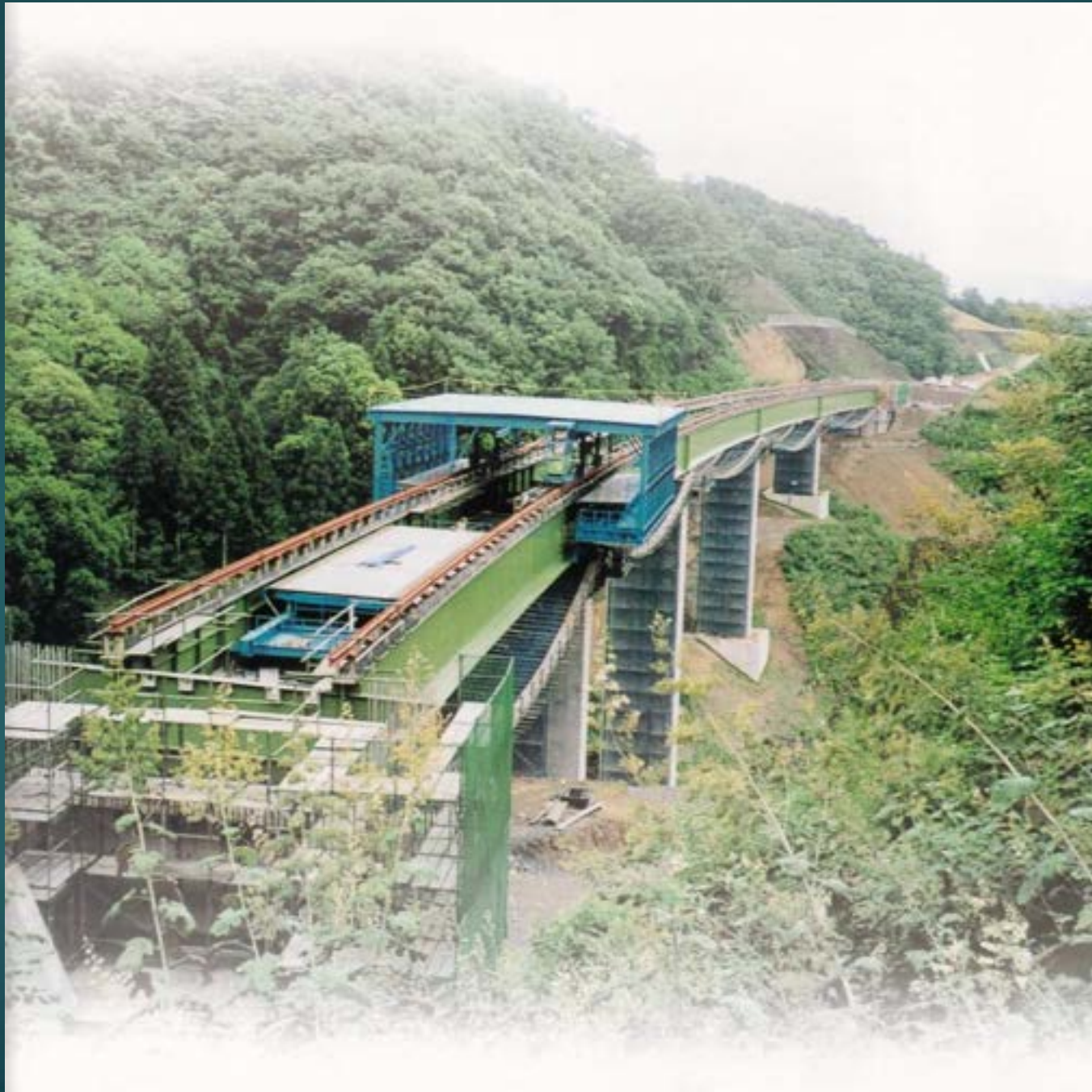
現場打ちPC床版（横締め）



移動作業台車（ワーゲン）

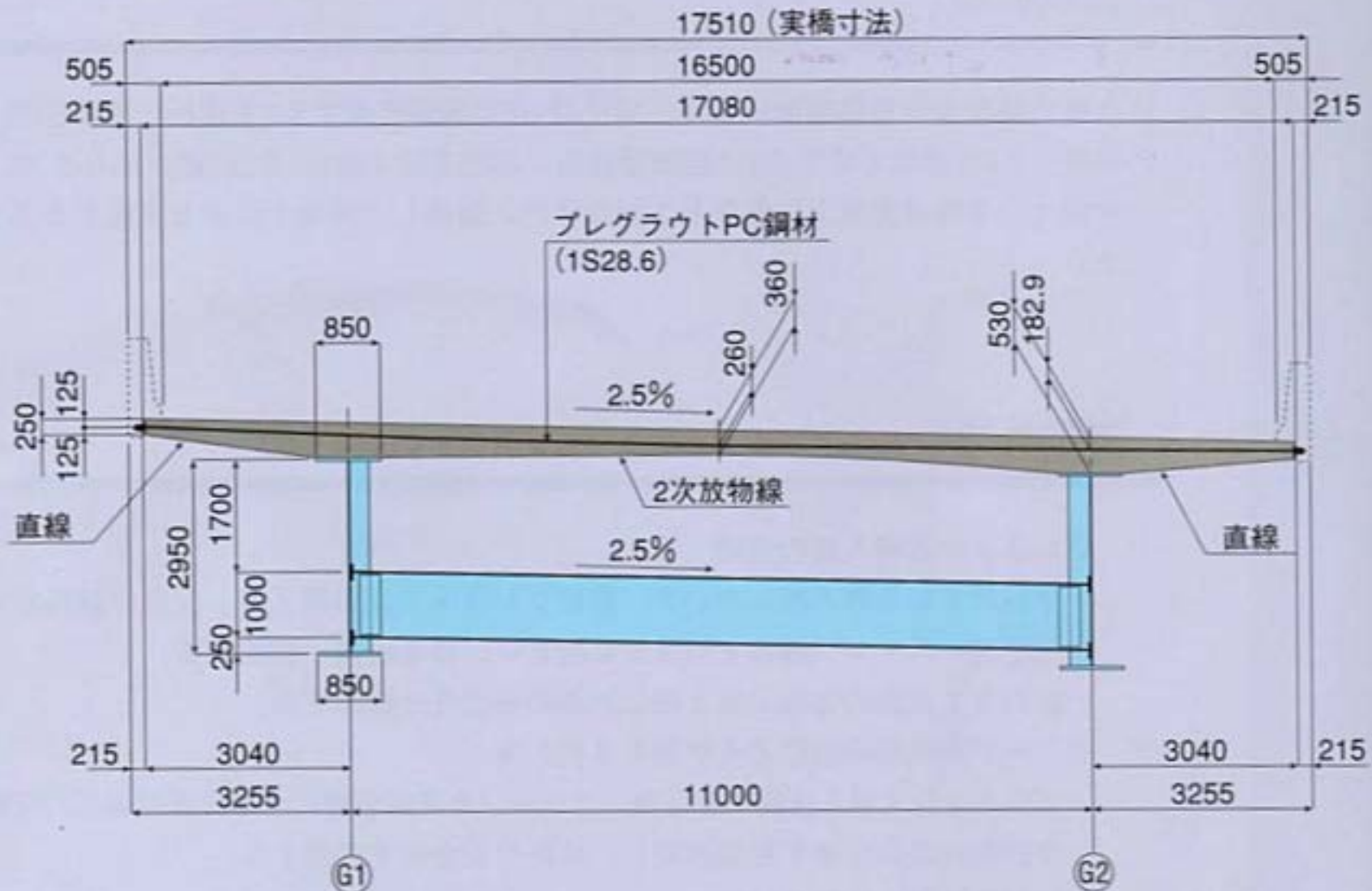


Movable Form (Wagen)



