

ストラット&タイ手法の概要

市橋 俊夫*1

1. はじめに

1993年以來約11年間FIP（国際プレストレストコンクリート連盟）ならびにfib（国際コンクリート学会）のワーキングメンバーの一員として活動を行ってきた。このたび、業務の都合上、後任者へ引き継ぐにあたり、筆者が所属していたfib Task Group 1.1 (TG1.1) が取り組んできた“Strut and Tie Model”を用いた設計手法について、概要を紹介させていただくこととした。

TG1.1では、FIPがfibに移行した時期に合わせて、“Practical design of structural concrete”と題する手引書（以下Recommendation）を発行している（September 1999）。これは“Strut and Tie”手法を用いた設計に関するガイドライン的な存在であり、Stuttgart大学のReineck教授を中心にそれまでの研究をまとめ上げたものである。その後、2002年には前記Recommendationに従った設計例集を出版し、さらに近々設計例の第2集を発行する予定である。

“Strut and Tie”手法は理論的には単純であり、応用範囲のきわめて広い設計手法である。反面、奥が深く、モデル化ならびに計算結果への考察においては高度な技術的洞察力と判断力が求められる。簡単な単純梁から、複雑な形状をした構造物の塑性域までをカバーする手法であり、モデル化如何によって答が無数に存在することも特徴である。この意味において、日本国内で伝統的に支配している一元的な設計手法とは性質を異にする面があり、設計者の資質向上と責任の明確化が同手法の国内への浸透のための必要条件となることを前段として明記しておきたい。

2. Strut and Tie 手法の概論

2.1 Strut and Tie 手法

Strut and Tie 手法とは、

Strut : 圧縮部材 主にコンクリート

Tie : 引張り部材 主に鉄筋, PC鋼材

Node : StrutおよびTieの接合点

の3種類の部材から構成されるトラスモデルを用いた設計手法のことである。本手法は適用部位別に、B-RegionとD-Regionの2種類に大別される。

2.2 B-Region

Bernoulli-Hypothesis（断面内のひずみ分布が線形であること）が成立する範囲に適用する。理論化が比較的容易なため、日本でも古くから梁のせん断力に対する検討に用い

られているトラス理論がこれに相当する。かなり研究が成熟しており、多くの示方書および規準（以下Code）において細部までモデル化手法または算定式が規定されているため、設計者の裁量を比較的排除しやすい部位といえる。

日本と海外の主要Codeとの主な相違点は、Strut（梁の場合は仮想斜め圧縮部材）の傾斜角の取り方にある。プレストレス等による部材軸方向の圧縮力が大きい場合には、傾斜角は水平に近づくことになり、この影響を考慮する方法がRecommendationの6.4.3に詳しく述べられている。ちなみに欧州のCodeでは古くから傾斜角の算定手法が用いられており、実績の豊富な考え方である。

前述したようにB-Regionはモデル化および計算結果に悩まされる面は少ない。ただし、Nodeの応力集中に対する検討に注意を要する。とくに大きな応力集中が起こる支承直上や集中荷重作用点などでは、別途配筋を施す等の措置が必要となることはいうまでもない。B-Regionの一種でも、座屈の可能性のある部材については、取り扱いが異なる。国内の土木構造物ではコンクリート柱の座屈が問題となることはまれであるが、建築の柱や、斜張橋や吊橋の主塔等で検討を要する場合には、Recommendationの6.6を参照されたい。長柱を、折れ角を有する柱としてモデル化する手法を採用している。また、柱の剛性を便宜上低減する手法についても詳しく記述してあり、興味深い。

2.3 D-Region

Discontinuity Regionとは、平面保持の仮定が成立しない部位のことで、コーベル、ディープビーム、柱と梁の接合部、PC鋼材定着部、マスなコンクリートたとえば橋台等が相当する。

D-Regionではモデル化手法を一義的に規定することが困難なため、設計者の洞察力と判断力がきわめて重要な位置を占めることになる。このため、部位によっては弾性FEM解析結果を基にモデル化を決定する場合も多く、終局限界状態でのひび割れ発生を前提とした配筋決定のためにも有効な手段として位置付けられている。

1) モデル化の原則

Recommendationには、柱と梁の接合部、コーベル、桁掛け違い部、ディープビーム（2点単純支持または多点支持での一様分布荷重作用時）、PC鋼材定着部、支承近傍等、これまでに研究された構造について、モデル化の方法と注意点が紹介されている。

