

FRP外ケーブルによるブロックT桁の補強法に関する検討

保全施設部 保全技術課 田 坂 広
保全施設部 保全企画課 足 立 幸 郎
大阪管理部 保全第二課 山 名 宗 之

要 約

阪神高速道路は、供用開始以来30年以上が経ち、古い設計基準によって設計された構造物の補修・補強がますます重要視されてきている。特に桁構造物の補強は、狭隘部での施工になることが多く、このような施工を考慮した補強設計が要求されている。連続繊維補強材（FRP）は、周知の通り非腐食材であり、また非磁性体であることから、土木構造物への適用が図られつつある。また、連続繊維補強材はPC鋼材と比較した場合、軽量かつ高強度であるため、既設構造物の補強において施工性を向上させることができる材料として期待されている。本稿では、このような連続繊維補強材を、既設構造物の補修・補強に適用するにあたり、PCブロックT桁橋の外ケーブル方式による補修・補強に関する調査研究の成果と、特に連続繊維補強材の耐力特性値設定手法について報告するものである。

キーワード：FRP、静的引張耐力、曲げ上げ配置、クリーブ破断、リラクセーション

まえがき

阪神高速道路環状線には1960年代後半にプレキャストブロック工法で架設されたPCポステン単純T桁橋が26径間ある。これらの主桁はブロック間に設けた幅に10cmの遊間でシーすでつなぎ、無筋コンクリートを打ち込む構造になっているが、昭和63年度に行われたブロック目地部を中心とした損傷状況調査点検でブロック目地についてひび割れおよび大型車通行時の挙動が調査されており、一部にひび割れやその開閉が確認されている。また、この調査結果を受けて行われた損傷の大きい環S-174での静的載荷試験などにより、プレストレスが最大30%の減少、グラウト不良が発見されている。この損傷した橋梁の補強として、PC鋼材による外ケーブル方式による補強が考案され、順次補強を行っているところである。この橋梁の補強に当たっては、都市内高架構造物の補強であり、また桁下の狭隘部での劣悪な作業空間での施工であるため、PC鋼材の取り扱いなどに困難を極めた。

そこで、この橋梁の補強に対し、軽量でかつ非腐食材としての連続繊維補強材を用いる検討を行い、今後の新しい補強法として連続繊維補強材を検討することになった。（検討フローを図-1に示す）