藁科川橋の断面

試験体の断面図／鈑桁





プレキャスト床版による
取替をNEXCOが実施！

取替床版は薄い！
ループ鉄筋継手の加工が困難
中に主鉄筋配置が問題！

種々の継手形式
競争開発！！



①

ナット定着に変更！
継手部の主鉄筋を工場で抱かせておく

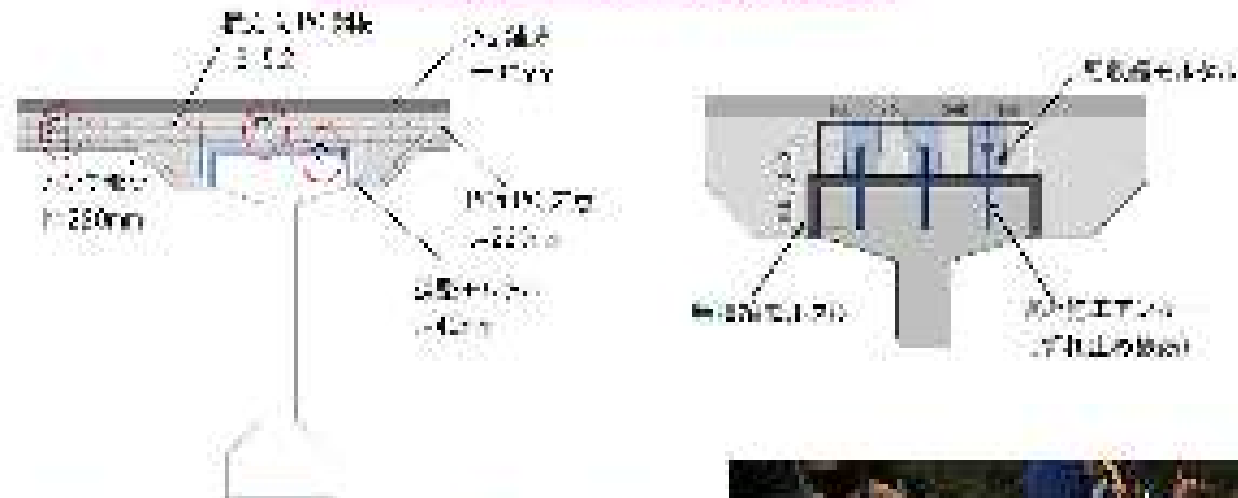


ナット定着の標準



② PC桁上の床版取替も

キャップスラブ概要図



実際に施工されたキャップスラブの内面には鉄筋が

③ 機械式継手 I（コッター継手）

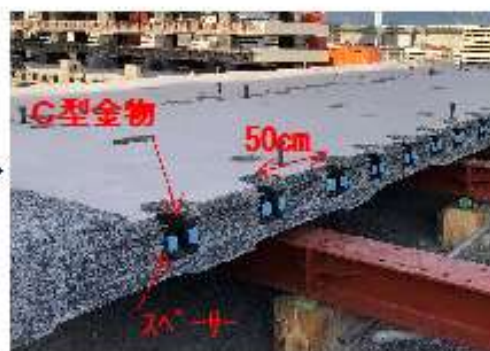


C型金具 + H型金具 で結合





STEP1 コッター床版製作



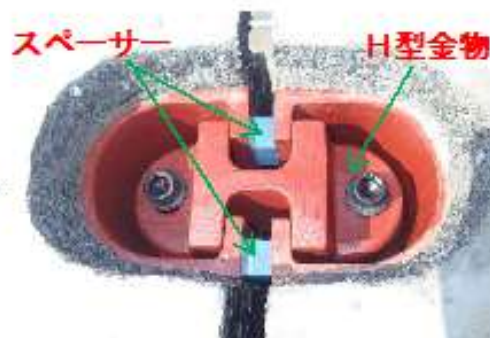
STEP2 現地でスペーサー取付



STEP3 引寄せ治具による床版架設



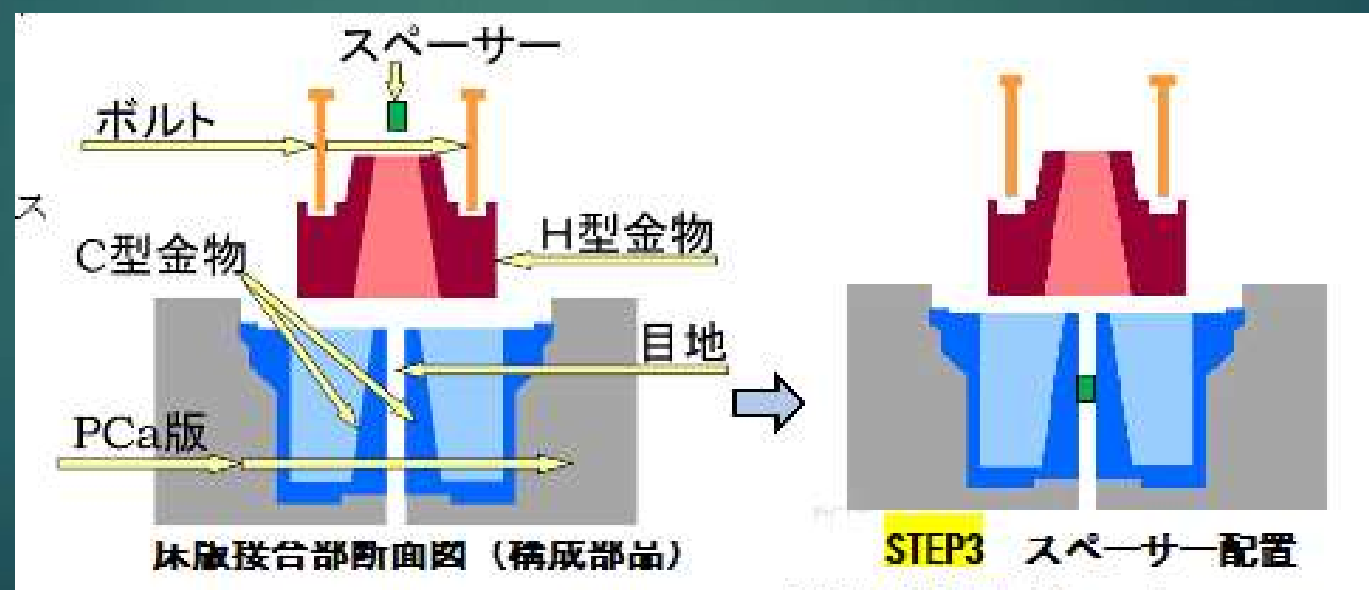
STEP4 H型金物挿入

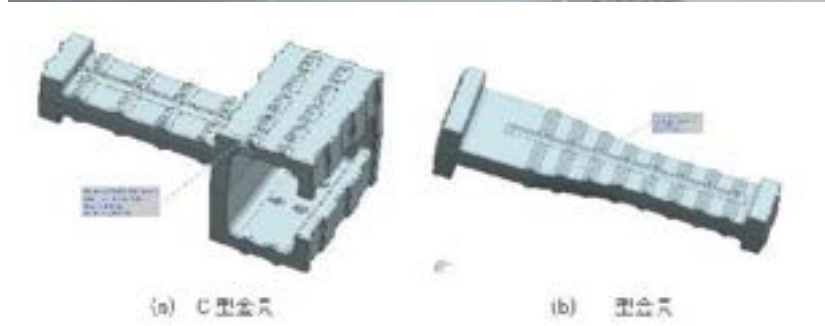


STEP5 ボルト挿入



STEP6 ボルト締付 (トルク導入)

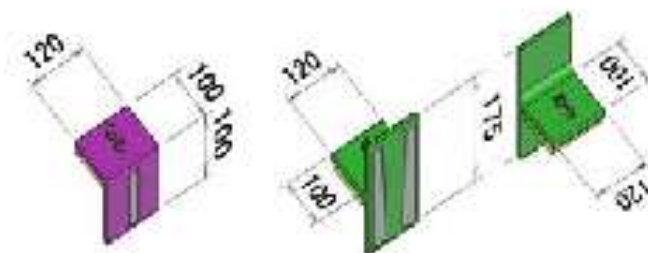
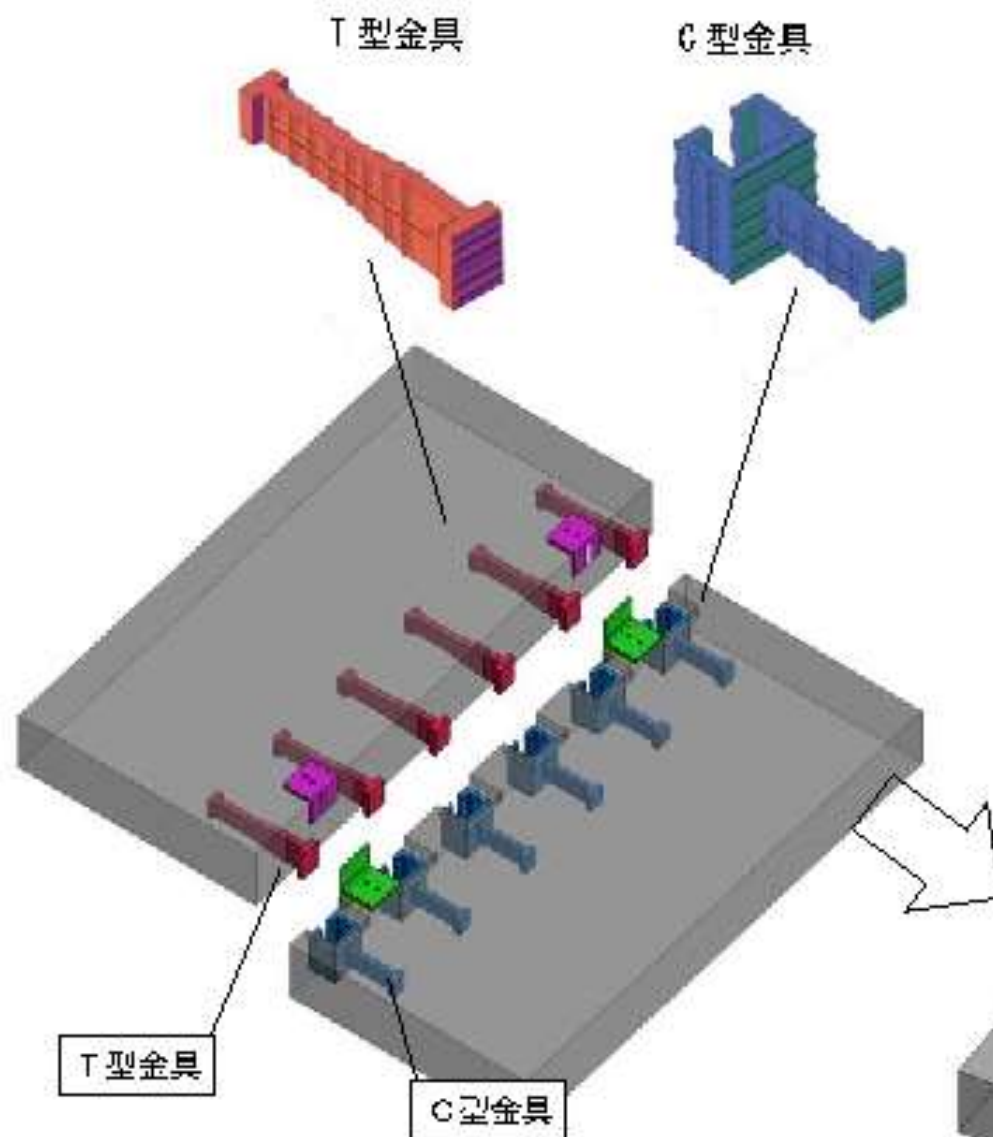




