第　3　回　定　期　研　究　会

平成１９年度　第３回定期研究会　議事録

日時　：平成 19 年 9 月 5 日(水)　16：00～17：30
場所　：名城大学 天白キャンパス　タワー75 15 階 レセプションホール

出席者： 久保，小塩，近藤（名城大）,青木（愛工大），葛，石川（名大），清水（信州大），永田（名工大），酒造（大同）中野，村瀬（愛知県），安藤（富士Ｅ），加藤（海洋架橋･橋梁調査会）鷲見（八千代Ｅ），園部（JIP），中田（日本工営）藤澤（新三重技術開発），大徳（中部復建）原田（創建），酒井，吉田（川田）播金，古田土（トピー），　中川（瀧上），　山田，神頭，水野，高橋（日車）

28 名(敬称略)

1.研究奨励の報告

講演者 八千代エンジニヤリング　　鷲見英吾
　　川田工業株式会社　　吉田順一郎

講演内容

平成16年度から研究奨励を行っていた複合構造物の研究についての報告をしていただいた.

今までの歴史的背景から合成桁は非合成桁と比べて耐荷力が無いといわれているが，その根拠となる研究はほとんど行われていない．道路交通の問題の一つである過積載車両に対して両者の終局耐荷力を比較した.

この研究では合成桁が非合成桁に比べて耐荷力が大きくなり、その要因として、合成桁はスタッドジベルの耐荷力が大きく、非合成桁ではスラブアンカー先に壊れるため、耐荷力が小さくなる.

今後はより実際に近い条件での解析が課題となる.

合成桁の採用はコスト削減に寄与するところが大きいため、参加者の関心も高く，積極的な質疑が行われた.

2.定期研究会（永田研究会担当幹事）

講演題目 「CFRP 板接着による鋼構造物の補修・補強」
講演者　名古屋大学　助教　石川敏之
講演内容

CFRP の接着についてその力学挙動の観点から講演を行っていただいた.

CFRP の剥離の評価には，界面力学，応力特異場，界面線形破壊力学といった観点からアプローチを行うことが出来る．その結果，剥離に影響を与えるパラメータとして長さ，剛比が要因となることが分かった．特に剛比については，その値により鋼板側で剥離するケースと，CFRP 側で剥離するケースがあり，実験の結果が数値的に証明されることとなった.

また，鋼板と CFRP 板の間に繊維シートを挿入することにより剥離の防止や，その他，剥離を抑えるいくつかの手法について，解析的にその効果を実証して頂いた.

前回の中村先生の講演に引き続き CFRP 板を用いた補修，補強のテーマとなったため、参加会員も十分な予備知識をもって講演を聴くことができた．CFRP 板による補修，補強の更なる実用化のために，現状ある課題についてなど，非常に活発な質疑が行われた.

以上//

合成鈑桁橋と非合成鈑桁橋の終局耐荷力の比較(その1)

八千代エンジニヤリング(株)　○鷲見　英吾
和歌山航測(株)　田中　健一
JIPテクノサイエンス(株)　園部　巌

(株)建設技術研究所　小澤　優二
(株)東京建設コンサルタント　水谷　圭司

1.目　的

◆**背景**

コスト縮減や構造の合理化;合成桁構造の採用
合成桁構造採用上の問題;過積載車両の問題，維持管理
非合成鋼桁構造の耐荷力≧合成鋼桁構造の耐荷力

◆**目的**

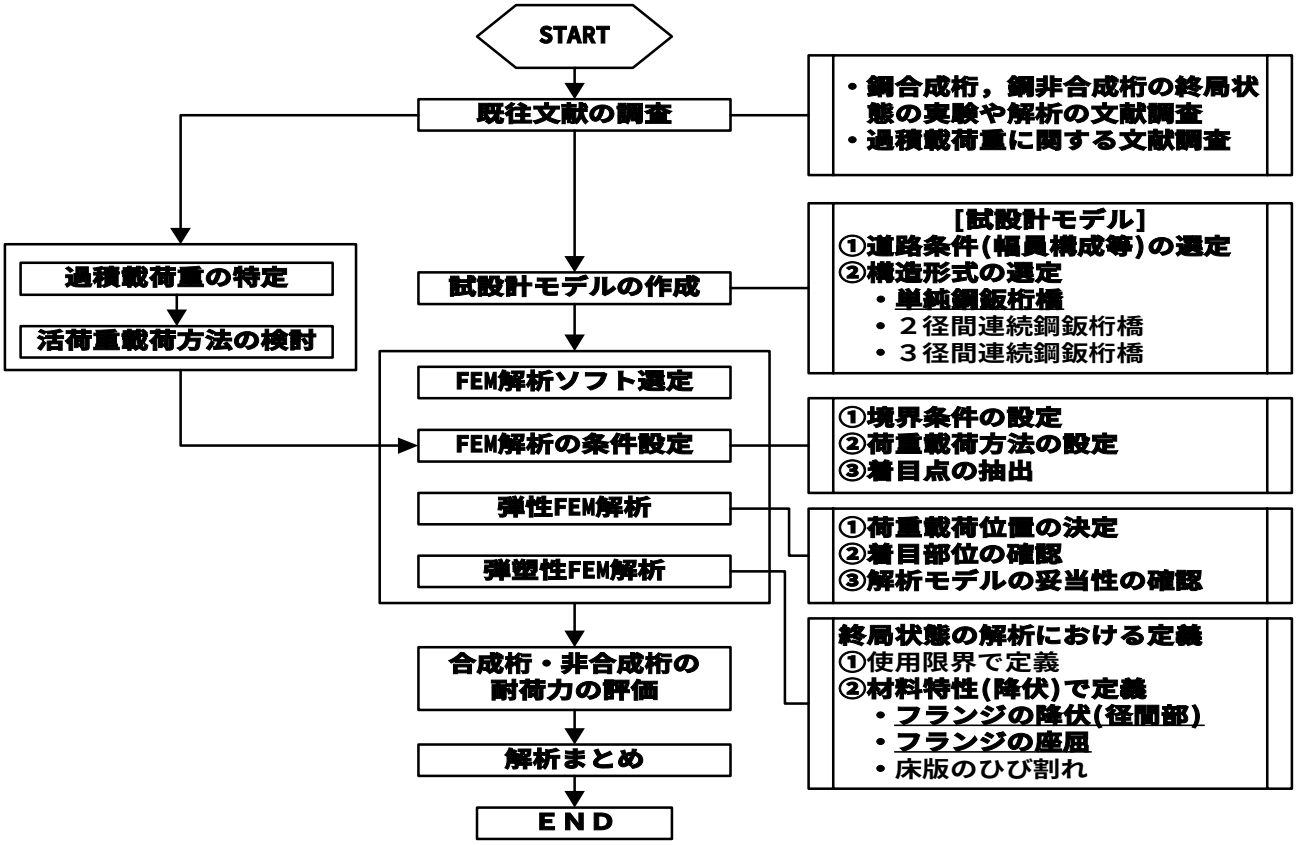
過積載車両に対し合成鈑桁橋と非合成鈑桁橋の耐荷力を解析により明らかにするとともに，終局耐荷力の比較を行うものとした.

◆**概要**

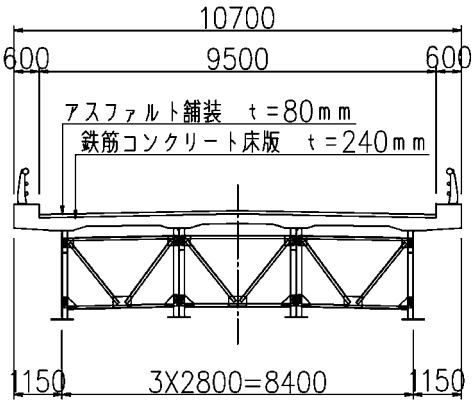
当報告(その1);概要，合成鈑桁橋の終局耐荷力
(その2);非合成鈑桁橋の終局耐荷力，合成鈑桁橋との比較

※本研究は東海構造研究グループ(SGST)の平成16年度研究奨励の助成を受けて行ったものである.