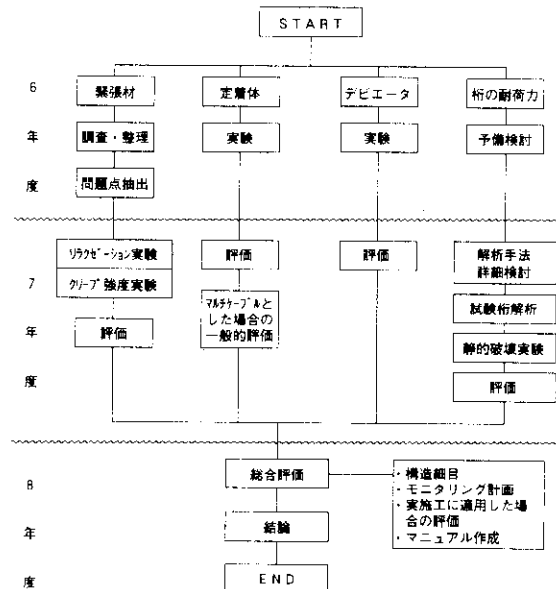


図-1 検討フロー

表-1 FRPケーブルを橋梁で適用した実績

| 施主 | 橋種 | 橋梁規模 | 適用部位 | 適用ケーブル(製品名) | 建設年 |
|------|--------|--------------------|------------|--------------|----------|
| 石川県 | 新宮橋 | L= 6. 1m, B= 7. 0m | プレテンション主桁 | 炭素系(CFCC) | 1988. 10 |
| 船戸市 | 歩道橋 | L= 8. 0m, B= 2. 5m | プレテンション主桁 | 炭素系(CFCC) | 1989. 3 |
| 石川県 | 自転車橋 | L=10. 5m, B= 4. 3m | プレテンション主桁 | 炭素系(CFCC) | 1991. 3 |
| ドイツ | 道路橋 | L=81. 1m, B=11. 0m | ポストテンション主桁 | 炭素系(CFCC) | 1991. 4 |
| JR総研 | リア実験橋 | L=15. 4m, B= 0. 8m | プレテンション主桁 | 炭素系(CFCC) | 1991. 6 |
| 石川県 | 自転車橋 | L= 7. 3m, B= 3. 5m | プレテンション主桁 | 炭素系(CFCC) | 1992. 2 |
| 石川県 | 自転車橋 | L=10. 5m, B= 3. 5m | プレテンション主桁 | 炭素系(CFCC) | 1992. 6 |
| JR総研 | リア実験橋 | L=12. 5m | プレテンション主桁 | アラミド系(テクノラ) | 1992. 11 |
| 栃木県 | 山中橋 | L= 9. 5m, B= 5. 4m | プレテンション主桁 | アラミド系(FIBRA) | 1993. 5 |
| カナダ | 道路橋 | L=42. 0m, B=22. 0m | ポストテンション主桁 | 炭素系(CFCC等) | 1993. 11 |
| 石川県 | 国道橋 | L=14. 0m, B=12. 0m | プレテンション主桁 | 炭素系(CFCC) | 1995. 5 |
| JH姫路 | 道路橋(上) | L=48. 3m, B=12. 7m | Po主桁横締 | アラミド系(テクノラ) | 1995. 5 |
| JH姫路 | 道路橋(下) | L=48. 3m, B=12. 7m | Po主桁横締 | アラミド系(テクノラ) | 1995. 5 |

1. FRP材を外ケーブル工法に用いる場合の検討項目

FRP (Fiber Reinforced Plastics) 材は、各種樹脂を母材として各種繊維で補強した複合材料である。緊張材としての研究は1950年代に米国、旧ソ連、英国などで行われたが、クリープ破壊が問題となり実用化には至らなかった。1970年代には英国でFRP成形技術としてプルルージョン (Pultrusion: 強度の均一性を得るために繊維の束を樹脂に含浸させた後、連続引抜成形する方法) 方式が開発され、この問題は大幅に改善された。実用化の幕開けは、独逸・メッセル市内における1980年代始めの支間6.5mの実験橋、1986年の支間46.9mの道路橋の建設に始まる。わが国では、1988年に石川県で橋長6.1m、幅員7mの新宮橋を始めとし、平成8年2月現在で74箇所に及ぶ。公共機関が施主である施工実績を表-1に示す。以下にFRPの利点を示す。

- ①高耐候性：鋼材で問題になるような、強度低下を伴う腐食が基本的でない。
- ②高強度：PC鋼棒と同等以上の高い引張強度を有している。
- ③軽量：PC鋼棒に比べ、極めて軽い。

- ④非磁性体：金属材料と違い、磁化しない。

この他、降伏点のない脆性材料であるという特徴も持っている。このような材料をこれまでのPC鋼材と同じように外ケーブル型式による補強に採用するには、これまでの施工実績も少なく不明点も多い。そのため連続繊維補強緊張材の緊張力を設定するうえで必要な諸物性値の把握のため、素材・素線の基礎性状に関する調査を行い抽出された問題点から、炭素系材料 (CFRP) およびアラミド系材料 (AFRP) の2種類の材料を用いて、以下の項目について実験・検討を行った。

- ①連続繊維補強材 (FRP) をマルチ緊張材として使用した場合の引張強度特性
- ②連続繊維マルチ緊張材に偏向装置を設けた場合の強度低下
- ③連続繊維マルチ緊張材のリラクゼーション・クリープ特性
- ④連続繊維マルチ緊張材で外ケーブル補強されたブロックT桁の耐荷力