④ 機械式継手II C型金具+T型金具

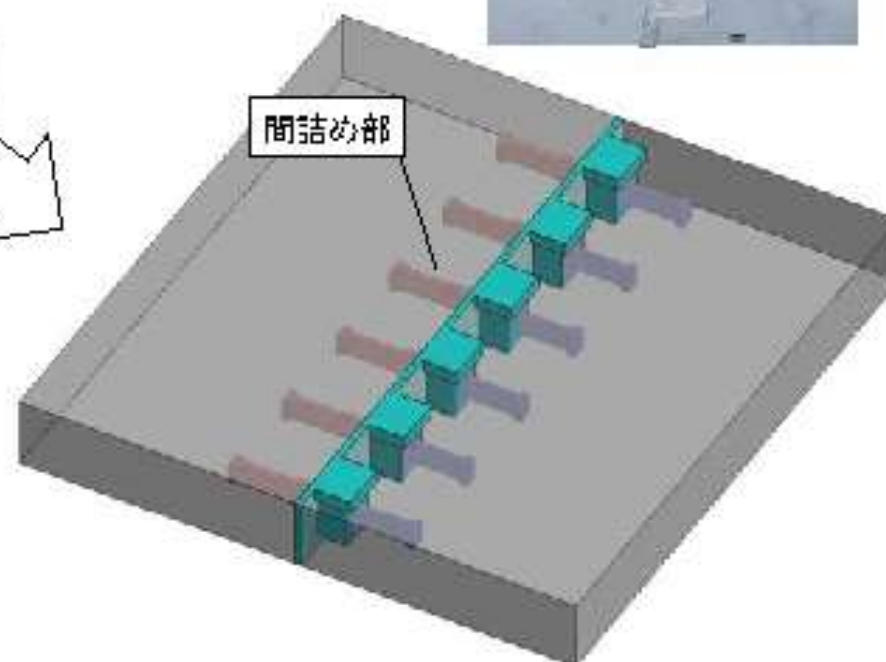


パネル設置方法



据付ガイド

(左) 後行床版側取り付け用 (右) 先行床版側取り付け用



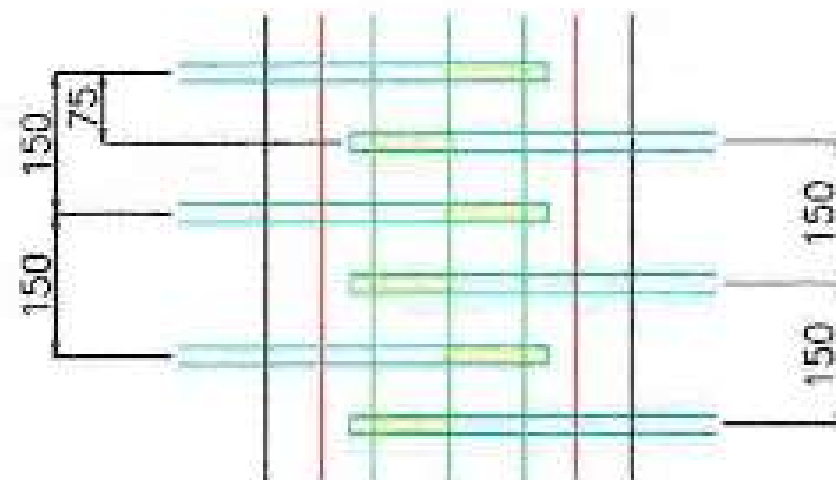
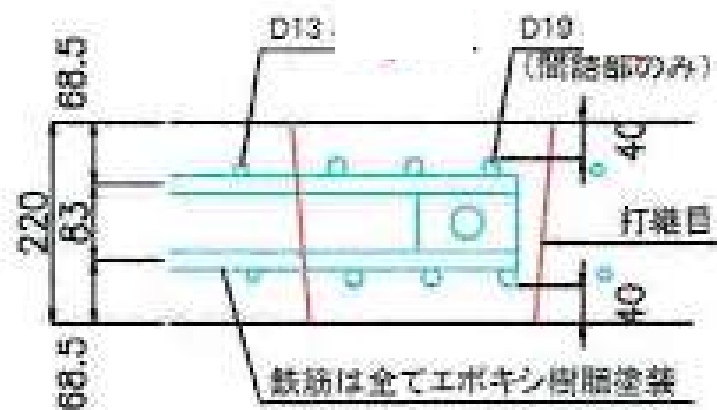
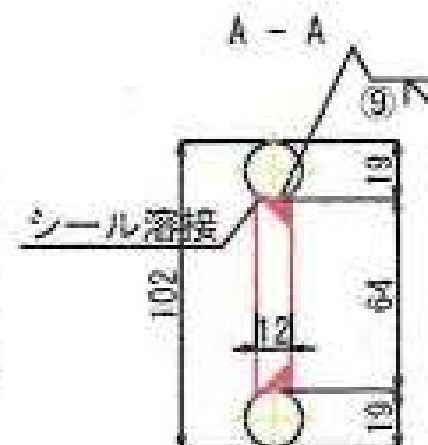
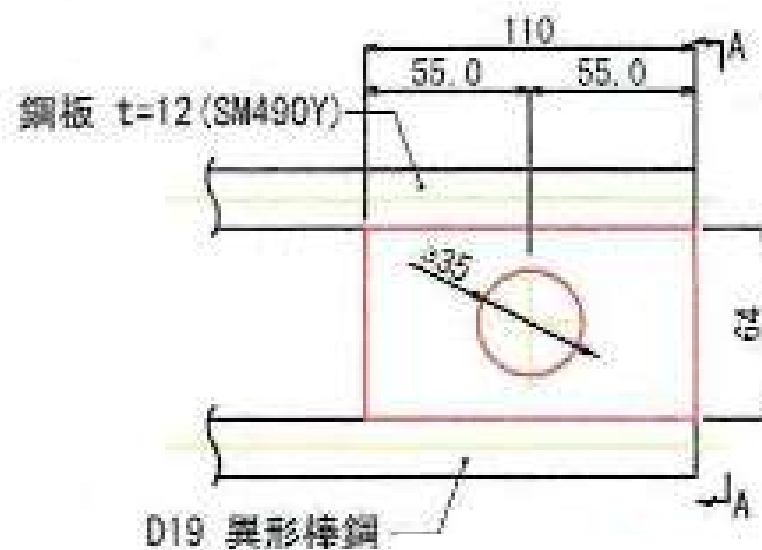


夕張川橋の床版取替



⑤ 孔明き鋼板継手

図-1 孔明き鋼板継手の概要



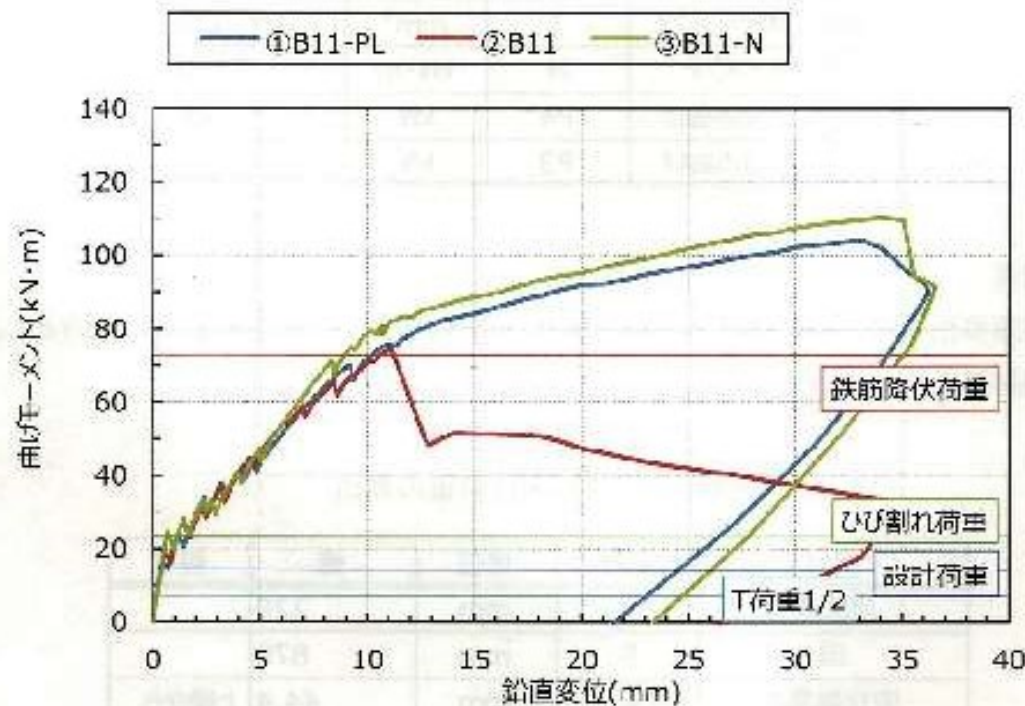


図 4.9 曲げモーメントー変位関係 (4 点曲げ載荷)