上記を含めて、モデル化の際には次の点に注意を要する。

* Toshio ICHIHASHI : 大成建設(株)タイ・リングロード作業所

- ① 構造物全体系の力のバランスを考慮に入れること。これはいわば FEM 解析を行う時の境界条件の設定と同じ位置付けといえる。
- ② Tie 部材のモデル化は、実際の配筋または PC 配置と合致すること。また、鉄筋を有効にするための定着長やフックの配置が可能なこと。
- ③ Strut の傾斜角は、終局状態における実際のひび割れ方向と大きな相違がないこと（逆に、配筋量や PC 量により、モデルと同様の方向にひび割れを発生させる工夫も可能）。
- ④ Node の応力集中に部材が耐えられること。

2) モデル化の違いによる結果の相違と考察

ここで、モデル化の違いによる結果の相違と、これに対する考察について例を挙げてみたい。〈2 点支持ディープビーム中央に集中荷重が作用する場合、モデル 1 とモデル 2 では以下の特色が現れる。〉

図 - 1 に示すように、2 点支持のディープビームの中央に集中荷重が作用する場合、モデル 1 とモデル 2 では以下の特色が現れる。

a) モデル 1

- ・単純明快
- ・下端の引張り部材 1（鉄筋または PC 鋼材）の量を決定するには有用なモデルである。

b) モデル 2

- ・やや面倒
- ・下端 Tie の引張力を中央部（部材 2）と両端部（部材 3）に分けることが可能なため、鉄筋量を節約できる。
- ・部材 4 により、スターラップ量を算定できる。

当然のことではあるが、 $P / \tan \theta = P / (2 \tan \phi)$ であり、

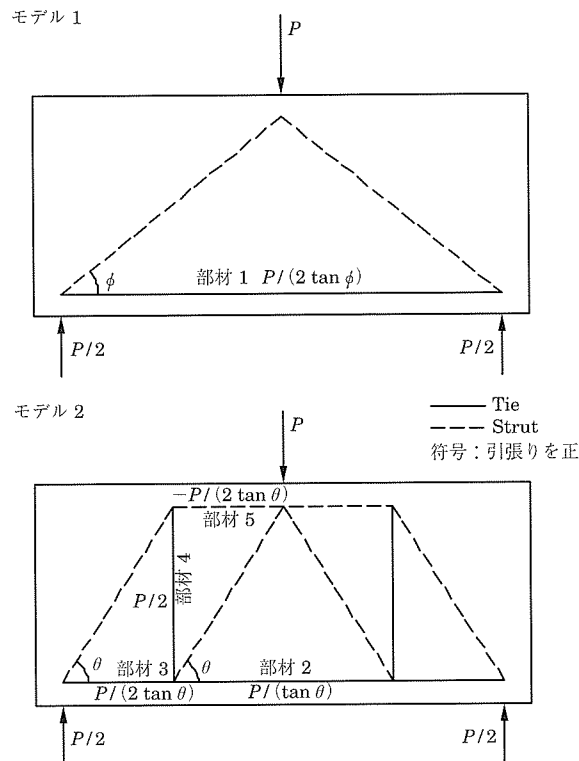


図 - 1 モデル化の違いによる結果の比較

部材 1 と部材 2 は同一の引張力となる。

上記 2 つのモデルの比較から、次のことがいえる。

- ① モデル 1 は下端水平鉄筋または PC 鋼材量の安全サイドの決定にのみ採用可能。
- ② モデル 2 は、 θ の角度を前提条件としているため、これを実現するための十分な量のスターラップの配置と、妥当な角度であるか否かの技術者としての判断が重要となる。
- ③ モデル 2 によれば、部材 3 の配筋量を節約可能ではあるが、梁端部での定着長またはフック形状等の検討が十分に行われることが重要となる。

このように、モデルの選択次第で計算結果の取り扱い方を変える必要があることから、逆に、目的に合ったモデルの選択が重要となる。なお、飛躍した考え方ではあるが、鉄筋端部の定着や、じん性の確保などの点に留意すれば、モデル 1 を用いて、計算上スターラップを不要とすることも可能である。

3) モデル化手法の紹介

図 - 2 ~ 図 - 4 に、Recommendation に紹介されている解析モデルの中から、連続ディープビーム、柱と梁の接合部、床版内 PC 鋼材定着部の 3 例を紹介する。