本稿では以上の実験概要・結果より定めた設計用基準値や施工上留意点などをとりまとめたガイドラインについて、特に耐力特性値設定手法に着眼点をおき報告する。

2. FRP緊張材の耐力特性値設定手法

2-1 強度特性値の設定

FRP緊張材は完全弾性体であり、降伏域や塑性域を持たないため、破壊耐力の設定が構造物設計において重要な位置を占める。本検討では確率統計手法を用いて、静的引張耐力の設定を行うことを提唱した。単線状のFRP緊張材の静的引張耐力のばらつきは、100以上の供試体の確認実験により正規分布に従うことが確認されている¹⁾。またモンテカルロ法により連続繊維マルチ緊張材の静的引張耐力を数値実験的に算出した結果、そのばらつきもおおむね正規分布に従うことが確認された²⁾。そこで、FRP緊張材の静的引張耐力の特性値は、引張試験において母材部破断を生じた試験片の引張試験値に基づいて①式にて算出することとした。

$$f_{km} = f_{m95\%} - \beta \cdot \sigma \quad \text{①}$$

$$f_{m95\%} = f_m - (t_{n-1} \cdot N^{-1/2} \cdot \sigma) \quad \text{②}$$

f_{km} : 静的引張耐力の特性値

$f_{m95\%}$: 静的引張試験の平均耐力の95%下限信頼限界値

β : 安全性指数 = 3

σ : 静的引張試験の標準偏差

f_m : 静的引張試験の平均値

t_{n-1} : 信頼度95%における自由度(N-1)のt分布の確率変数値

N : 試験片数

①式概念図を図-2に示す。一般的には静的引張試験の平均値に対するばらつきを考慮するが、ここでは母平均に対する試験結果の平均値の誤差を安全側に評価することを目的として、平均耐力の95%下限信頼値を採用した。この手法の安全性を検討するため、モンテカルロ法による数値実験により本方法で有限の試験片値より算出した静的引張耐力の特性値が、試験片数を無限大として算出した特性値より大きくなる危険確率を検討した。この結果、危険確率は、通常の3σ法では55%程度であるのに対し、本手法では30%となり、大幅に危険確率を減少させることが確認されている(図-3参照)。

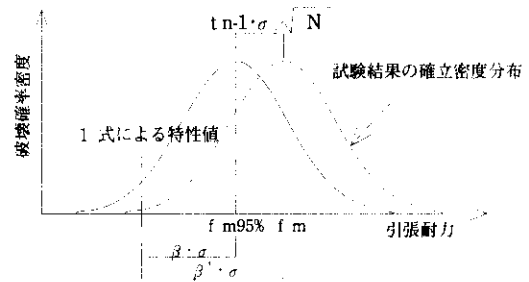


図-2 引張耐力算出方法の概念図

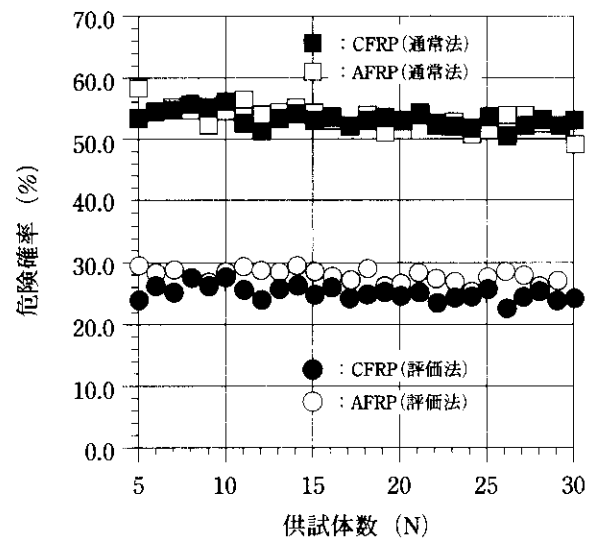


図-3 危険確率の比較

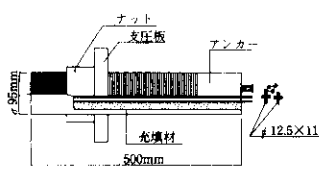
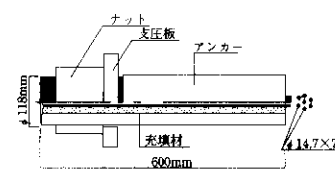
表-2 静的引張耐力の特性値

| | CFRP | AFRP |
|-------------|-------|-------|
| N | 5 | 5 |
| f_m | 172.6 | 169.5 |
| σ | 6.580 | 7.071 |
| $f_{m95\%}$ | 166.3 | 162.8 |
| f_{km} | 146.6 | 141.6 |
| f_{ks} | 148.5 | 153.9 |

f_{ks} : モンテカルロ法による引張耐力特性値

さらに本設定手法により、供試体数が5体の場合のCFRPおよびAFRPの引張耐力の特性値を算出した結果を、表-2に示す。本ケーブルは130tfの設計耐力を持つことを要求されて製作したケーブルであるが、いずれも目標値に対する安全性が確