はり試験結果

4 点曲げ



穴明鋼板が付くと継手無しのRCはり
と同等以上の耐荷力が得られ
る！

3 点曲げ

鋼板が無いと降伏前後で抜
けが生じ、耐荷力が低下す
る！

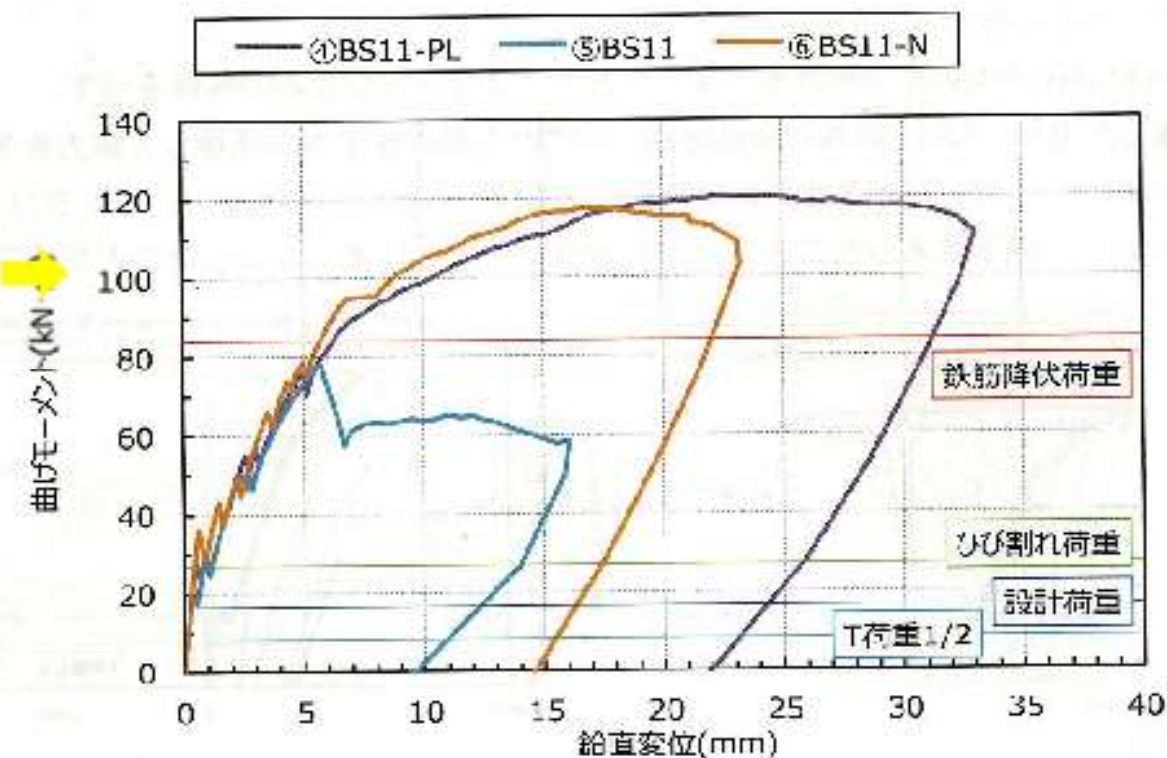


図 4.10 曲げモーメントー変位関係 (3 点, 曲げ載荷)

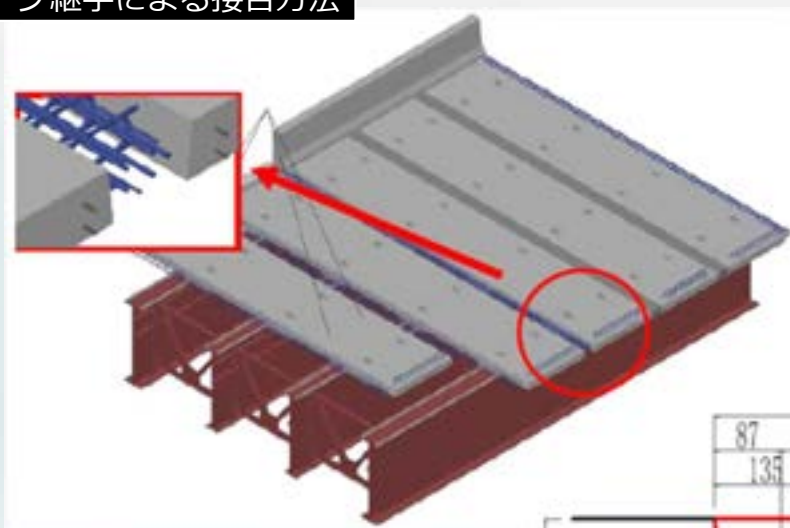
⑥ 樹脂による充填継手

○継手内への鉄筋組立、間詰コンクリートの打ち込み・養生等が必要

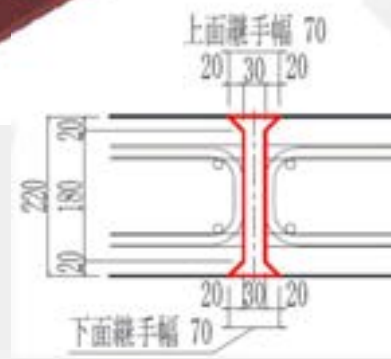
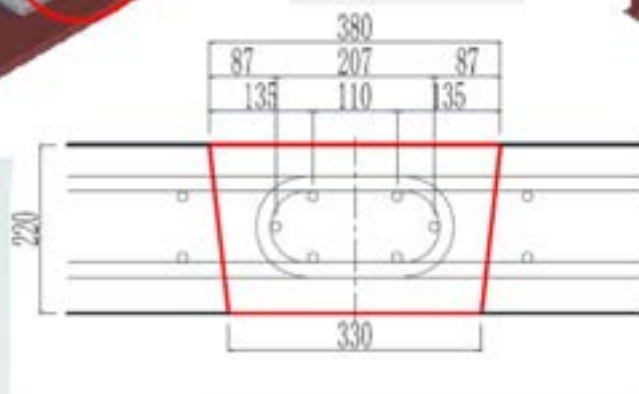
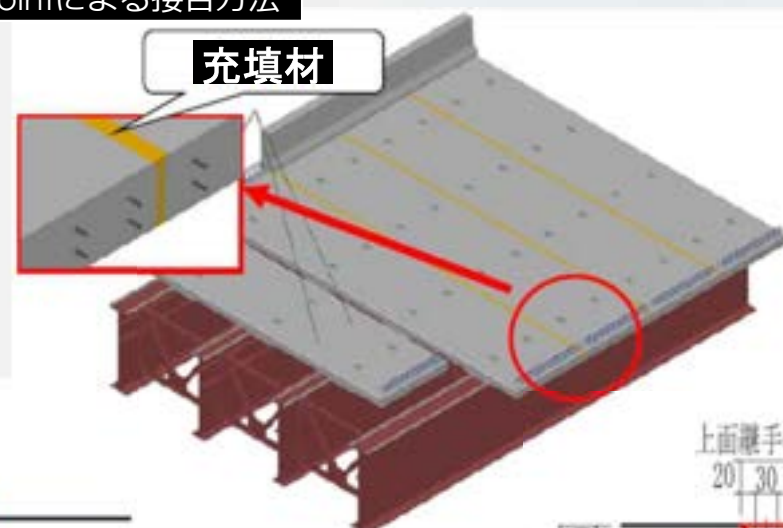
**鉄筋を使わず、適度な強度と剛性を持つ充填材料のみで、
プレキャスト床版間を接合。** 充填材: プレキャスト床版本 $\sim$ 1/50程度の静弾性係数で、
引張強度や付着強度が床版

本体と同程度のもの(ポリマーセメントや、エポキシ樹脂モルタルなど)