2.解析フロー



3.解析モデル

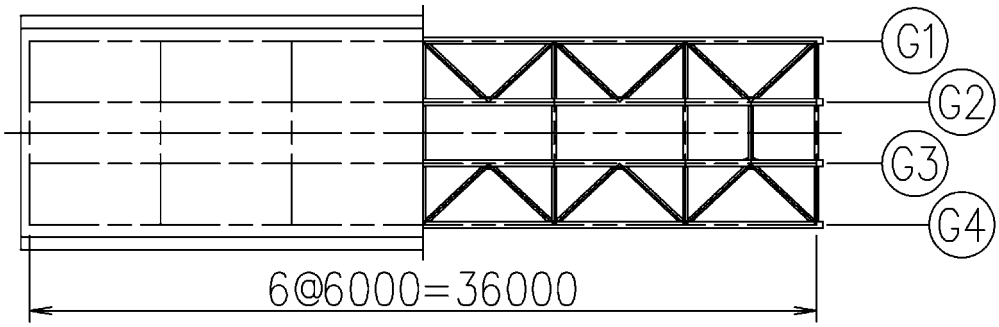


第3種第1級・B活荷重

横断図

対象部材		使用要素
コンクリート床版		ソリッド要素
主桁	フランジ	シェル要素
	ウェブ	シェル要素
	水平補剛材	シェル要素
	垂直補剛材	シェル要素
横桁		シェル要素
対傾構		はり要素
下横構		はり要素

平面図



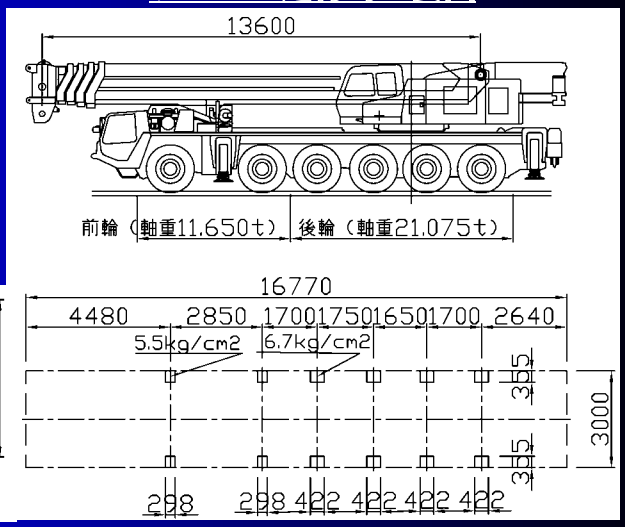
4.荷重

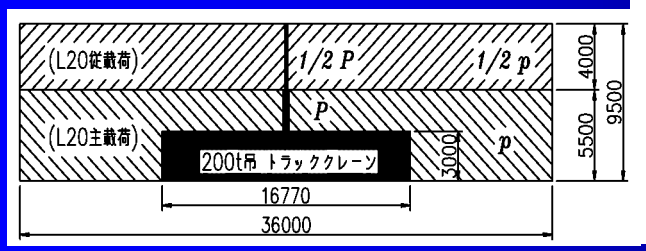
過積載車両荷重；

200t吊トラッククレーン

(ブーム＋カウンターウエイト積載状態での走行)

クレーン走行時　姿図





橋梁への活荷重載荷平面図

輪荷重　平面　分布図

5.解析方法

使用した弾塑性有限変位プログラムの特徴は，

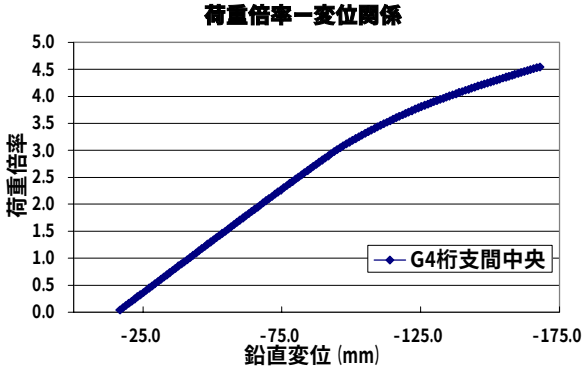
(1)部材の降伏や座屈現象をシミュレーション可能

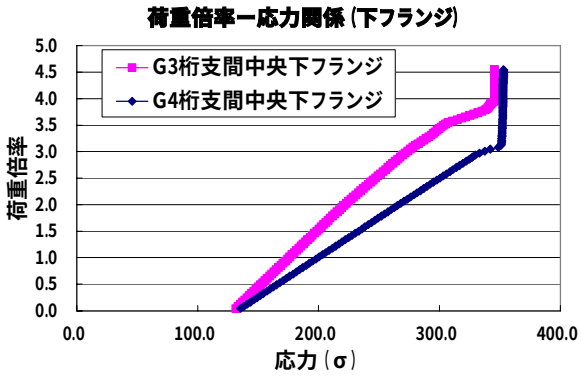
(2)部材の降伏･ひずみ硬化や有限変位挙動を考慮可能

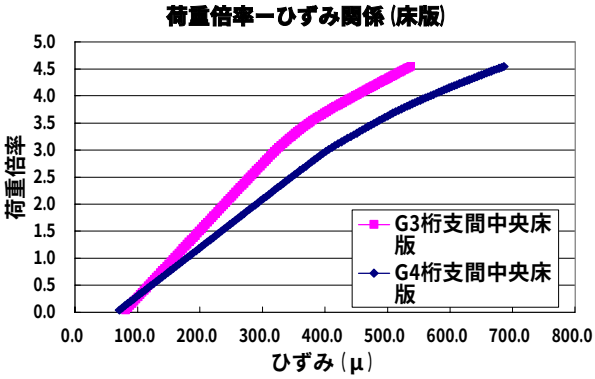
(3)荷重増分が自動に計算可能であり，今回のコンクリート鋼合成構造の荷重増分による終局耐荷力を解析するのに最適と判断した．

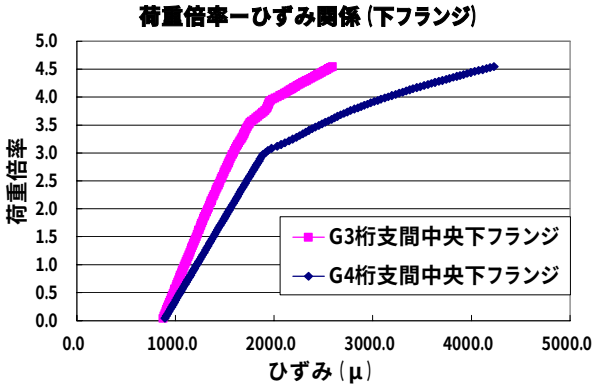
6.解析結果

page 7

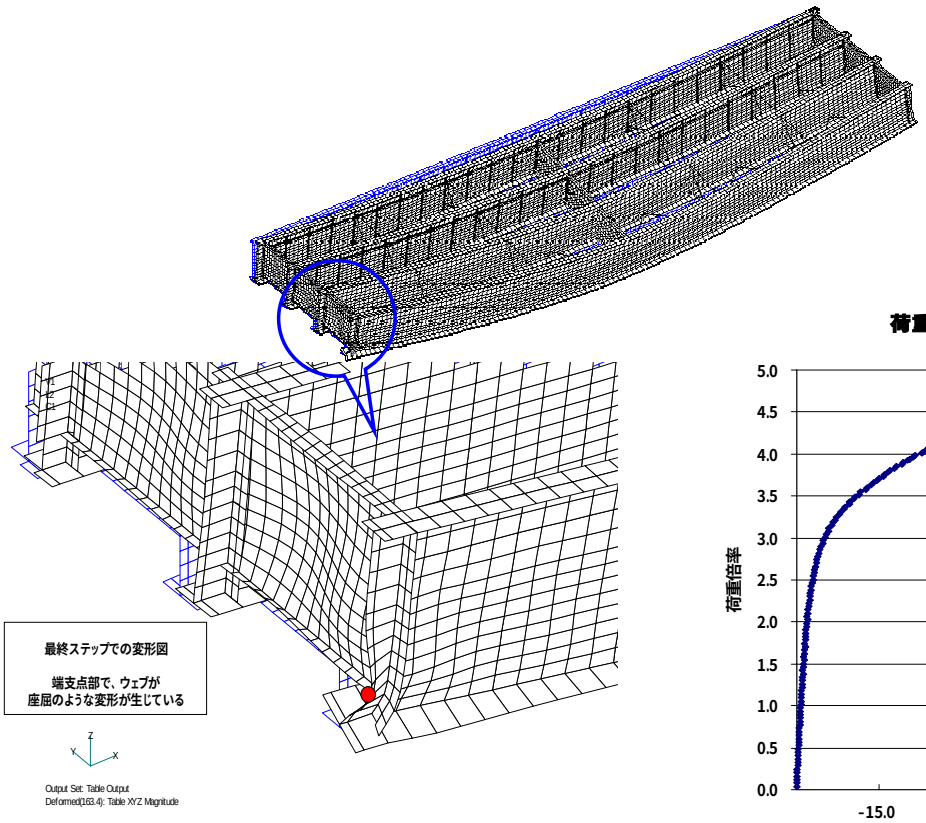


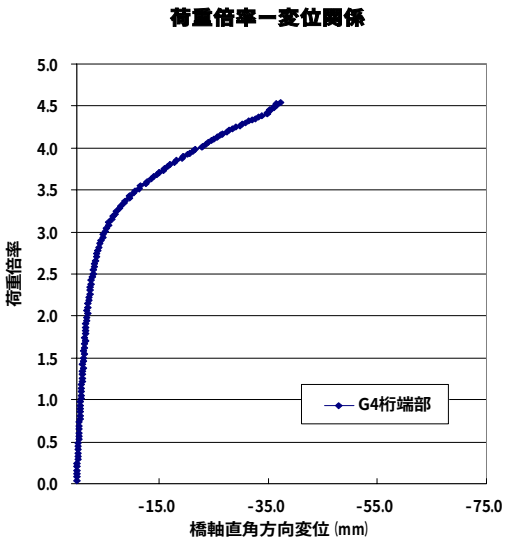






page 8





7. まとめ

- 合成鈑桁橋は，過積載車両荷重の約3倍まで耐荷力を有していると推定できる．この時，床版は健全である．
- 終局状態は，支間中央G4下フランジの降伏だけで無く，支点位置の座屈のような変形でも現れており，相互の因果関係は今回の解析では明確にすることができなかった．

