

(4) 水平荷重に対する2主桁橋ホロナイ川橋の構造検討

A DESIGN FOR 2-GIRDER BRIDGE 'HORONAI RIVER BRIDGE' UNDER HORIZONTAL LOADING

高橋 昭一* 橘 吉宏** 志村 勉*** 伊藤 博章***

By Shoichi TAKAHASHI, Yoshihiro TACHIBANA, Tsutomu SHIMURA and Hiroaki ITHO

'HORONAI RIVER BRIDGE' is a 2-Girder steel bridge with prestressed concrete slab, which is the first bridge for expressway in Japan. This bridge is designed for a continuous steel girder bridge which is considered composite behaviour with steel girders and slab under condition of horizontal loading such as wind or earthquake. For this horizontal loading, requirement of lateral bracing, horizontal support condition using rubber bearing, placing of stud connectors at a intermediate support, are studied using analytical investigation with 3-dimensional FEM. This paper presents these analytical investigation and design for this bridge under horizontal loading.

1. はじめに

日本道路公団・北海道縦貫自動車道「ホロナイ川橋」は、2径間連続の非合成桁橋であり、高速道路橋として初めて本格的な2主桁形式が採用された橋梁である。2主桁橋はヨーロッパでは一般的な橋梁形式で、そのほとんどが合成桁であり、ブレースングシステムについては、最近のフランスにおけるH型鋼を用いた横桁のみとした構造例のように、対傾構あるいは横桁のみとする構造が多く^{1)~4)}、ホロナイ川橋でも省力化を目的として横構を省略した構造としている^{5)~6)}。このようなタイプの橋梁をわが国で計画しようとするれば、ヨーロッパと地震や風荷重などの水平荷重が大きく異なるために、水平荷重に対する構造検討を行い十分な安全性を確保する必要がある。

横構については、道路橋示方書(以下「道示」と略す)では水平荷重に抵抗するとともに構造物全体の剛性を確保する理由から、支間25mを超える1桁橋には設けることを原則としている。この横構は、主に地震や風荷重などの水平荷重により設計され、非合成桁橋であっても慣用的に床版と横構が荷重を1/2づつ分担するとして設計されているが⁷⁾、最近の研究で4主桁橋を対象にしたFEM立体解析や実橋計測の結果からは、横構の分担率は20~35%程度であることが確かめられている^{7)~9)}。これは、床版と横構の水平剛度比や荷重の作用位置が影響するためであり、2主桁橋では4主桁橋に比べ床版重量および床版剛性が大きく、横構の荷重分担率はさらに低くなることが推測される。したがって、水平荷重に対して床版剛性を考慮した設計を行えば、横構を省略しても安全性を確保できる可能性があると考え検討を行った。

ここで、水平荷重に対して床版剛性を考慮すると、水平荷重に対するずれ止めの安全性を検討する必要がある。床版や橋面荷重による地震時の慣性力や壁高欄や遮音壁の受ける風圧力は、床版から支点付近のずれ止めを伝って、支点上横桁、支点へと伝達される。ホロナイ川橋では、主構造が非合成桁として設計されているた

* 日本道路公団 札幌建設局

** 工博 川田工業(株) 技術本部

*** 川田工業(株) 橋梁事業部

め、合成桁橋に比べるとずれ止めは数少ない。特に中間支点付近で床版から鋼桁に伝わる力が大きくなるために¹⁰⁾、ずれ止めはこの力を円滑に支点に伝達できるように設計する必要がある。また、この水平力を受ける構造はゴム支承の使用を前提として、水平力を支承で受ける構造（MG支承を対象）と、構造の簡略化を目的として支承とストッパーとを分離する構造について、支持条件の検討も実施した。

上述した水平荷重に対する横構省略および支持条件の検討、ずれ止めの配置に対する検討を行うにあたりFEM立体解析を用いており、本文は、ホロナイ川橋の概要を説明し、解析による検討結果に加えて実橋で採用した構造についての報告を行うものである。

2. ホロナイ川橋概要

本橋は、橋長107.0m、支間長53.0mの2径間連続非合成鉄桁橋である（図-1 参照）。主桁間隔は6.0m、桁高3.0m、フランジ幅は上下960mm、970mmと一定とし、最大板厚は49mm、腹板厚も23mmで一定である。垂直補剛材は横桁位置とその間に一本とし、水平補剛材は中間支点付近のみに設け、その他の区間では設置していない。断面変化も添接位置のみで行い、断面変化の突き合わせ溶接を排除した。また、ブレースングシステムとして横構を省略し、型钢による横桁のみの構造とした。床版は厚さ31cmで、橋軸直角方向にプレストレス力を導入したPRC構造として設計し、P C鋼材としてアフターボンドによるシングルストランドを使用した。また、床版施工に移動型枠を採用し、鉄筋組立方法として現場近くのヤードで組み立てた鉄筋ブロックを一括して型枠に設置する方法を用い、その設置条件から、ずれ止めとして頭付きスタッド（22φ×150mm、以下「スタッド」と略す）を用いた。また、中間支点付近の床版については、ひび割れへの配慮から橋軸方向の鉄筋は D19を10cmピッチで配筋した。