ループ継手による接合方法



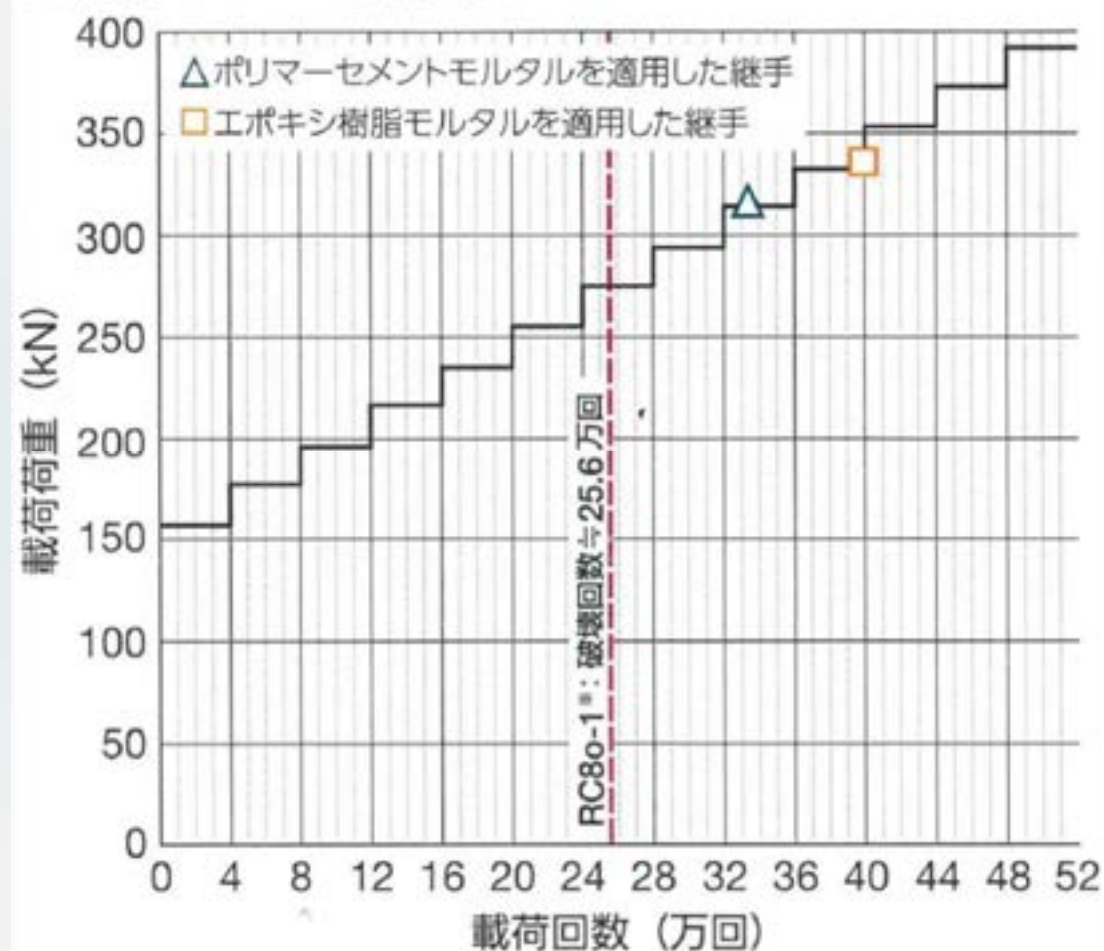
ELSS Jointによる接合方法



- 1) 北慎一郎, 櫻井信彰, 前川宏一, 松井繁之: 床版取替に向けた半連続プレキャスト床版構造の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 38, No. 2, pp. 67-72, 2016.
- 2) 櫻井信彰, 前川宏一, 松井繁之: プレキャストPC床版用半剛接合継手, 橋梁と基礎, pp. 29-36, 2018.9.
- 3) 北慎一郎, 櫻井信彰, 前川宏一: 半連続プレキャストPC床版の輪荷重走行試験における解析による検証, 第10回道路橋床版シンポジウム論文報告集, pp. 71-76, 2018.11.
- 4) 北慎一郎, 櫻井信彰, 前川宏一: 半剛接合構造を有する床版における負曲げを作用させた輪荷重走行試験と解析による疲労耐久性の検証, 土木学会論文集, 76巻4号, pp. 403-420, 2020.