表-3 連続繊維緊張材およびマルチ定着システムの諸元

| 項目 | CFRP | AFRP |
|-----------|---|--|
| 概略形状 |  |  |
| 繊維材 | PAN系 | バラ系 |
| 繊維結合材 | 変形エポキシ樹脂 | ビスフェノール型エポキシ樹脂 |
| 形状 | より線状 | 組み紐状 |
| 繊維材直径(mm) | φ12.5mm | φ14.7mm |
| 緊張材構成 | φ12.5mm×11本 | φ14.7mm×7本 |
| 鋼材部材質 | SUS329J3L | SUS304N2 |
| 緊張材定着方法 | 付着型 | 付着型 |
| 充填材 | エポキシ系樹脂 | セメント系接着用膨張剤 |
| 緊張材試験部長 | 2000mm | 3000mm |

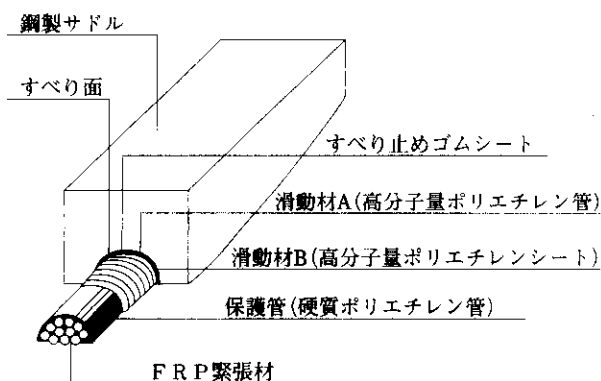


図-4 本稿で提案する偏向装置図

表-4 曲げ上げによる静的耐力実験値および低減係数

| | CFRP1 | AFRP1 |
|---------|--------|--------|
| 直線配置時 | 7.3tf | 7.0tf |
| 曲線配置時 | 1.59tf | 1.54tf |
| 低減係数(β) | 0.92 | 0.91 |
| 疲労試験後耐力 | 1.60tf | 1.60tf |

保されていることが確認できる。

2-2 曲線配置に伴う引張耐力の低減係数(β)

FRP緊張材は、偏向装置により曲線配置された場合、マルチ構成する単線状のFRP緊張材の長さや偏向部での摩擦差による張力のばらつきが生じ、その静的引張耐力が減少することが知られている。さらにこの張力にはばらつきが生じ、その静的引張耐力の減少度は、FRP緊張材の構成、偏向装置の構造、および幾何形状によっても変化する。また、外ケーブル形式による補強を行う場合、偏向部分においてケーブルが自由に挙動できることも、偏向装置自体を設計する際に重要である。

本検討では、滑り摩擦を極力低減させた偏向装置を採用することを規定し、さらに実大の偏向装置および偏向角度によって曲げ上げられたFRP緊張材に対して規定した手法に従った静的引張試験、および疲労試験を実施することによって、曲線配置における低減係数を決定するよう規定している。曲げ上げによる低減係数の定義は③式のとおりとなる。

$$\beta = f_{bm} / f_m \quad \text{③}$$

ここに β：曲げ上げによる静的引張耐力低減係数

f_{bm} : 曲げ上げ状態の静的引張試験の
平均値

f_m : 静的引張試験の平均値

なお、本検討では、図-4に示されるような鋼板型枠付RC構造の偏向部材に、ポリエチレン製のシートなどによって滑り面の摩擦を極力低減させた偏向装置を提案している。なお、この偏向装置を用い、130tfの保証荷重を有する連続繊維マルチ緊張材（表-3参照）を曲げ上げ配置して静的引張試験を行い、直線配置時の実験結果と比較することにより、曲げ上げによる引張強度特性への影響についての検討を行った³⁾。この結果、曲げ上げによる低減係数は表-4のように推定された。写真-1は試験による緊張材の破断状況の一例を示したものである。