8. 今後の課題

- 終局状態へ至るメカニズムの解明

→終局状態へ至る各構造部材の順序の解明

- 実橋への適用を目指して

→鉄筋コンクリート床版の健全性評価

→合成した床版が損傷したときの桁の挙動

→スタッドジベルのバネ値による終局耐荷力の解明及びジベル本数の最適化等合理化

合成鈑桁橋と非合成鈑桁橋の終局耐荷力の比較(その2)

川田工業(株)　○吉田順一郎
JIPテクノサイエンス(株)　村田　芳春
JFEエンジニアリング(株)　井上　武也
日本工営(株)　中田　隆

1. 概要

合成鈑桁橋

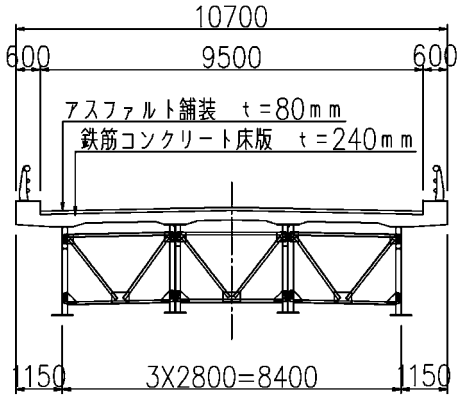
・過積載車両荷重の約3倍まで耐荷力を有する(当報告・その1より).
・コスト<u>低減に有利</u>.

非合成鈑桁橋

・従来、一般的に用いられている.
・過積載車両荷重に対する耐荷力は？

※　本研究は東海構造研究グループ(SGST)の平成17年度研究奨励の助成を受けて行った.

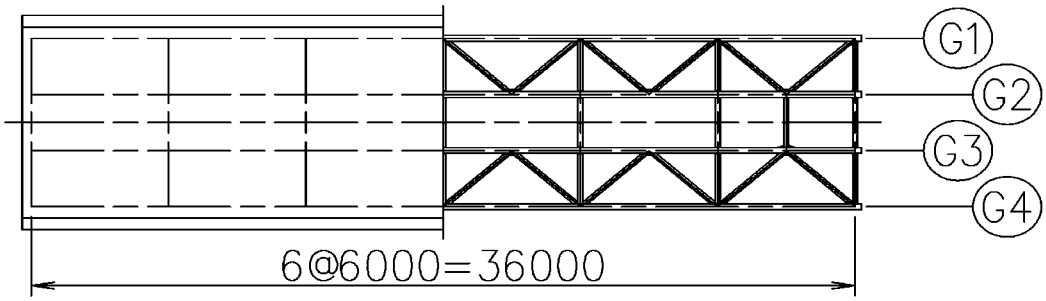
2. 解析モデルと要素



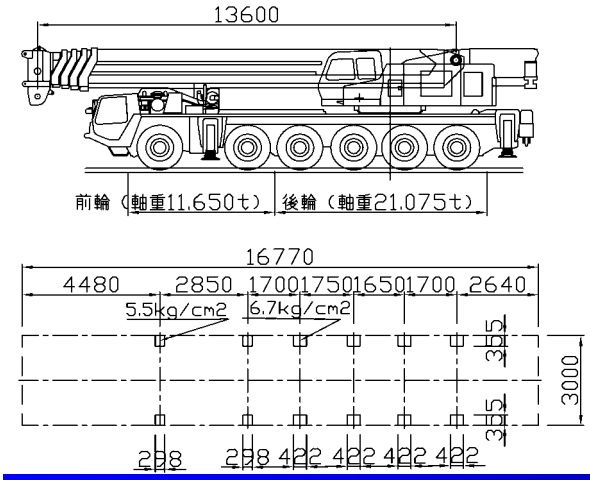
第3種第1級：B活荷重

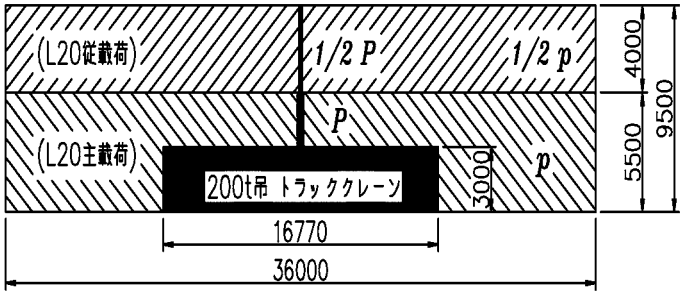
対象部材		使用要素
コンクリート床版		ソリッド要素
(スラブアンカー)		バネ要素
主桁	フランジ	シェル要素
	ウェブ	シェル要素
	水平補剛材	シェル要素
	垂直補剛材	シェル要素
横　桁		シェル要素
対傾構		はり要素
下横構		はり要素

床版と主桁の接合
橋軸方向条件
①固定無し
②スラブアンカー
（φ16mm,1mピッチ：ずれ定数=400kN/mm, 参考文献 1) より ）



3. 荷重



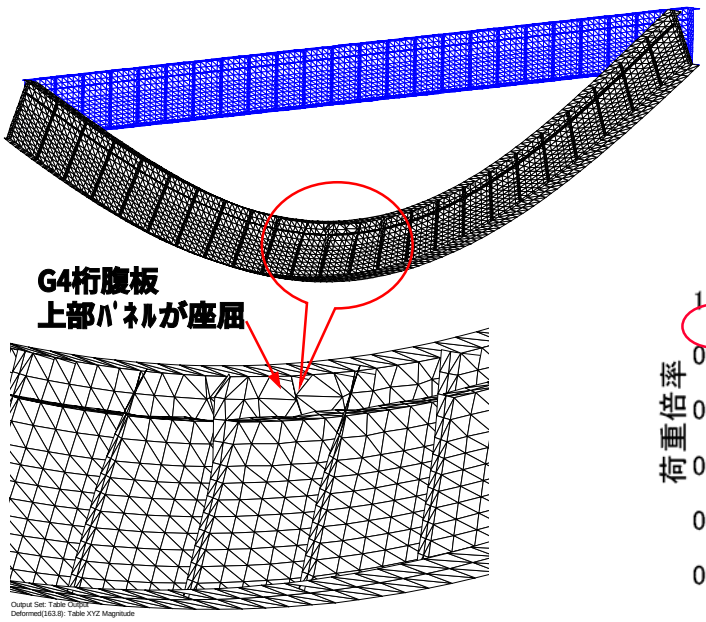


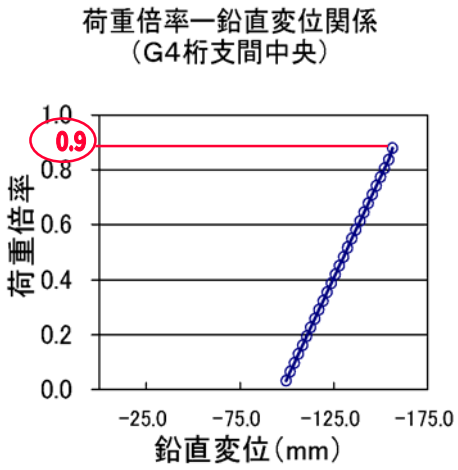
過積載車両荷重
(200t吊トラッククレーンブーム付き)