■ 載荷ステップと破壊回数





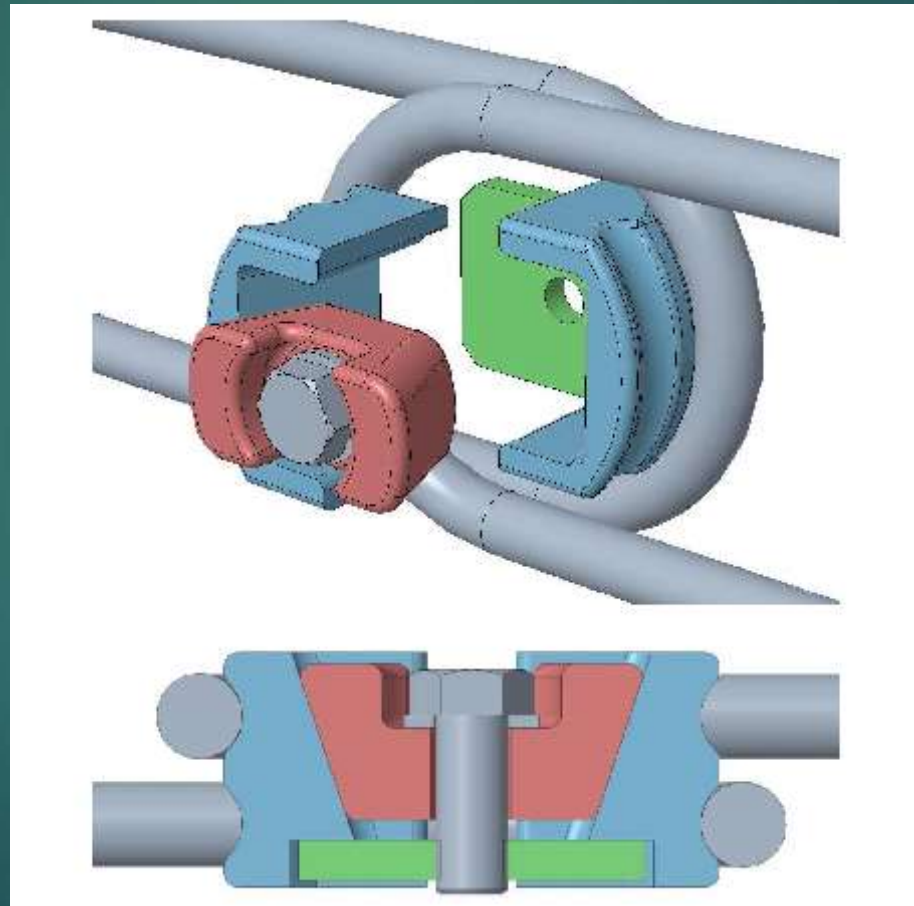
今後、PCaPC床版の縦継手の開発が必要！

橋軸直角方向にもプレストレスが必要か？

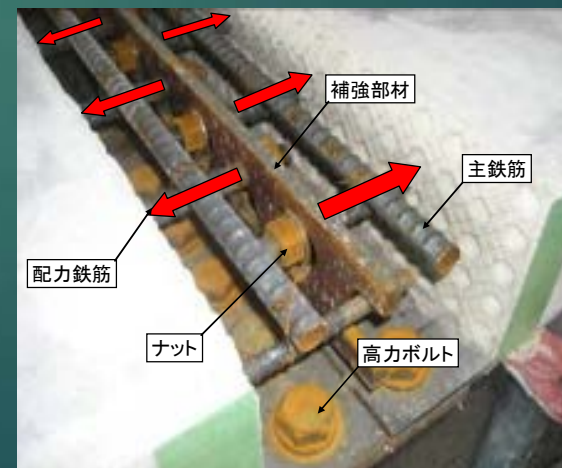
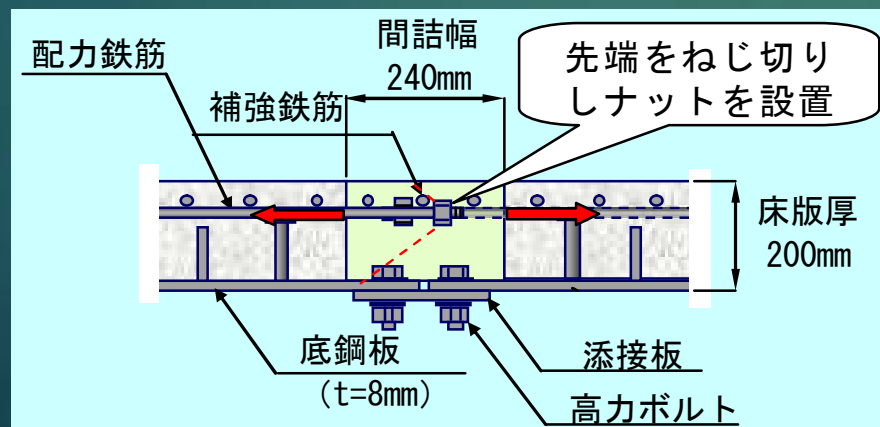
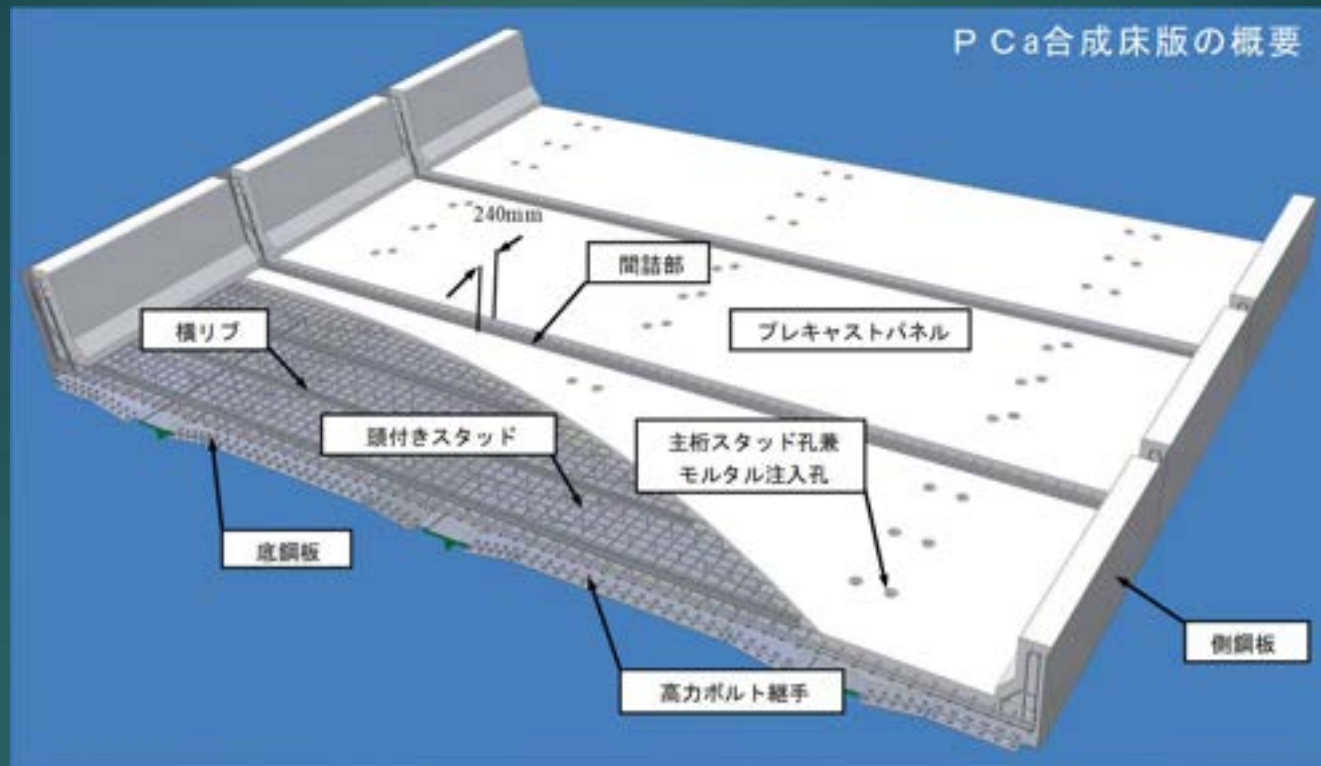
現在の横継手はNEXCOのループ継手が基本としている。すなわち、配力鉄筋が表面側に配置されている中で、主鉄筋に直角の断面では鋼材の断面曲げ剛性は小さい。現在のRC床版では主鉄筋は表面側にあるので断面合成は大きくなる！

⑦主鉄筋を外側に移したループでは

縦継手が可能となり、鋳物継手が使える！



⑧ 合成床版での合理化継手の概要



(9) 新材料を用いた床版の開発も並進！

①超高強度繊維補強コンクリート(UFC)を用いた軽量化・PC床版！

ワッフル床版+PC

阪高+鹿島

②超高強度繊維補強コンクリート(PVA-UFC)と超高強度鉄筋

$\sigma_{ck} = 150 \text{ N/mm}^2$ 、USD685 RC床版 エスコン

③軽量2種コンクリートを用いたプレキャストPC床版

$\gamma = 19 \text{ kN/mm}^3$ (軽量2種) 2方向PC IHIインフラ建設

④高強度軽量繊維カナクリートを用いたRCプレキャスト版

$\gamma = 17.8 \text{ kN/m}^3$ 、 $\sigma_{ck} \div 40 \text{ N/mm}^2$ 、 $\sigma_{sa} \div 200 \text{ N/mm}^2$ カナフレックス

継手は異形鉄筋の短い直筋で

⑤超高密度高強度繊維補強コンクリートによる補修・補強

補修用に特化 J-ティフコム

ビービーエム、サンブリッジ

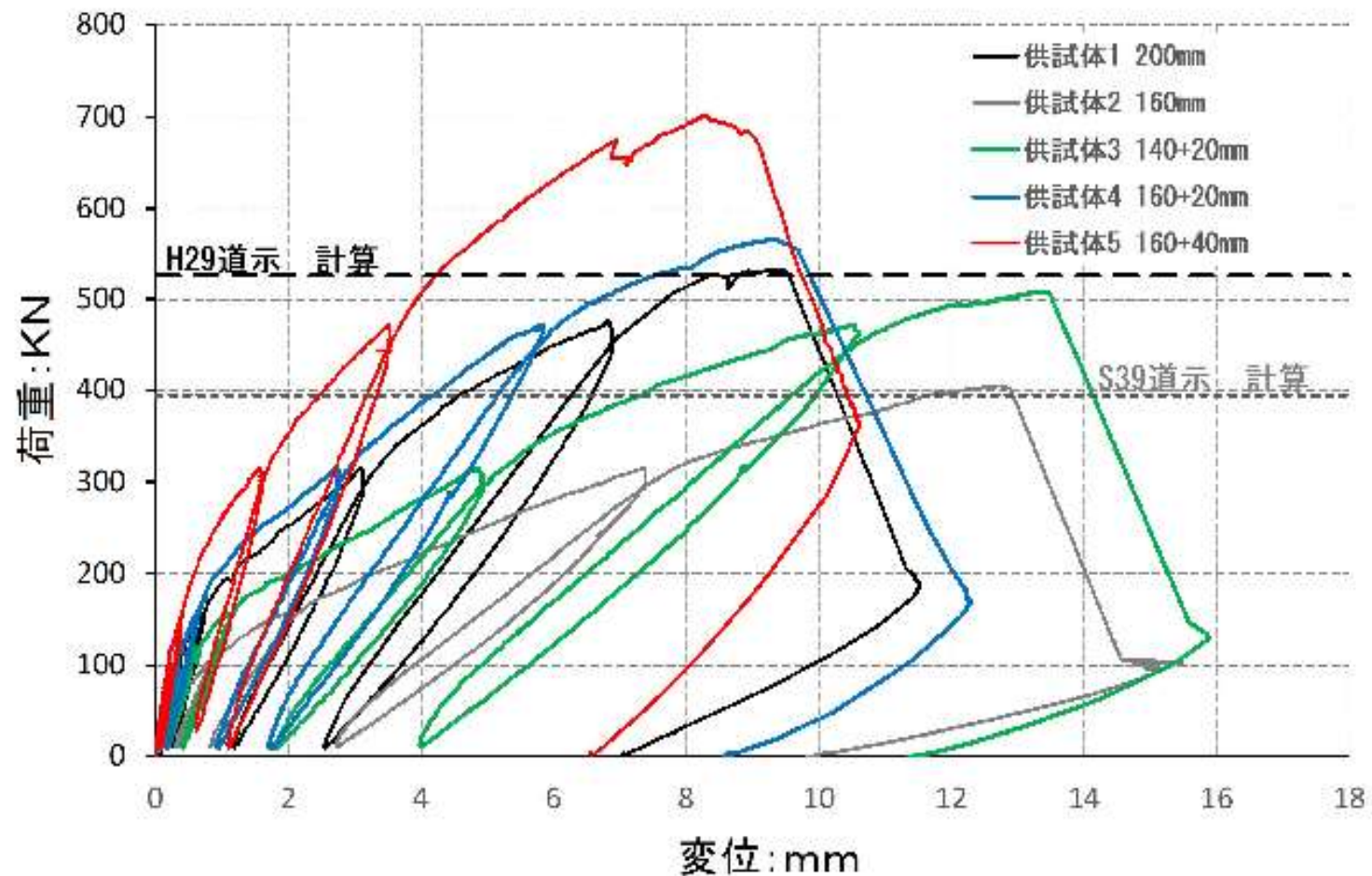
床版継手も異形鉄筋の短い直筋でよい

J-ティフコムの上端打足の補強効果 (速報)



試験体	タイプ	最大荷重	単位
供試体1	H29道示 RC200	532.2	K N
供試体2	S39道示 RC160	404.4	K N
供試体3	RC140+JT20	507.2	K N
供試体4	RC160+JT20	566.0	K N
供試体5	RC160+JT40	701.4	K N
計算値1	H29道示 計算値	526.0	K N
計算値2	S39道示 計算値	394.0	K N

荷重—変位(荷重直下)