この検討の主な結論を以下に示す。

- ①強度低下は仮定したように10%未満であった。
- ②モンテカルロ法によるシミュレーション解析の結果、曲げ上げ角度の増加とともに各緊張材の破壊荷重は小さくなる。



写真-1 緊張材破断状況

③本検討で試算した保証荷重はそれぞれ130tfを上回っており、各緊張材とも保証荷重に対しては安全であると思われる。

また、疲労試験結果によれば、疲労による耐力の低減は見られなかった（曲線配置時と比較）。なお、この疲労試験は以下の表-5に示す载荷条件で行

表-5 疲労試験の载荷条件

| 項目 | 载荷条件 |
|--------|---|
| 下限载荷荷重 | 引張耐力の規格値の60% |
| 荷重振幅 | 応力変動 $10\text{kgf}/\text{mm}^2$ に相当する荷重 |
| 等価繰返回数 | 300万回(設計耐用年数50年) |

われたものであり、阪神高速道路の交通量調査結果などに基づいて定めた、道路橋について最も過酷な状況を再現して行われている。

2-3 クリープ破壊耐力を考慮して設定される静的引張耐力低減係数(C)

クリープ破断という現象は、静的引張耐力以下の荷重が持続して作用した場合に、時間の経過とともに破断する現象を指し、その場合の持続荷重を破断耐力と呼んでいる。しかしながら、FRP緊張材のクリープ破断については現在のところ必ずしも解明されているとはいえず、時間が経過しても破断しない限界荷重であるクリープ限の存在の有無についても明らかにされていないのが現状である。

クリープ破断については、持続荷重の履歴に依存していることから、時間を考慮しない静的強度とは本質的に性格の異なるものである。しかし、これは、FRP緊張材の張力の設定する上で重要な要因の一つになると考えられることから、本検討では④式に示すように静的引張耐力を低減する係数を設定することで、静的問題と同一レベルにおいて対処することにした。

$$C = f_{cm}(t) / f_m \quad \text{④}$$

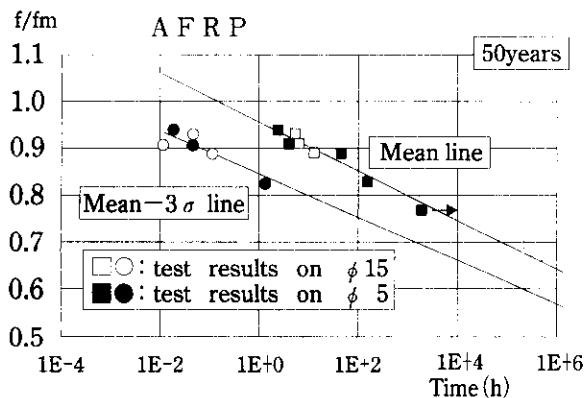
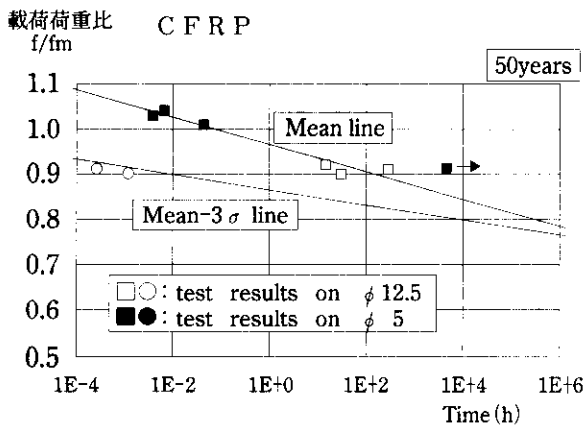
ここに C : クリープ破断耐力を考慮して設定される静的引張耐力低減係数