活荷重載荷図

4. 解析結果①

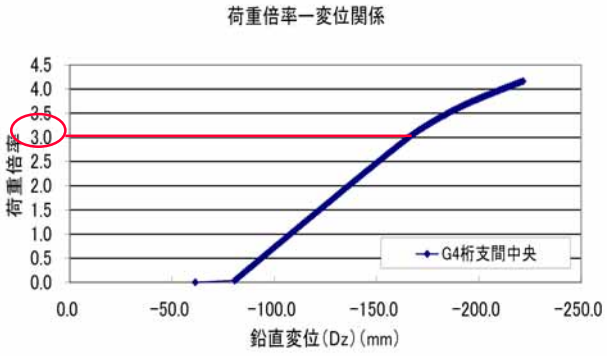
床版と鋼桁の橋軸方向固定無しの場合
過載荷荷重の約0.9倍で，G4桁支間中央腹板上部に座屈

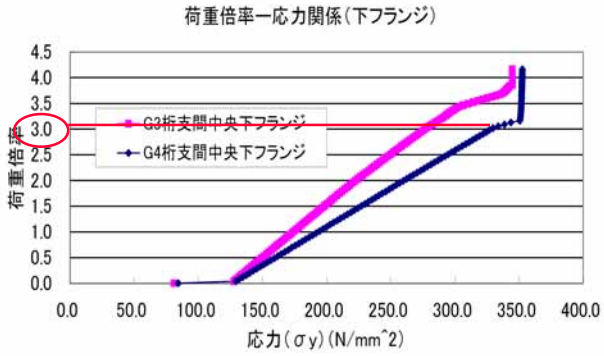


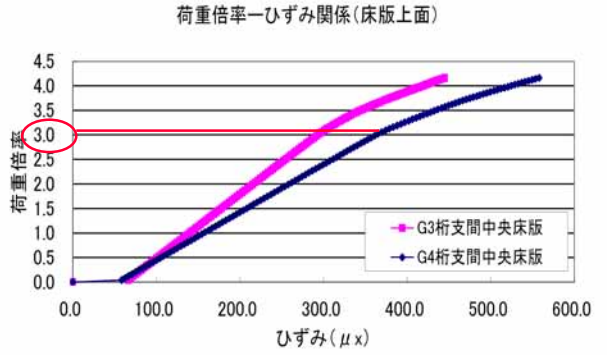


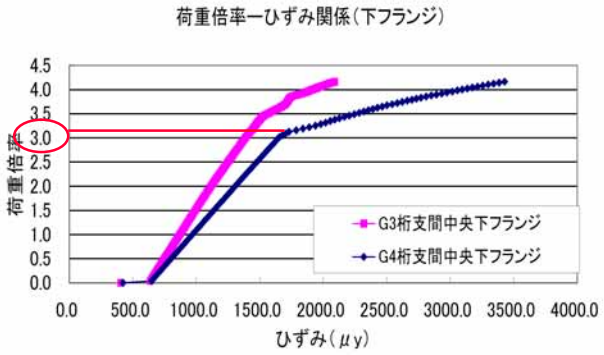
5. 解析結果②

スラブアンカーを考慮した場合
主桁変位，床版・下フランジの応力，ひずみ

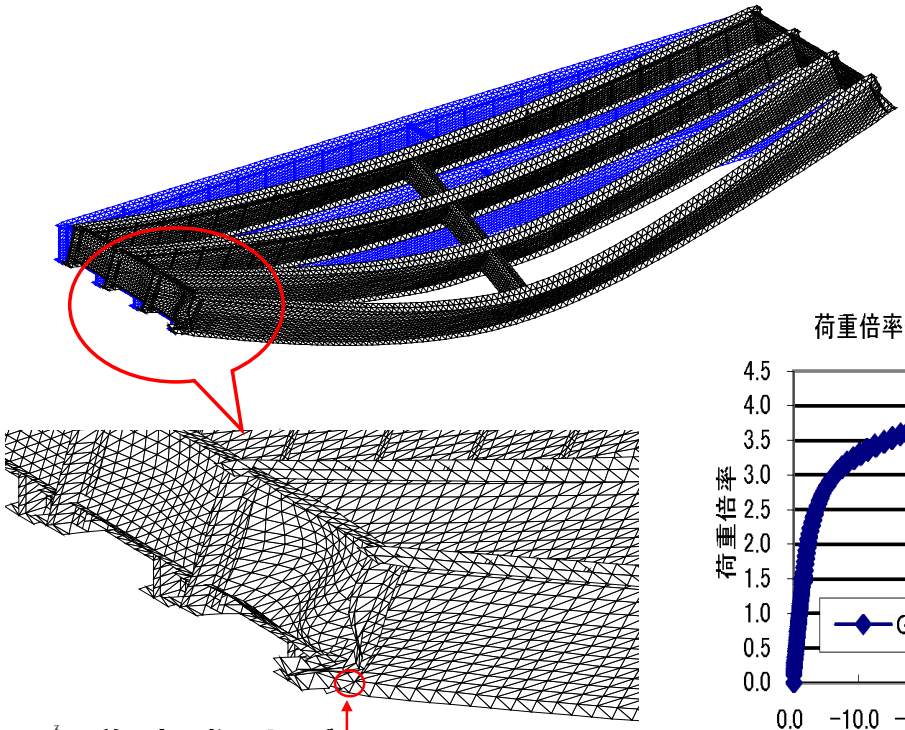




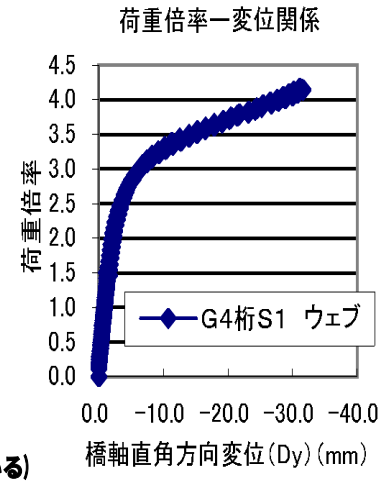




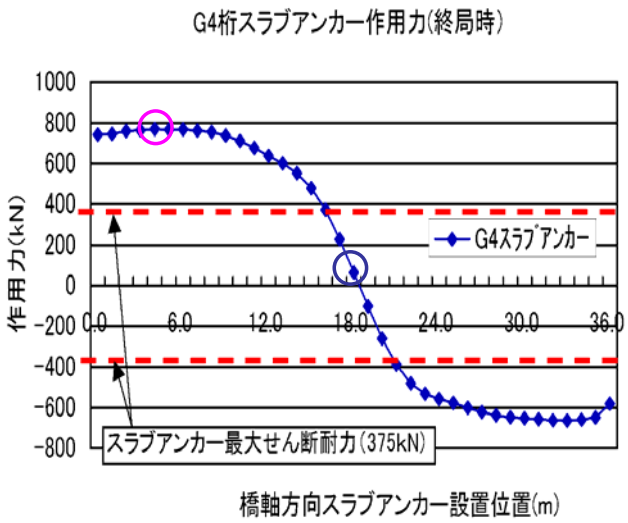
スラブアンカーを考慮した場合 終局時の荷重-変形図

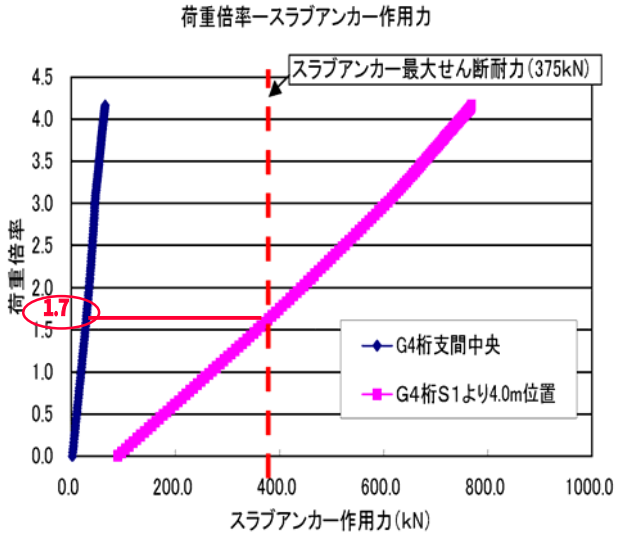


着目点G4桁S1ウェブ
(端支点部でウェブ，横桁に座屈のような変形が生じている)



スラブアンカーを考慮した場合 スラブアンカー作用力





・ｽﾗﾌﾞｱﾝｶｰ作用力は，ｽﾗﾌﾞｱﾝｶｰの最大せん断耐力の2倍．
・最大せん断耐力点を終局耐荷力点と想定すると、過積載車輌荷重の1.7倍が終局耐力と推定される．