(10) 一般道の橋梁では

一般道ではほとんどは **単独橋！**

更新予算はほとんどない！

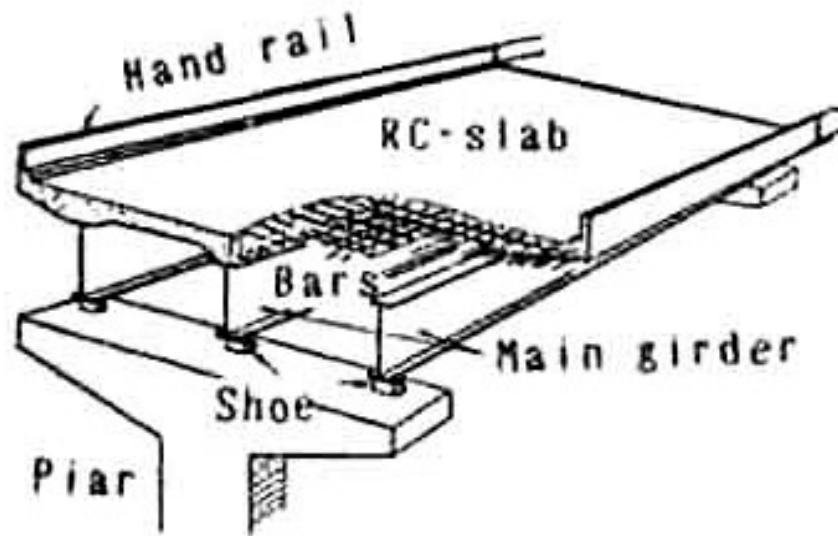
下部工の耐力と前後道路との取り合いから

床版厚を大きくできない！

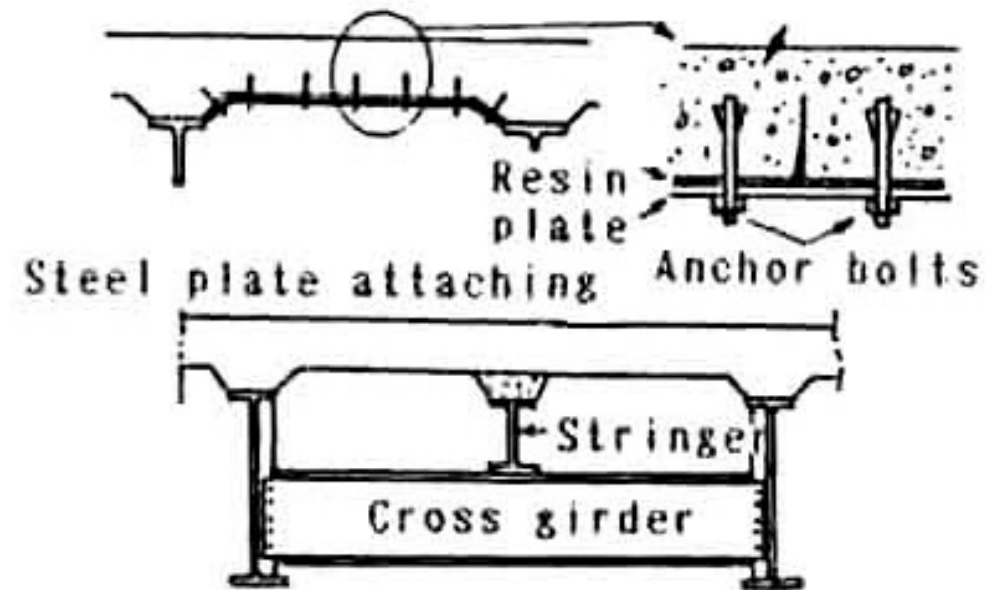
地方公共団体が管理する橋は

維持管理で対応するのが良い！

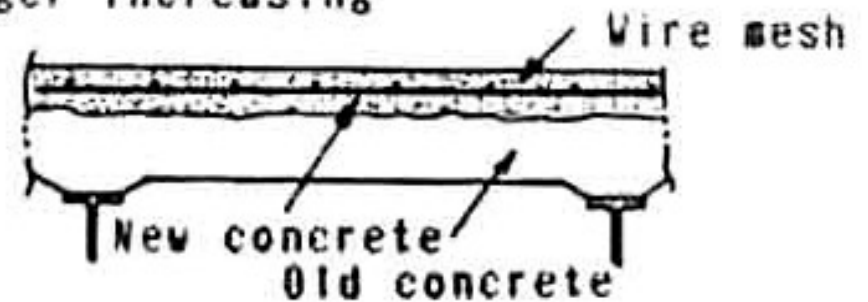
ひび割れ損傷を受けた床版の維持管理代表的な補修・補強工法



General View of Bridge



Stringer increasing



Slab thickness increasing

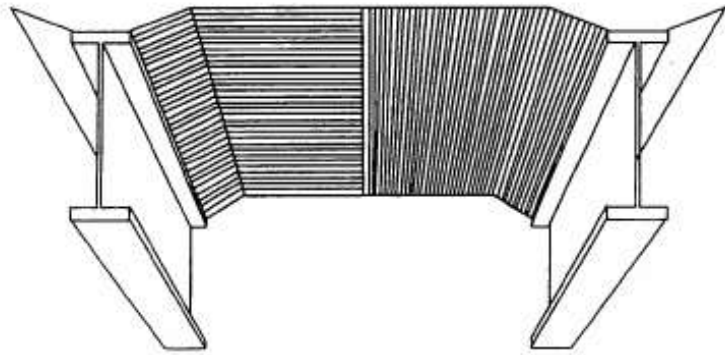
鋼板接着工法



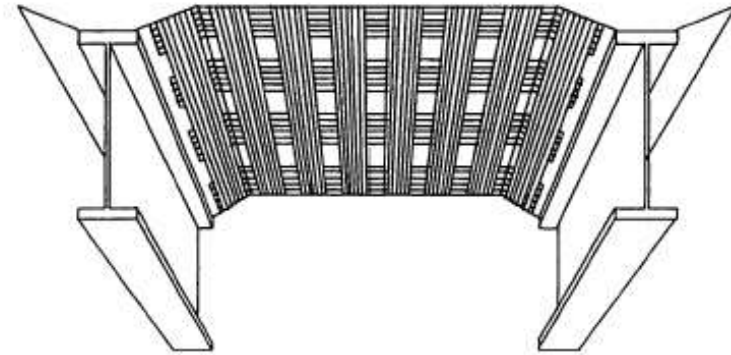
縦桁増設工法



炭素繊維シート接着補強(下面)



Full-surface covering



Grid pattern

格子張りが増加している！

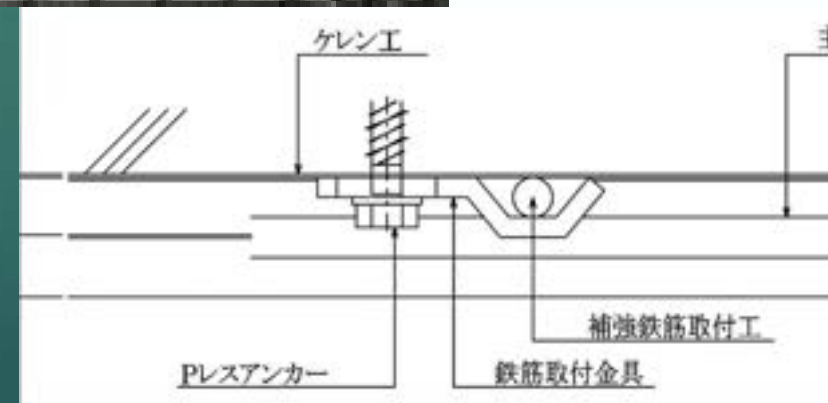
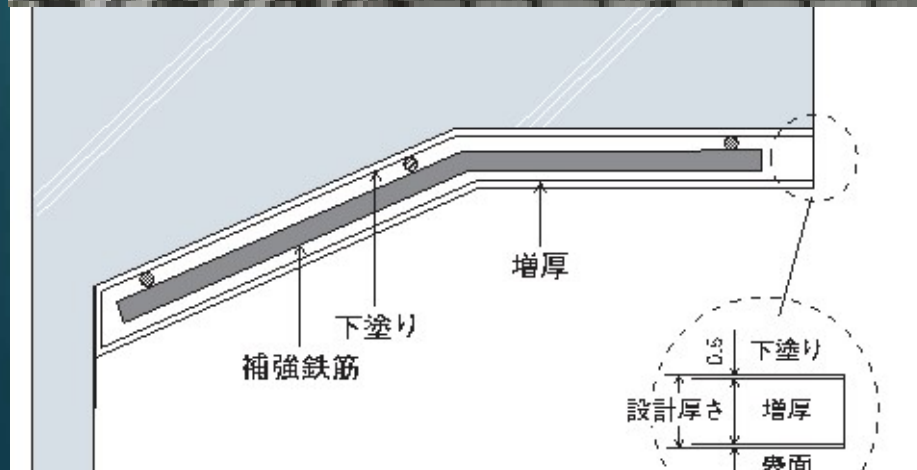
- 材料コストの低減
- 水分の残留を最少に
- コンクリートの劣化のモニタリングが必要