$f_{cm}(t)$: クリープ破壊耐力試験の対象構造物年限 t 時の平均推定値

f_m : 静的引張試験の平均値

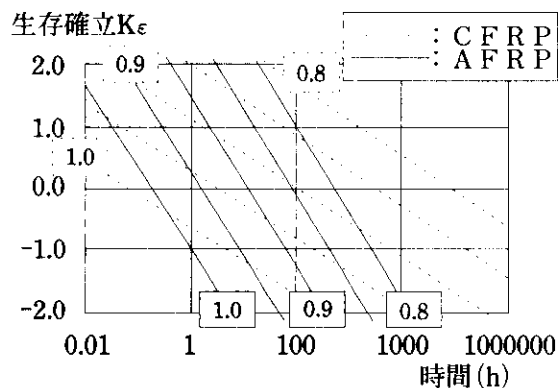
なお、ここでは平均値で議論を行い、ばらつきは考慮されていない。これは、静的引張耐力のばらつきと、構造物の設計年限におけるクリープ破断耐力のばらつきの両者の分布がほぼ同じと仮定しているためである。

ここに、持続荷重の大きさをパラメータとした、



□ ■ : (m), ○ ● : (m-3σ)

図-5 クリープ破断耐力実験の実験値と推定されるクリープ破断耐力直線



(図中の数字 0.8~1.0 は 載荷荷重比)

図-6 生存確率とクリープ破断時間との関係

CFRPおよびAFRPに対するクリープ破断実験を図-5, 6に示すが⁴⁾, これによれば

- ①クリープ破断時間の対数と持続荷重とはほぼ線形関係にある。
- ②クリープ破断時間の対数と生存確率はほぼ線形関係にある。
- ③生存確率の時間変化率は、緊張材の径によらずほぼ一定である。

などが判明している。それらをもとにして求めた、設計年限を50年とした場合に対応するクリープ破断耐力を考慮した静的引張耐力の低減係数を表-6に示す。ただし、本実験は持続荷重が比較的高く

表-6 設計年限を50年とした場合におけるクリープ破断耐力低減係数

| | クリープ破断耐力低減係数 (C) |
|------|------------------|
| CFRP | 0.79 |
| AFRP | 0.66 |

破断までの時間がおよそ24時間以内と短い実験結果をもとにして推定しており、設計年限における低減係数を推定する場合、大きな誤差を伴うものとなるため、さらに持続荷重を低く設定して長期の実験を現在行っているところである。

2-4 リラクセーション

リラクセーションという現象は、一定温度下において所定の緊張力を与え、そのひずみを一定に保った場合、緊張力が時間とともに低下する現象を指す。FRP緊張材の場合、PC鋼材と異なり繊維の材質によってその程度が大きく異なる。したがって、正確なリラクセーション率の把握が設計上重要な鍵を握る。

本検討では、構造物設計の基本となる温度20℃におけるリラクセーション試験を義務づけるものとし、1000時間の試験時間を経たその結果を基に、リラクセーション率の設定を行うこととした。

本検討で実施したCFRPおよびAFRPに関する実験結果を図-7に示す。この実験は、試験時間は既往の実験の載荷時間が1000時間を上限としているのに対し3000時間以上の載荷時間を確保し、初期荷

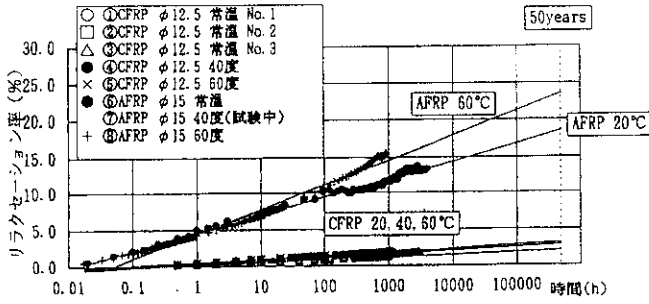


図-7 リラクゼーション実験の実験値と推定されるリラクゼーション直線

重は静的平均引張耐力の70%を与え、温度依存性20℃、40℃、60℃の3レベルについて実験を行っている。図-7より、

- ①FRP緊張材のリラクゼーション率と載荷時間の対数とは比例関係にある。
- ②実使用範囲内における温度依存性は少ない。
- ③1000時間までの試験値によって推定されるリラクゼーション-時間の関係と、3000時間までの試験によって推定されるそれはほぼ同一の結果である。