6. まとめ

- 非合成鈑桁橋は，スラブアンカーの最大せん断耐力点を終局耐力点と想定すると、過積載車両荷重の約1.7倍まで耐荷力を有していると推定される．

- 合成鈑桁 橋においては，密に配置されたスタッドジベルが，スラブアンカーの6倍程度の水平せん断耐力を有するため，ほぼ解析値どおり，過積載車両荷重の約3倍まで終局耐荷力が確保出来ると推定される．

7. 今後の課題

より実際に近いモデルにて、耐荷力評価を行う必要あり。

①非合成鈑桁橋：スラブアンカーの非線形挙動を考慮

②合成桁鈑橋　：スタッドジベルの非線形性を考慮

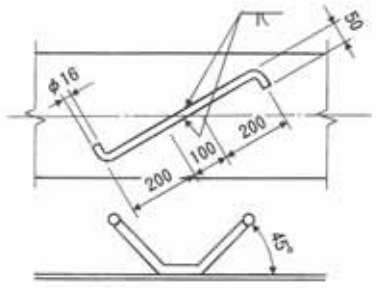
③床　　版　：輪荷重に対する耐久性や劣化度を評価した解析

⇒　鋼断面の低減、ジベル本数の低減

【非合成桁・合成桁の比較】単純桁

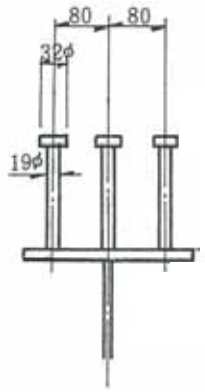
構築形式				非合成桁						合成桁					
断面No.				SEC-1			SEC-2			SEC-1			SEC-2		
外桁	鋼桁	床版	有効幅	---			---			2550			2550		
		(mm)	厚	240			240			240			240		
		U-FLG	幅	600			600			400			400		
		(mm)	板厚	27			34			16			16		
		WEB	高さ	2000			2000			2000			2000		
		(mm)	板厚	10			10			10			10		
		L-FLG	幅	600			600			600			600		
		(mm)	板厚	32			34			29			31		
	材質			SMA490W			SMA490W			SMA490W			SMA490W		
	断面力 (kN・m,kN)		曲げ	8104			9637			8713			10122		
			せん断	517			224			494			227		
	応力度 (N/mm²)	床版		---			---			4.3	<	8.6	5.0	<	8.6
		鋼桁	U-FLG	204	<	210	204	<	210	199	<	241	224	<	241
			WEB	26	<	120	11	<	120	25	<	120	11	<	120
			L-FLG	201	<	210	204	<	210	200	<	210	205	<	210
			合成	0.9	<	1.2	0.9	<	1.2	0.8	<	1.2	0.9	<	1.2
内桁	鋼桁	床版	有効幅	---			---			2800			2800		
		(mm)	厚	240			240			240			240		
		U-FLG	幅	600			600			440			440		
		(mm)	板厚	24			28			16			16		
		WEB	高さ	2000			2000			2000			2000		
		(mm)	板厚	10			10			10			10		
		L-FLG	幅	600			600			600			600		
		(mm)	板厚	28			28			25			27		
	材質			SMA490W			SMA490W			SMA490W			SMA490W		
	断面力 (kN・m,kN)		曲げ	7139			8121			7775			9070		
			せん断	471			314			473			268		
	応力度 (N/mm²)	床版		---			---			3.6	<	8.6	3.9	<	8.6
		鋼桁	U-FLG	198	<	210	203	<	210	190	<	241	218	<	241
			WEB	24	<	120	16	<	120	24	<	120	13	<	120
			L-FLG	198	<	210	203	<	210	204	<	210	203	<	210
			合成	0.9	<	1.2	0.9	<	1.2	0.7	<	1.2	0.9	<	1.2
鋼重 (ton)				84.2 (1.00)						68.2 (0.81)					
上部工概算工事費 (千円)				92,684 (1.00)						82,370 (0.89)					

スラブアンカー，スタッドジベルの最大せん断耐力の比較



スラブアンカー：1-φ16mm-1.00mピッチ

最大せん断耐力=375.3kN/1本



スタッドジベル：3-φ19mm-0.25mピッチ

最大せん断耐力=197.1kN/1本

(197.1×3×1.00/0.25)/375.1=6.3倍

※最大せん断耐力は参考文献 1) より

講演者

名古屋大学　助教　石川敏之

講演題目

CFRP 板接着による鋼構造物の補修・補強

講演要旨

近年，炭素繊維強化樹脂板（CFRP 板）を用いた鋼構造物の補修・補強が行なわれ始めている．CFRP 板は，その重量が鋼と比べて軽いこと，特別な機材や大掛かりな足場を必要としないため施工が容易になることなどの利点がある．しかし，鋼構造物に生じる応力の大きさによっては CFRP 板が鋼構造物からはく離する場合があるため，CFRP 板のはく離を防止する設計を行なわなければならない．

本講演では，引張力を受ける CFRP 板が接着された鋼板を例として，その力学挙動を説明し，CFRP 板のはく離に影響を与える要因を示す．そして，鋼板から CFRP 板がはく離しない条件について説明する．さらに， CFRP 板のはく離を遅らせるために，CFRP 板の付着端近傍の接着剤に生じるせん断応力を低減させる工法について紹介する．

また，CFRP 板の線膨張係数がほぼ 0μ/℃であるため，気温の変動により，鋼と CFRP 板の線膨張係数の差によって生じる CFRP 板接着鋼板の内部応力の挙動についても説明する．

CFRP板接着による鋼構造物の補修･補強

名古屋大学大学院環境学研究科
都市環境学専攻　助教　石川敏之

CFRP板接着による鋼構造物の補修･補強

- **Carbon Fiber Reinforced Polymer**

比重	：1.5程度
ヤング率	：130～420GPa
線膨張係数	：約0μ/℃
引張強度	：1900～2300MPa
伸び	：0.6～1.9%

メリット

- 鋼と比べて軽量である．
- 鋼と同等以上のヤング率を有する．
- 破断強度が高い．
- 接着するだけで補修･補強が行なえるため簡易な補修･補強法である．

デメリット

- 作用荷重によっては，CFRP板がはく離する場合がある．
- 線膨張係数が約0μ/℃であるため，鋼部材に接着した場合，鋼部材，CFRP板および接着剤に温度変化応力が生じる．
- 炭素繊維が鋼材に接触すると，電解腐食が生じる．
- 樹脂が紫外線劣化する．

CFRP板接着による道路橋の横桁の補強例

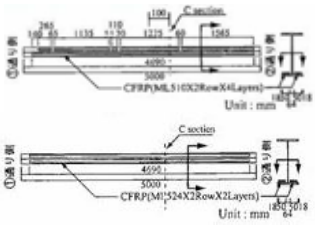
TL-14 → B活荷重対応

写真－2：カーボン板による横桁補強

板垣一也，渡邉憲市，鈴木博之：炭素繊維強化樹脂板（カーボン板）による鋼橋補強の事例，第8回鋼構造の補修･補強技術報告論文集，2002.

CFRP板接着による化学プラント小梁の補修例

最大40%程の腐食



玉井宏章，高松隆夫，服部明生，灰谷徳治，櫻庭　誠：炭素繊維プレートによる化学プラント架構小ばり補剛の施工例，鋼構造年次論文報告集，第13巻，pp.545-552，2005.