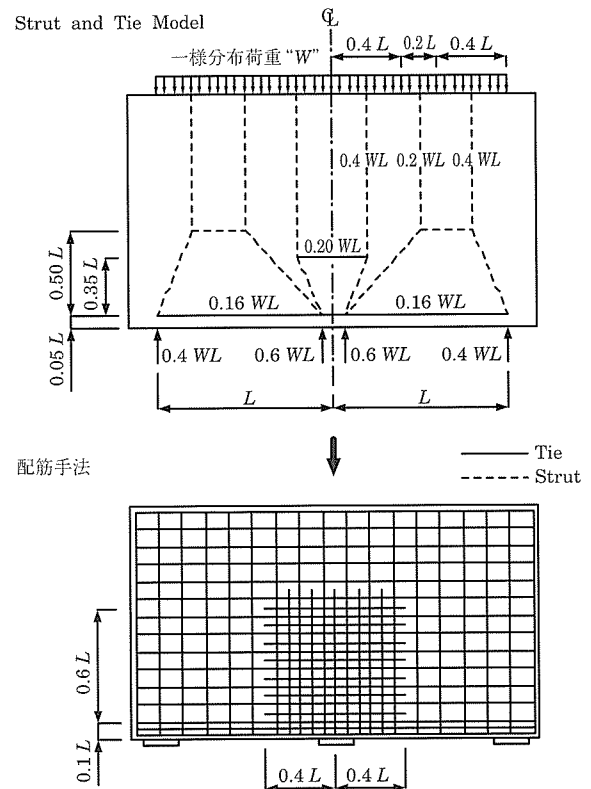


図 - 2 2 径間連続ディープビームに一様分布荷重荷

図 - 3 の柱と梁の接合部については、 h_1 と h_2 が大きく異なる場合や、より洗練されたモデルも Recommendation に掲載されているので、参照されたい。

図 - 4 については、PC 定着部背面で $P/4$ を受けもつ前提になっており、定着位置付近に床版を拘束する部材（た

たとえば剛性の大きい橋脚)がある場合などには、前提条件が成立しないことに注意を要する。

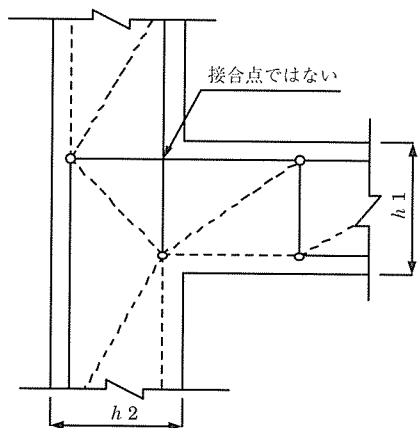


図-3 柱と梁の接合部 ($h1 \cong h2$ の場合)

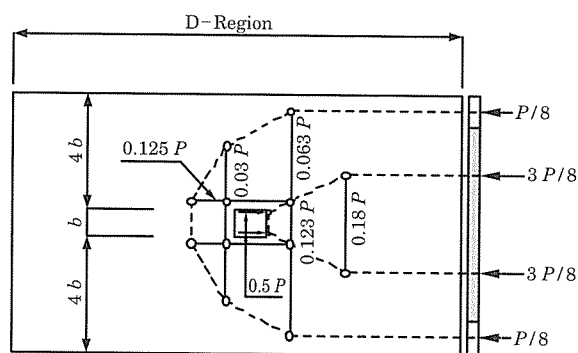


図-4 床版内 PC デッドアンカー部

2.4 Node

Node とは Strut および Tie の接合点のことであり、Strut のみ 3 部材以上が接合される場合と、Strut と Tie の混成接合の場合とがあり得る。

Node の設計においては、以下の点に注意を要する。

- ① Tie 部材を構成する鉄筋または PC 鋼材が確実に定着される構造であること。
- ② Strut の圧縮応力に問題ないこと。
- ③ モデルとは異なる方向 (2次元モデルの場合であれば、紙面直角方向) の性状に問題がないこと。
- ④ ②については Recommendation の中で Strut の断面をいかに想定するかが図解法で示されている。詳しい手法については割愛するが、たとえばラーメン隅角部等では鉄筋の曲げ半径により Strut の仮想断面幅を変化させており、配筋細目と Node の性状を密接に関連させていることが解る。

実際の構造物において、鉄筋の定着手法や支承部の補強方法が構造特性に如何に影響するかを、的確にモデル化することが重要となる。

3. 設計例

以下に、設計計算例として、コンクリートボックス桁内

に設けられた外ケーブル PC 鋼材突起定着部について紹介する。ここでは、終局限界状態に関する計算のみ紹介するが、実際の設計においては使用限界状態 (主にひび割れ幅の検討) ならびに Node の検討も必要になる。