という結果を得た。

なお、設計年限を50年とした場合のリラクゼーション率は、表-7のように得られた。

表-7 設計年限を50年とした場合におけるリラクゼーション率

| | CFRP | AFRP |
|-----------|------|------|
| リラクゼーション率 | 3% | 18% |

3. 構造解析手法

一般的に外ケーブル法で橋梁を補強・補修する場合、特に終局荷重作用時における照査時において、断面の平面保持の仮定ができないため、部材断面の破壊抵抗曲げモーメントの算定に当たっては、その増加張力の算定が重要な問題となる。特に、FRP緊張材の場合、降伏点を持たない脆性材料であり、PC鋼材と比較した場合の伸び能力が小さいため、終局荷重時における外ケーブルに発生する増加張力の正確な把握が必要となる。

本検討では、設計での汎用性を考慮し、フレームでモデル化を行い、材料および幾何学的非線形

条件を扱える解析を用いて曲げ耐力の算定を行うことを規定した。

FRP緊張材を外ケーブルに用いたポストテンション単純T桁の曲げ破壊実験(図-9)を実施し、実験結果⁷⁾の評価を本解析手法に従って行った結果を図-8に示す。実験値と解析値がよく一致していることが読みとれる。また、この実験結果より外ケーブルとしてPCブロック桁に連続繊維緊張材を用いた場合でもPC鋼材を用いた場合と同等の補強効果が得られることがわかった。

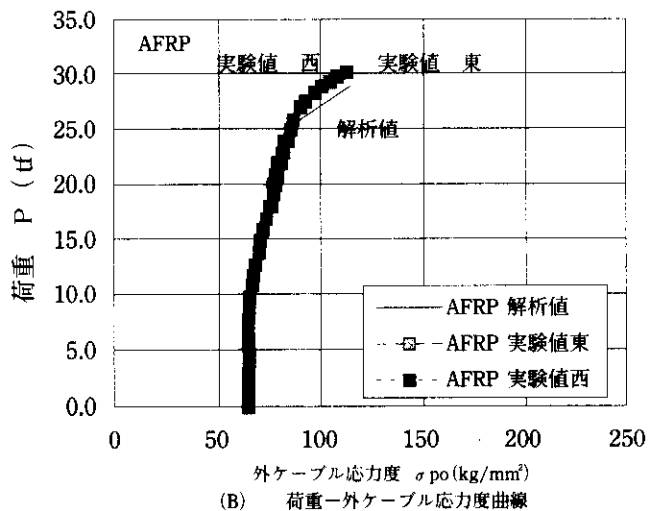
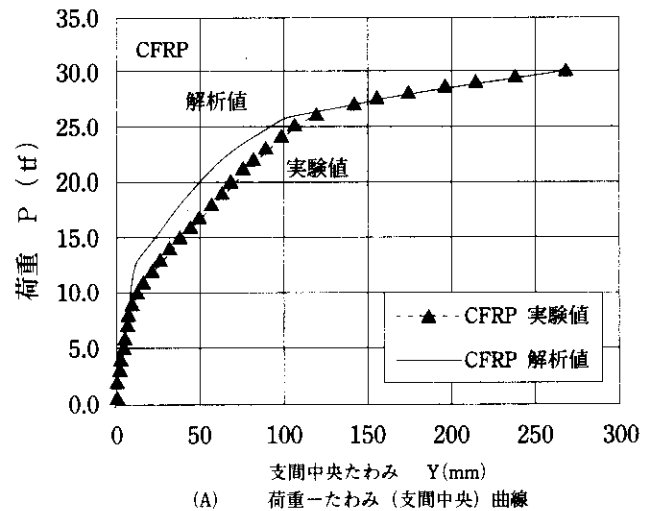