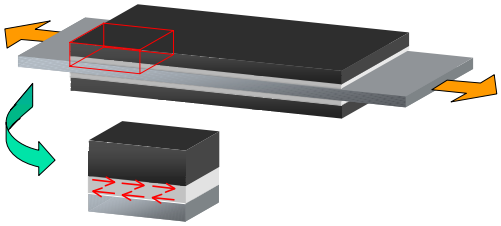
CFRP板のはく離の評価

- 界面力学
- 応力特異場
- 界面線形破壊力学

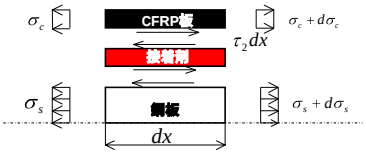
本日の内容

- CFRP板接着鋼板の力学挙動とはく離の防止条件
- はく離せん断応力低減工法
- CFRP板接着鋼板に生じる温度変化応力
- 曲げを受ける鋼桁へのCFRP板の適用

CFRP板接着鋼板の力学



基礎微分方程式



$$\frac{d^2\sigma_s}{dx^2} - c^2\sigma_s = -c^2\xi_0\sigma_{sn}$$

鋼板に生じる応力接着剤に生じるせん断応力

鋼板の応力

$$\sigma_s = \left\{\xi_0 + (1-\xi_0)\frac{\cosh(cx)}{\cosh(cl)}\right\}\sigma_{sn}$$

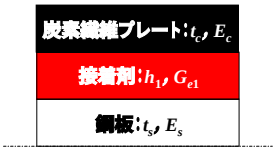
接着剤に生じるせん断応力

$$\tau_1 = ct_s\frac{1-\xi_0}{2}\frac{\sinh(cx)}{\cosh(cl)}\sigma_{sn}$$

無次元パラメータ

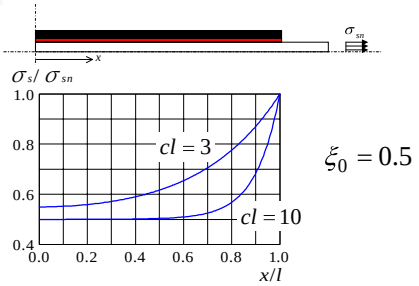
$$\xi_0 = \frac{1}{1+2E_c t_c/(E_s t_s)}$$

$$cl = \sqrt{\frac{G_{e1}}{h_1}}\sqrt{\frac{2}{1-\xi_0}}\frac{l}{\sqrt{E_s t_s}}$$

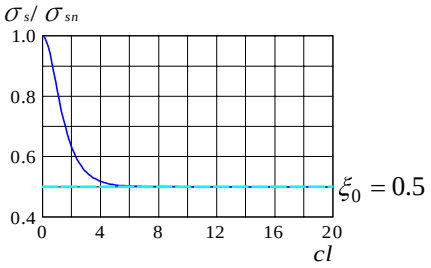


l :炭素繊維プレートの付着半長さ

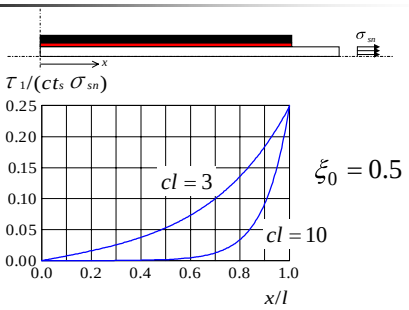
鋼板応力の分布



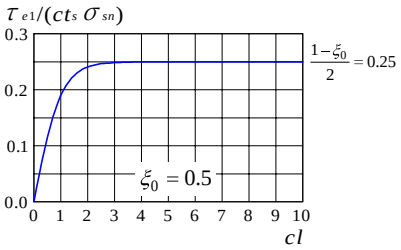
無次元パラメータが鋼板応力に与える影響



接着剤に生じるせん断応力の分布



無次元パラメータがはく離せん断応力に与える影響



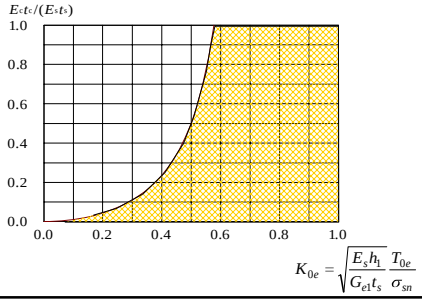
CFRP板のはく離を防止する条件

T_{0e}: 引張りせん断接着強さ

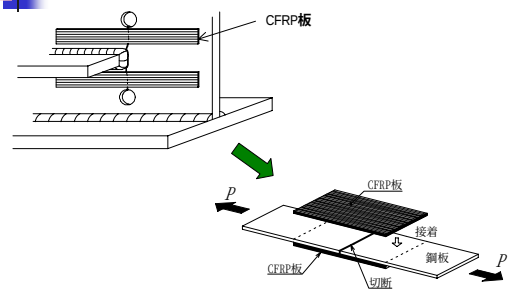
$$\tau_{0e} \le T_{0e} \Rightarrow \sqrt{\frac{1-\xi_0}{2}} \le K_{0e}$$

$$\left(K_{0e} = \sqrt{\frac{E_s h_1}{G_{e1} t_s}} \frac{T_{0e}}{\sigma_{sn}} \right)$$

CFRP板の剛性とKの関係



亀裂の補修へのCFRP板接着工法の適用



鋼板に生じる応力および接着剤に生じるせん断応力

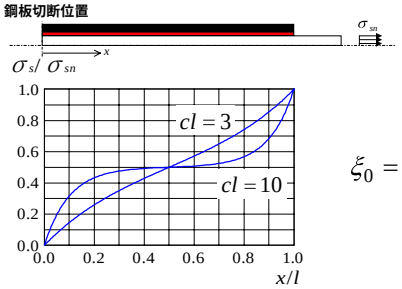
鋼板の応力

$$\sigma_s = \xi_0\left[\left\{\frac{1}{\tanh(cl)} + \frac{1-\xi_0}{\xi_0}\frac{1}{\sinh(cl)}\right\}\sinh(cx) - \cosh(cx) + 1\right]\sigma_{sn}$$

接着剤に生じるせん断応力

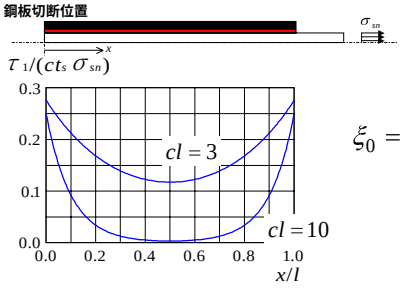
$$\tau_0 = \frac{ct_s\xi_0}{2}\left[\left\{\frac{1}{\tanh(cl)} + \frac{1-\xi_0}{\xi_0}\frac{1}{\sinh(cl)}\right\}\cosh(cx) - \sinh(cx)\right]\sigma_{sn}$$

鋼板応力



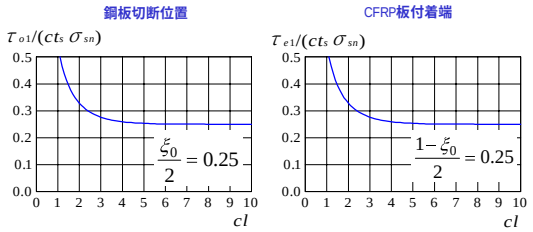
$\xi_0 = 0.5$

接着剤に生じるせん断応力



$\xi_0 = 0.5$

無次元パラメータがはく離せん断応力に与える影響



$\xi_0 = 0.5$

CFRP板接着板切鋼板におけるCFRP板のはく離を防止する条件

CFRP板付着端

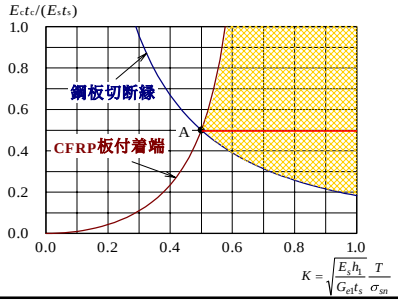
$$\tau_{0e} \le T_{0e} \Rightarrow \sqrt{\frac{1-\xi_0}{2}} \le K_{0e} \quad \left(K_{0e} = \sqrt{\frac{E_s h_1}{G_{e1} t_s}}\frac{T_{0e}}{\sigma_{sn}}\right)$$

鋼板切断位置

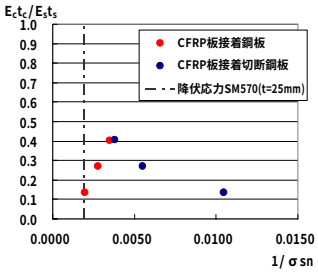
$$\tau_{0d} \le T_{0d} \Rightarrow \frac{\xi_0}{\sqrt{2(1-\xi_0)}} \le K_{0d} \quad \left(K_{0d} = \sqrt{\frac{E_s h_1}{G_{e1} t_s}}\frac{T_{0d}}{\sigma_{sn}}\right)$$

T：引張りせん断接着強さ

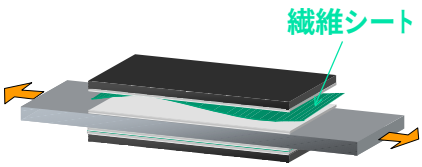
CFRP板の剛性とKの関係



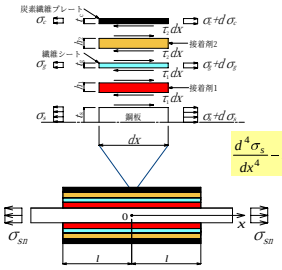
野阪らの研究結果



繊維シート挿入によるはく離せん断応力の低減



基礎微分方程式



$$\frac{d^4\sigma_s}{dx^4}-2(cr)^2\frac{d^2\sigma_s}{dx^2}+(cs)^4\sigma_s=\frac{\xi_0}{1+F}(cs)^4\sigma_{sn}$$