3.1 基本構造

多径間連続箱桁のスパン内に、図-5 に示す定着突起が

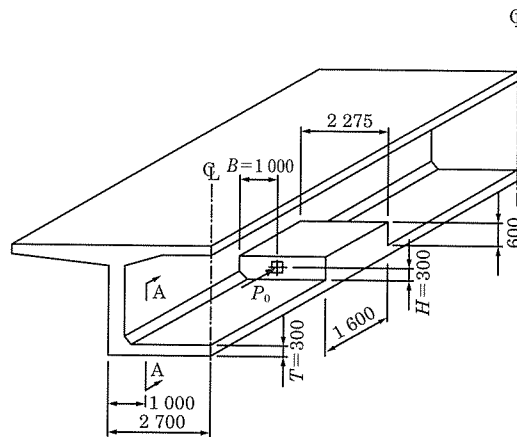


図-5 設計例モデル

存在する場合を想定する。

材料特性

(1) コンクリート強度

圧縮強度: $f_{ck} = 40 \text{ MPa}$

引張強度: $f_{ctm} = 3.51 \text{ MPa}$

(2) 鉄筋

引張強度: $f_{yk} = 345 \text{ MPa}$

設計降伏強度: $f_{yd} = 300 \text{ MPa}$ (終局限界状態検討時)

弾性係数: $E_s = 200,000 \text{ GPa}$

(3) PC 鋼材

12 S15.2 mm B種

破断強度: $f_{ptk} = 1882 \text{ MPa}$

断面積: $A_p = 138.7 \text{ mm}^2/\text{strand}$

3.2 解析モデルと終局限界状態での計算結果

終局限界状態として PC 鋼材の破断強度に対して設計する。

$$P_0 = 12 A_p f_{ptk} = 12 \times 138.7 \text{ mm}^2 \times 1.882 \text{ kN/mm}^2 = 3132 \text{ kN}$$

P_0 は床版定着突起を介して、下床版とウェブで支持される。2次元モデルを採用する目的から、ここでは便宜上以下のように床版とウェブの分担割合を算定する (床版とウェブの剛性が異なる場合には、この仮定は成立しないことに注意)。

A-A 断面をモデル化する場合

$$P = P_0 \cdot B / (B + H) = 3132 \times 1000 / (1000 + 300) = 2409 \text{ kN}$$

P の 25% を背面で支持し、残り 75% を前面で支持するものとする。

・水平力のつり合い条件

$$0.25 P + C_r + T_r = 0 \quad (1)$$

$$0.75 P + Cf + Tf = 0 \quad (2)$$

・点 R 回りの回転モーメントのつり合い

$$0.25 P \cdot hp + Tr \cdot ht = 0 \quad (3)$$

・点 F 回りの回転モーメントのつり合い

$$0.75 P \cdot hp + Cf \cdot ht = 0 \quad (4)$$

(C_r , T_r , C_f , T_f , 点 R, 点 F, hp , ht : 図 - 6 参照)

上記(1)と(3)より,

$$T_r = -1\,712 \text{ kN (引張)},$$

$$C_r = 1\,109 \text{ kN (圧縮)}$$

(2)と(4)より,

$$T_f = -3\,328 \text{ kN},$$

$$C_f = 5\,134 \text{ kN}$$

図 - 6 における θ_1 と θ_2 は, $\tan \theta = 2/3$ と仮定した。

図 - 7 に, 3 次元弾性 FEM 解析結果を合わせて掲載する。

3.3 鉄筋量の計算

主要鉄筋に関する配筋計算を以下に示す。

1) 定着部背面, 下床版上面鉄筋

$$T_r = -1\,712 \text{ kN} \Rightarrow \text{D 25 mm 12 本を } Br = 1\,180 \text{ mm}$$