図-8 非線形フレーム解析結果と実験値の整合性

4. まとめ・今後の展望

FRP緊張材においては各線材の種類、マトリクス材などによってその性質が異なってくるため、一般的な設計用値を基準とし、その手法を示した。

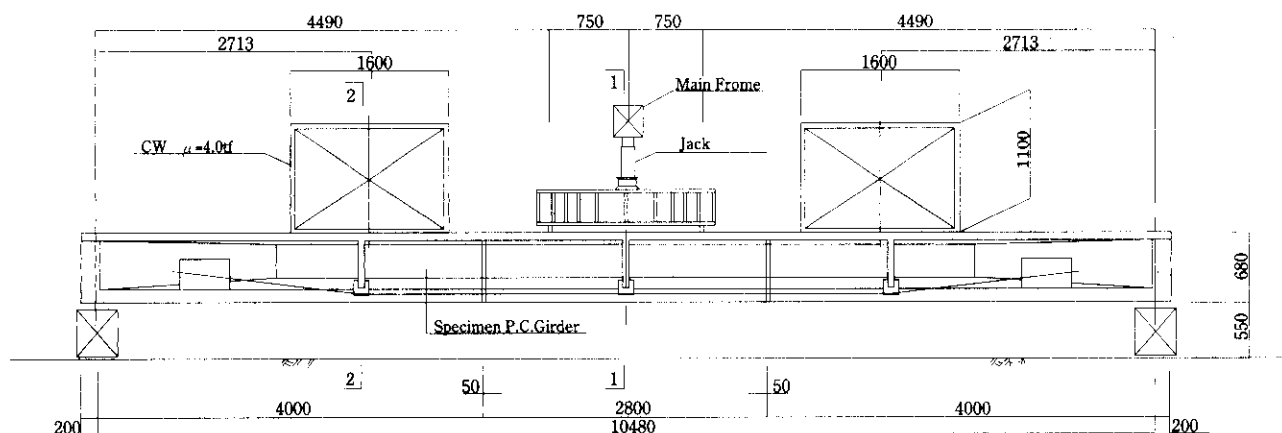


図-9 PC単純T桁の曲げ破壊実験

3. で設定した各値については、現在も議論を重ねているところである。また、FRP緊張材の長さの違いが引張耐力に与える影響についても考慮し、長さ効果に関する実験について行っていく予定である。

この他、今回のようなFRP緊張材を外ケーブル方式に採用した補強・補修は初の試みであるため、施工後の緊張材張力のモニタリングを行うことを考えているが、これを含めた維持管理面についてはまだ検討中の項目が多く、その詳細については本稿では省略する。

以上の懸案事項の検討結果を反映させ、今後、予定している実施工に向けて「連続繊維緊張材を外ケーブルに用いたPCブロック桁補修・補強ガイドライン」の暫定案を制定していく予定である。

あとがき

今回の検討の結果から制定されるガイドラインは公団の内外を問わず広く適用できることを念頭に作成するものであり、このガイドラインをもとに今後のPCブロック桁の補修・補強として役立てれば幸いである。

また、このガイドラインを用いた実橋の補修・補強の施工報告についても、機会があれば報告したいと考えている。

最後に、今回の検討は、平成6年度より発足した阪神高速道路公団PC構造物耐久性委員会（通称：U-NEX、委員長：京都大学宮川豊章助教授）

で行われた3年に及ぶ検討の成果であり、同委員会の委員ならびに関係各位に深く感謝の意を表す次第である。

参考文献

- 1) 酒井, 足立, 真嶋, 宮川: 連続繊維緊張材を用いた大容量マルチ定着システムの引張強度特性に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文報告集, 日本コンクリート工学協会, Vol.18, No.1, 1996.
- 2) 濱田, 袴田, 井上, 宮川: 連続繊維緊張材を用いた大容量マルチ定着システムの引張強度に関する確立論的考察, コンクリート工学年次論文報告集, 日本コンクリート工学協会, Vol.18, No.1, 1996.
- 3) 中田, 山名, 服部, 真嶋: 偏向部を有する連続繊維マルチ緊張材の引張強度特性に関する実験的特性, コンクリート工学年次論文報告集, 日本コンクリート工学協会, Vol.18, No.1, 1996.
- 4) 安藤, 松川, 中田, 鈴木: 連続繊維緊張材の長期特性に関する研究, 第6回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, 1996.
- 5) 真鍋, 足立, 真嶋, 宮川: 外ケーブルに連続繊維緊張材を用いたPC桁の静的破壊実験, 第6回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, 1996.