鋼板に生じる応力および接着剤に生じるせん断力

鋼板の応力

$$\sigma_s=\left\{A_1\cosh(\alpha cx)+A_3\cosh(\beta cx)+\frac{\xi_0}{1+F}\right\}\sigma_{sn}$$

繊維シートの下の接着剤1に生じるせん断応力

$$\tau_1=\frac{ct_s}{2}\left\{A_1\alpha\sinh(\alpha cx)+A_3\beta\sinh(\beta cx)\right\}\sigma_{sn}$$

繊維シートの上の接着剤2に生じるせん断応力

$$\tau_2=\frac{ct_s}{2\xi_0}\left\{\left(F+\xi_0-\frac{F}{1-\xi_0}\alpha^2\right)A_1\alpha\sinh(\alpha cx)+\left(F+\xi_0-\frac{F}{1-\xi_0}\beta^2\right)A_3\beta\sinh(\beta cx)\right\}\sigma_{sn}$$

$$A_1=\frac{-1}{(\alpha^2-\beta^2)\cosh(\alpha cl)}\left\{\left(1-\frac{\xi_0}{1+F}\right)\beta^2-1+\xi_0\right\}\qquad A_3=\frac{1}{(\alpha^2-\beta^2)\cosh(\beta cl)}\left\{\left(1-\frac{\xi_0}{1+F}\right)\alpha^2-1+\xi_0\right\}$$

無次元パラメータ

$$\xi_0=\frac{E_s t_s}{E_s t_s+2E_c t_c}=\frac{1}{1+2\frac{E_c t_c}{E_s t_s}}$$

$$cl=\sqrt{\frac{G_{e1}}{h_1}}\sqrt{\frac{2}{1-\xi_0}}\frac{l}{\sqrt{E_s t_s}}$$

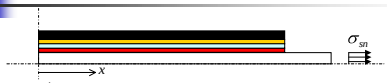
$$F=(1-\xi_0)\frac{E_g t_g}{E_c t_c}$$

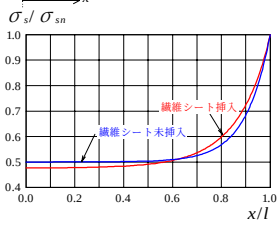
$$D=\frac{h_2}{h_1}\frac{G_{e1}}{G_{e2}}$$

CFRP板：t_c, E_c
接着剤2：h_2, G_{e2}
繊維シート：t_g, E_g
接着剤1：h_1, G_{e1}
鋼板：t_s, E_s

l ：炭素繊維プレートの付着半長さ

鋼板応力





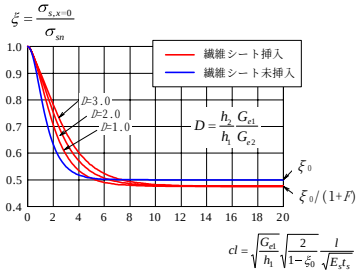
$\xi_0 = 0.5$

$cl = 10$

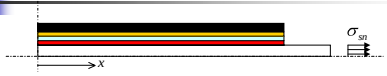
$F = 0.05$

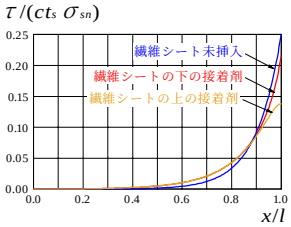
$D = 1$

無次元パラメータが鋼板応力に与える影響



接着剤に生じるせん断応力の分布





$\xi_0 = 0.5$

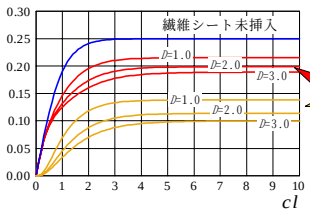
$cl = 10$

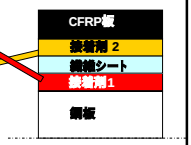
$F = 0.05$

$D = 1$

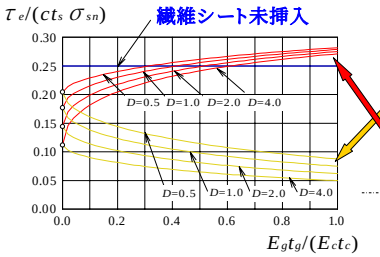
無次元パラメータがせん断応力に与える影響

$\tau_e/(ct_s\sigma_{sn})$ $\xi_0 = 0.5$ $F = 0.05$





ガラス繊維シートの剛性がはく離せん断応力に与える影響



接着剤1において，CFRP板のはく離を防止する条件

$$\tau_{1e} \le T_{1e} \Rightarrow \frac{1}{2\sqrt{(r^2+s^2)(1-\xi_0)}}\left\{\left(1-\frac{\xi_0}{1+F}\right)s^2+1-\xi_0\right\} \le K_{1e}$$

$$\left(K_{1e} = \sqrt{\frac{E_s h_1}{G_{e1} t_s}}\frac{T_{1e}}{\sigma_{sn}}\right)$$

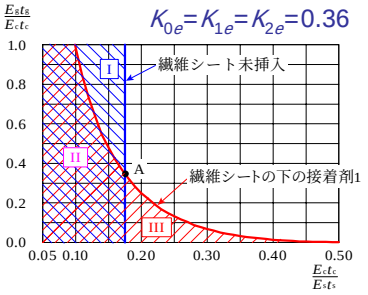
接着剤2において，CFRP板のはく離を防止する条件

$$\tau_{2e} \le T_{2e} \Rightarrow \frac{1}{2\xi_0\sqrt{(r^2+s^2)(1-\xi_0)}}\left\{\frac{F}{1-\xi_0}\left(1-\frac{\xi_0}{1+F}\right)s^4 + (F+\xi_0)\left(1-\frac{\xi_0}{1+F}\right)s^2 - F\left(2r^2+s^2\right) + (F+\xi_0)(1-\xi_0)\right\} \le K_{2e}$$

$$\left(K_{2e} = \sqrt{\frac{E_s h_1}{G_{e1} t_s}}\frac{T_{2e}}{\sigma_{sn}}\right)$$

CFRP板のはく離が防止されるCFRP板の剛性と繊維シートの剛性の関係

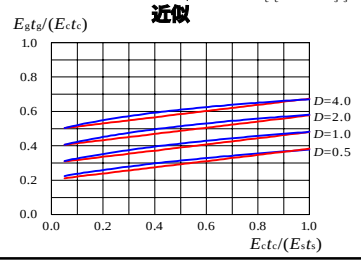
$K_{0e}=K_{1e}=K_{2e}=0.36$



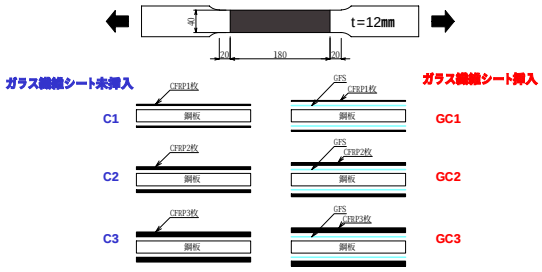
はく離せん断応力を低減させる挿入繊維シートの剛性

$$\frac{1}{\sqrt{2(r^2+s^2)}}\left\{\left(1-\frac{\xi_0}{1+F}\right)\frac{s^2}{1-\xi_0}+1\right\}=1 \Rightarrow \frac{E_g t_g}{E_c t_c} = 0.21\frac{E_c t_c}{E_s t_s} + 0.13\ln D + 0.3$$