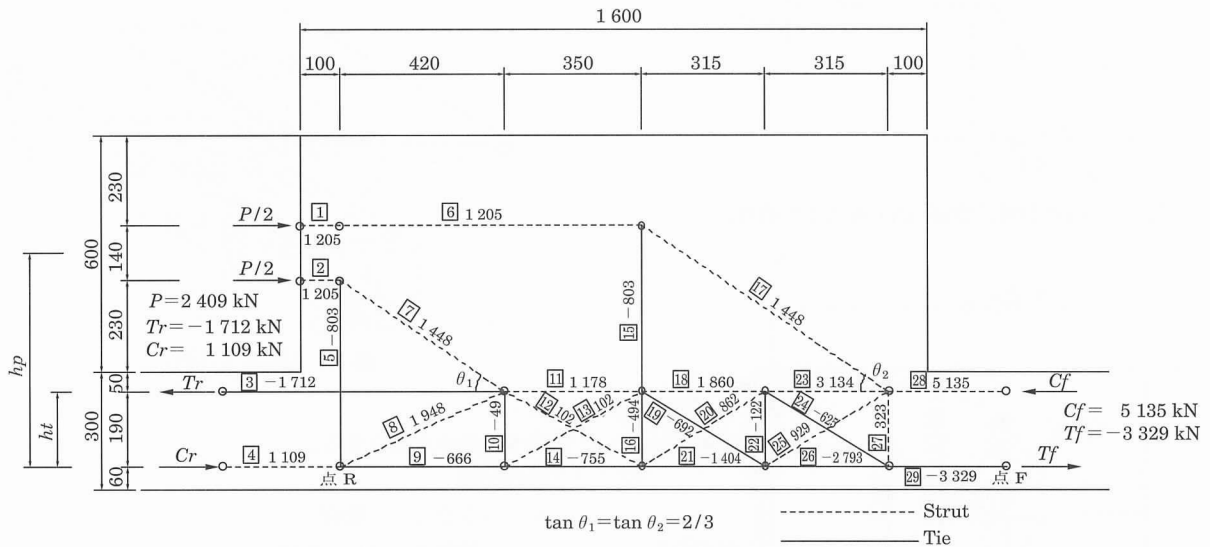


図 - 6 Strut and Tie Model

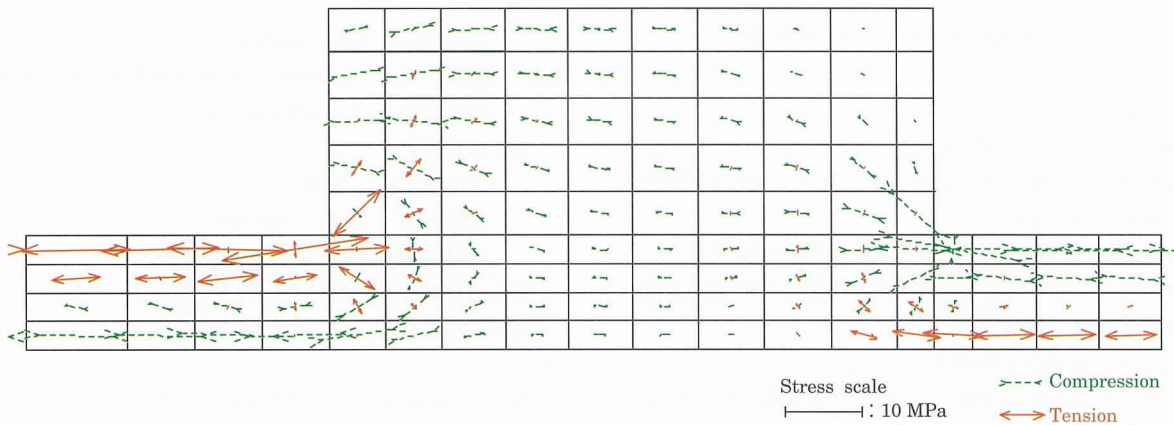


図 - 7 3次元弾性 FEM 解析結果

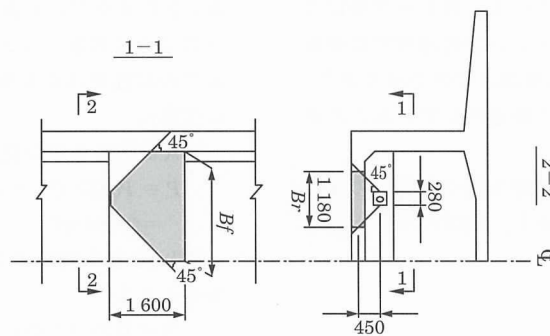


図 - 8 配筋範囲の決定

(図-8のハッチング範囲)に配置

$$T_{res} = A_s \times f_{yd} = 506.7\text{mm}^2 \times 12 \times 300 = 1\,824\text{ kN} > T_r$$