下面増厚工法

鉄筋格子+ポリマーセメントモルタル



鉄筋の
固着が重要



鋼床版風架構補強方法 アンダーデッキパネル工法



おわりに！

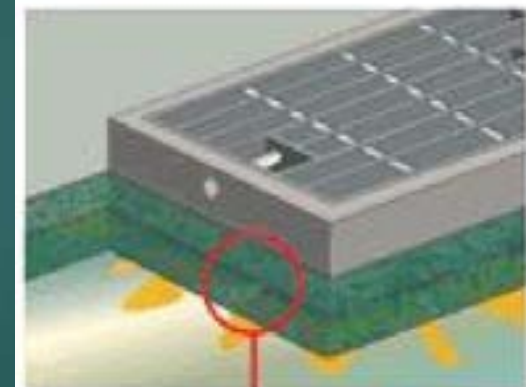
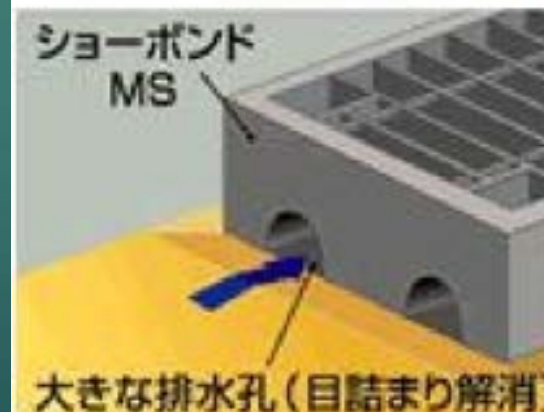
タイヤの通行位置の下当たりの劣化が先行

防水層の有無に無関係？

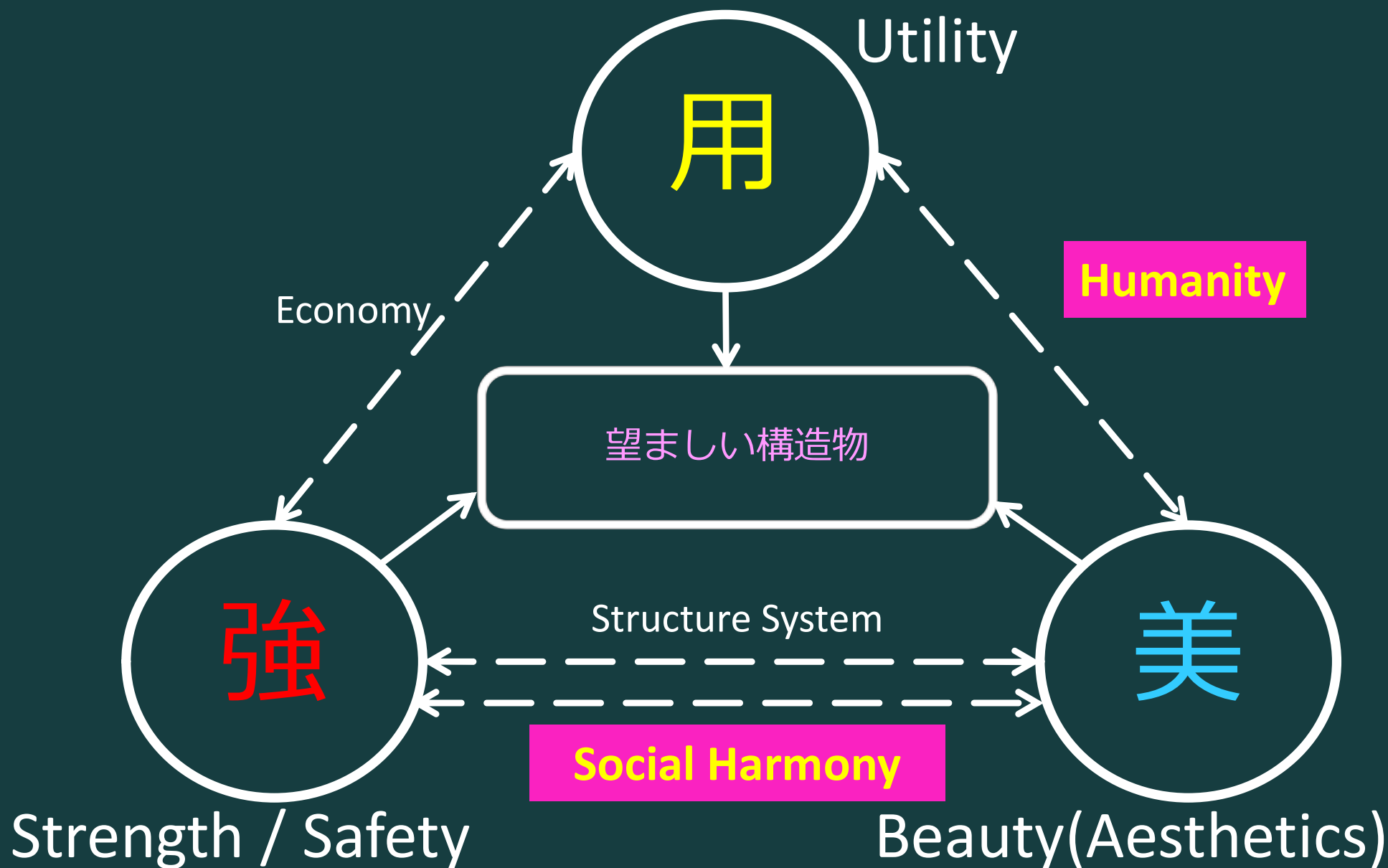
何か良い対策？

舗装内の水を抜くことが重要！

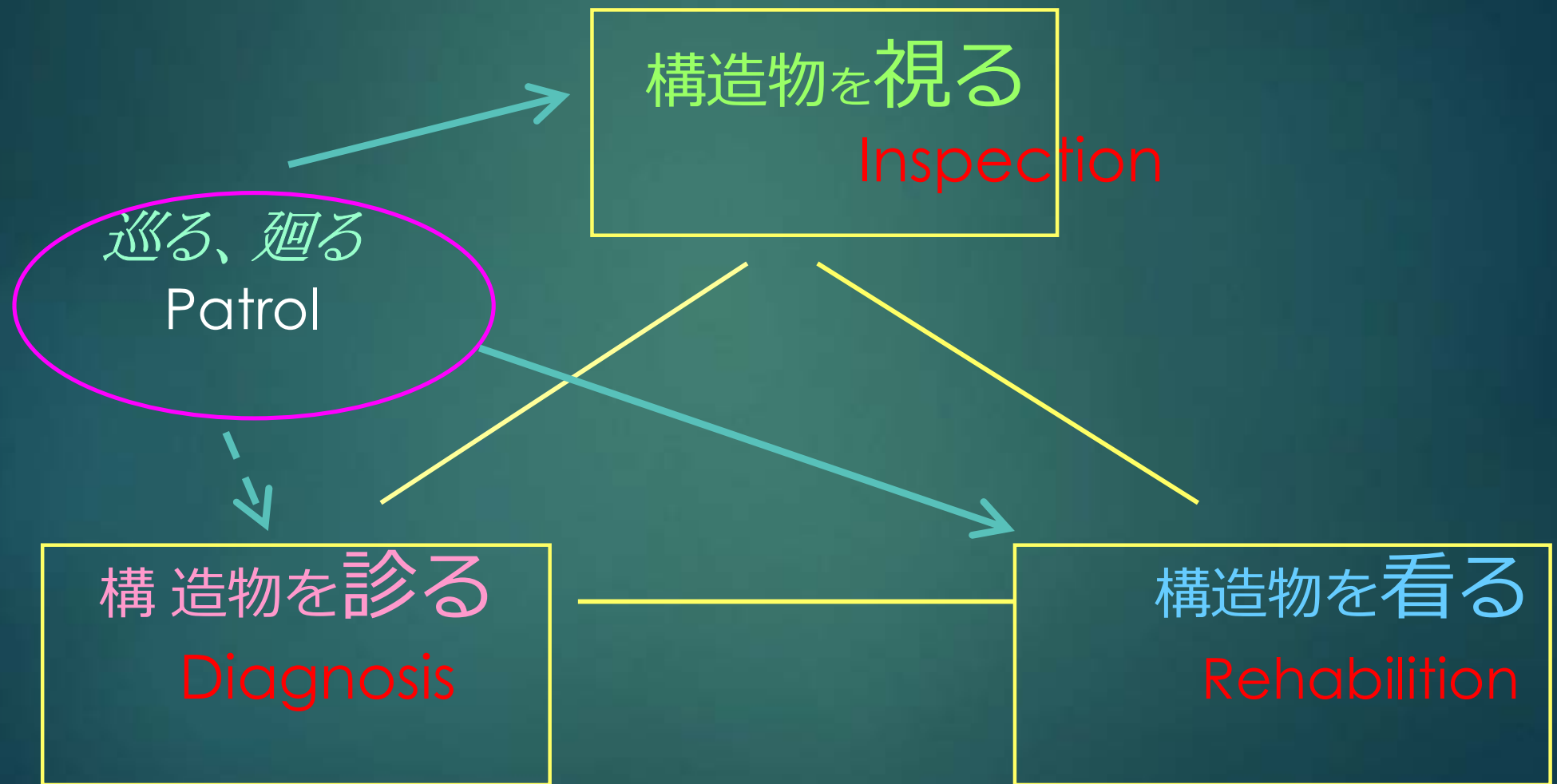
排水柵の改良



設計の三原則



構造物の維持管理 Maintenance



ご清聴有難うございました