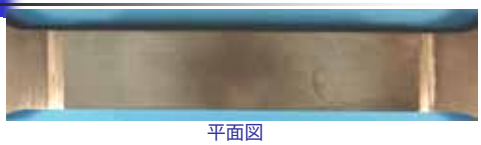
近似



CFRP板接着鋼板の引張試験



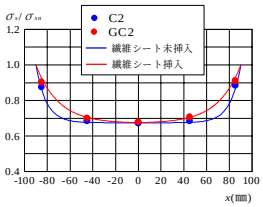
試験体の写真



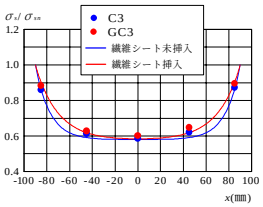
平面図

側面図

鋼板応力の分布（σ_{sn}=100MPa）

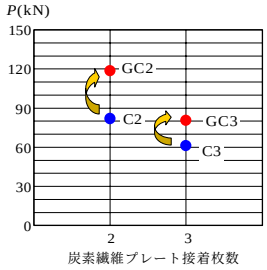


CFRP2枚



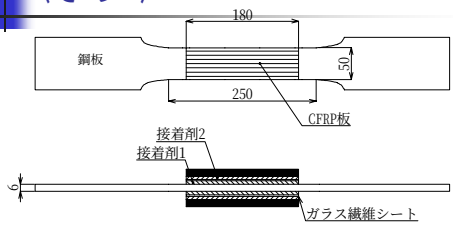
CFRP3枚

はく離荷重



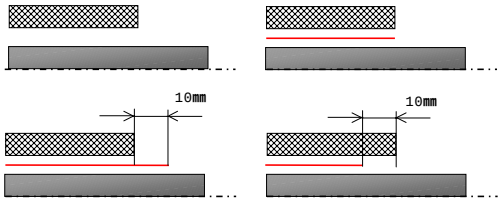
CFRP板のはく離

CFRP板接着鋼板の引張試験（その2）

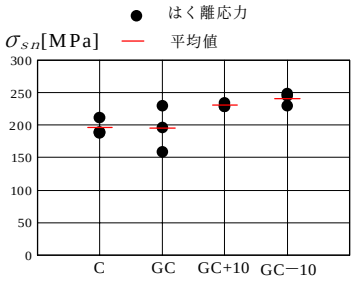


厚さ2mmのCFRP板を上下にそれぞれ3枚接着

試験片の種類



はく離荷重



CFRP板のはく離の防止の観点からのCFRP板接着工法の選定

1．CFRP板接着工法

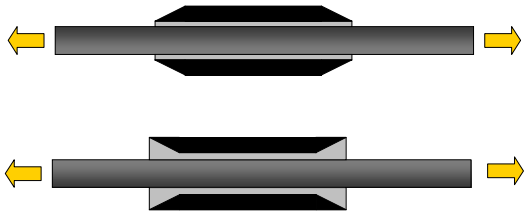
↓

2．はく離せん断応力を低減させる工法
（ガラス繊維挿入によるCFRP板接着工法）

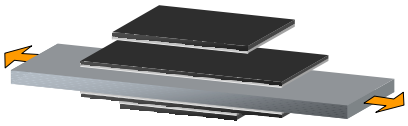
↓

3．CFRP板の端へ機械継手を用いる工法

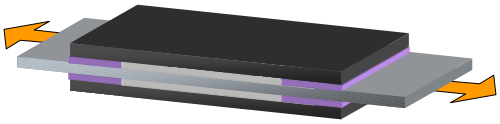
CFRP板端部にテーパーを設けるによるはく離せん断応力の低減



CFRP板端部ステップ接着工法によるはく離せん断応力の低減



CFRP板付着端近傍へ低弾性接着剤の利用によるはく離せん断応力の低減



温度変化を受けるCFRP板接着鋼板の力学挙動

引張を受けるCFRP板接着鋼板の基礎微分方程式

$$\frac{d^2\sigma_s}{dx^2} - c^2\sigma_s = -c^2\xi_0\sigma_{sn}$$

温度変化を受けるCFRP板接着鋼板の基礎微分方程式

$$\frac{d^2\sigma_s}{dx^2} - c^2\sigma_s = c^2(1-\xi_0)E_s\Delta\varepsilon_t$$

$$\Delta\varepsilon_t = \varepsilon_{st} - \varepsilon_{ct} = (\alpha_s - \alpha_c)\Delta T$$

鋼板に生じる応力接着剤に生じるせん断応力

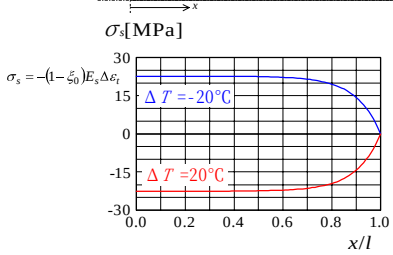
鋼板の応力

$$\sigma_s = (1-\xi_0)E_s\Delta\varepsilon_t\left\{\frac{\cosh(cx)}{\cosh(cl)} - 1\right\}$$

接着剤に生じるせん断応力

$$\tau_0 = \frac{1-\xi_0}{2}ct_sE_s\Delta\varepsilon_t\frac{\sinh(cx)}{\cosh(cl)}$$

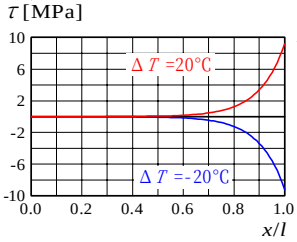
鋼板応力



$\xi_0 = 0.5$

$cl = 10$

接着剤に生じるせん断応力

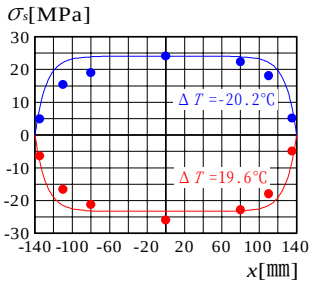


$$\tau_{0e} = \frac{1-\xi_0}{2} c t_s E_s \Delta\varepsilon_t$$

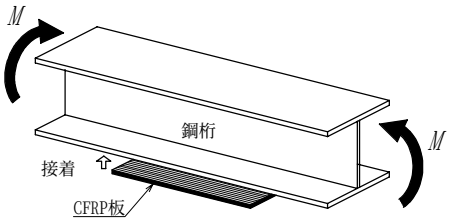
$$\xi_0 = 0.5$$

$$cl = 10$$

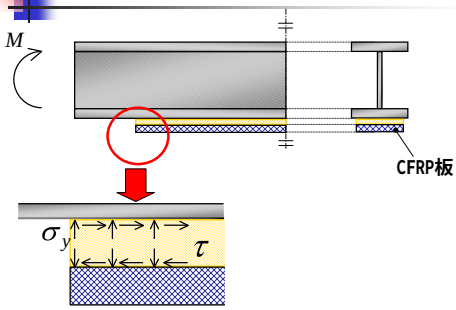
実験結果



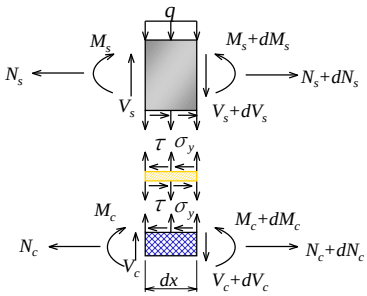
CFRP板接着による鋼桁の補強



CFRP板が接着された曲げを受ける鋼部材の接着剤に生じる応力



微小区間に生じる力とモーメントのつりあい



接着剤に生じるせん断力

$$\frac{d^2 N_c}{dx^2} - c^2 N_c = -HM + \frac{b_a G_a}{t_a} \Delta$$

$$N_c = A_1 \cosh(cx) + A_2 \sinh(cx) + \frac{H}{c^2} M_0$$

$$\tau = \frac{1}{b_a} \frac{dN_c}{dx}$$

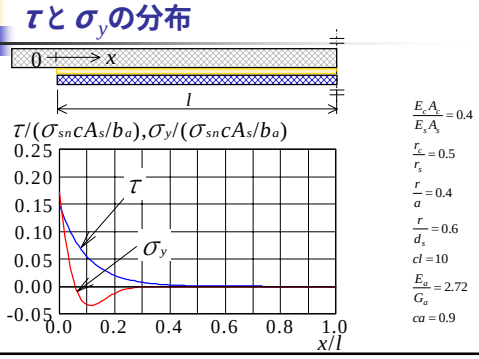
接着剤に生じる鉛直応力

$$\frac{d^4V_c}{dx^4}+4\beta^4V_c=J\frac{dN_c}{dx}+\frac{b_aE_a}{t_a}\frac{Q}{E_sI_s}$$

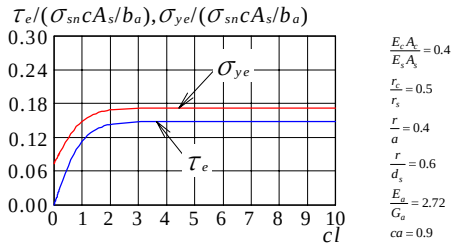
$$V_c=e^{-\beta x}\{A_3\cos(\beta x)+A_4\sin(\beta x)\}$$
$$+K\{A_1\sinh(cx)+A_2\cosh(cx)\}$$

$$\sigma_y=\frac{1}{b_a}\frac{dV_c}{dx}$$

τとσ_yの分布



τ_eおよびσ_{ye}とCFRP板の接着長さの関係



CFRP板のはく離の防止

$$\sigma_p=\frac{\sigma_{ye}}{2}+\sqrt{\left(\frac{\sigma_{ye}}{2}\right)^2+\tau_e^{\,2}}\le\sigma_c$$

おわり

ご清聴ありがとうございました.