2) 定着部前面の鉛直鉄筋

$$T_5 = -803\text{ kN} \Rightarrow \text{D 19 mm 12本}$$

$$T_{res} = 286.5\text{mm}^2 \times 12 \times 300 = 1\,031\text{ kN} > T_5$$

3) 突起前面, 下床版下面鉄筋

$$T_f = -3\,328\text{ kN} \Rightarrow \text{D 25 mm 22本を } B_f \text{の範囲に配置}$$

$$T_{res} = 506.7\text{mm}^2 \times 22 \times 300 = 3\,344\text{ kN} > T_f$$

4) 突起内鉛直鉄筋

$$T_{15} = -803\text{ kN} \Rightarrow \text{D 19 mm 12本}$$

$$T_{res} = 286.5\text{mm}^2 \times 12 \times 300 = 1\,031\text{ kN} > T_{15}$$

以上をイメージ化したものを図-9に示す。

も本手法の特徴である。設計例からもお解かりいただけると思うが、われわれが今までに接してきた設計手法に比較して、設計者の裁量によるところが大きい手法であり、それだけに便利な反面、扱い方次第では危険性を伴う。

筆者は *fib* のワーキンググループでの活動、海外ゼネコンへの留学ならびに、現在携わっている国際工事を通して、日本国内の設計業務における責任と権限ならびに自由度の不明確さに強い疑問を抱かざるを得ない。性能照査型設計の浸透とともに意識改革が進むものと信じており、本稿で紹介した Strut and Tie Model もその前提があって初めて本領を発揮する手法であることを再度強調させていただきます。

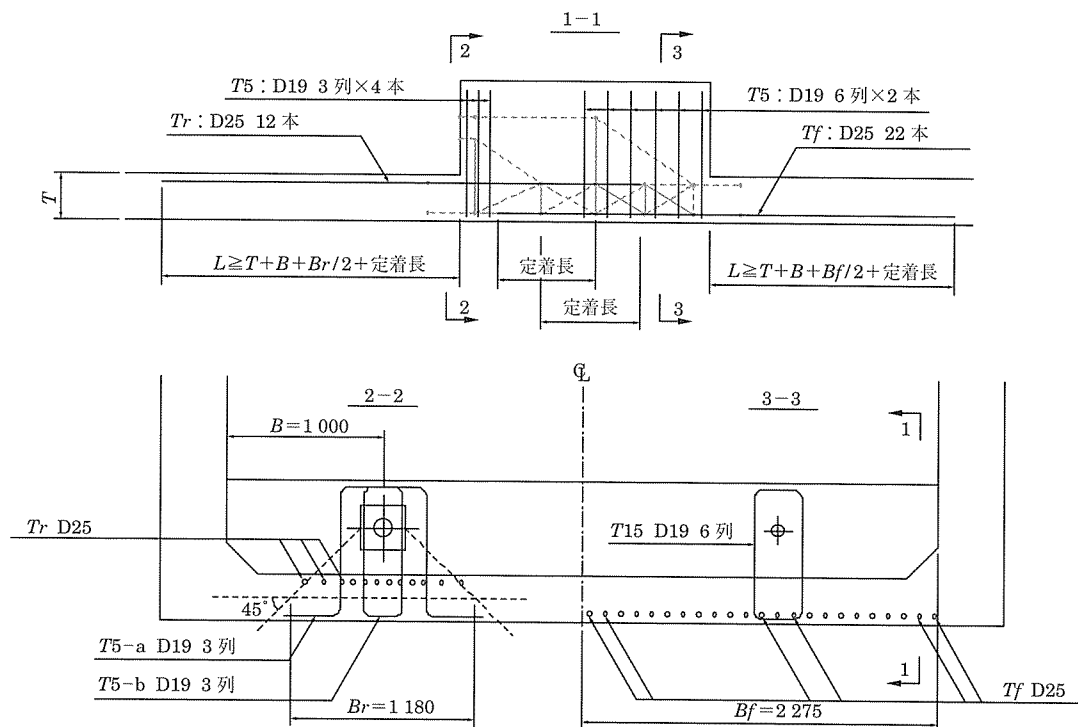


図-9 配筋イメージ

4. おわりに

Strut and Tie Model を用いた設計手法について概要を紹介した。梁のせん断に対する検討やコーベルの設計等、日本でもお馴染みのものから、FEM 解析の結果を用いてモデル化するものまで、適用範囲、使用目的が広範囲に及ぶこと

参考文献

- 1) FIP Recommendations, Practical design of structural concrete, September 1999 *fib*
- 2) Design Examples for the 1996 FIP Recommendations 'Practical Design of Structural Concrete', *fib Bulletin* No.16

【2004年6月8日受付】