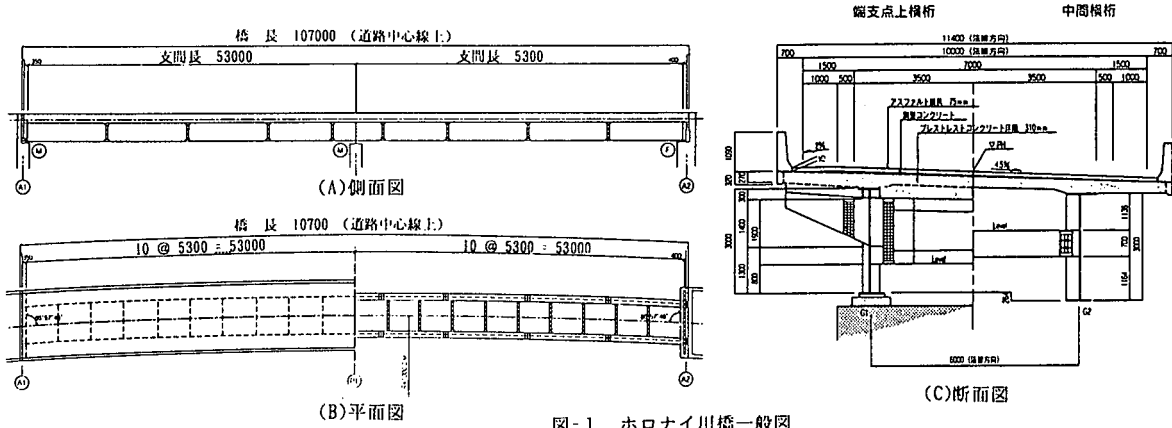


図-1 ホロナイ川橋一般図

3. 横構省略および支持条件の検討

3.1 対象モデルおよび解析条件

以下の条件でFEM立体解析を行い、横構省略および支持条件の検討を行った。

(A) 解析ケース

解析対象とした構造を表-1にまとめる。

解析は、橋軸直角方向の支持条件として、主桁下フランジ位置で支持する構造と横

桁中央で支持する構造を、また、それぞれの支持条件で、横構なしの構造、横構を支点に隣接するパネルのみに付けた構造、横構を全面に付けた構造を解析対象とし、計6ケースの構造について検討を行った。

表-1 解析モデル

	モデル1 下フランジで支持			モデル2 横桁中央で支持		
	横構なし	支点部隣接のみあり	横構あり	横構なし	支点部隣接のみあり	横構あり
橋軸直角方向支持条件						
モデル名	モデル1-1	モデル1-2	モデル1-3	モデル2-1	モデル2-2	モデル2-3

(B) 要素分割

FEM立体解析は汎用プログラムMSC-NASTRANを使用して行い、床版部分を8節点のアイソパラメトリック要素で、鋼桁部分を3および4節点のアイソパラメトリックシェル要素、壁高欄を2節点梁要素、横構を2節点棒要素を用いてモデル化した。ここで、要素数および節点数は、横構なしのモデルで節点数4107、要素数4032で、横構ありのモデルではこれに棒要素を加えて要素数4072で要素分割を行った。ここで、橋軸方向の分割は、横桁位置と垂直補剛材位置、および断面変化位置とした。なお、解析において横構は、道路橋示方書による引張部材（2次部材）細長比の規定を満足するようにCT形鋼（142×200mm）を用いた。解析では、第1章で示した考え方により床版と鋼桁とは完全合成としたが、壁高欄については剛性を無視した。

(C) 作用荷重

水平荷重として地震および風荷重を考慮したが、解析結果で両者の変形状が類似していること、後述するスタッド配置が地震時で決まったことから、ここでは地震時の解析結果を報告する。

地震荷重として、質量を持たせた個々の要素に水平方向の慣性力を作用させた。質量設定にあたり、床版のソリッド要素には、床版コンクリートの質量に加え、舗装、壁高欄、遮音壁の質量分を平均化して加算した値を用いた。ここで、水平震度は0.17とした（図-2参照）。

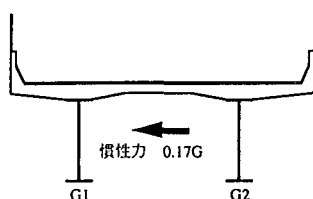


図-2 地震時作用荷重

3.2 解析結果

解析結果の一部として、変位および応力の最大値を図-3、4にまとめ、図-5、6に支持条件の異なるモデル1とモデル2の変形状を示す。

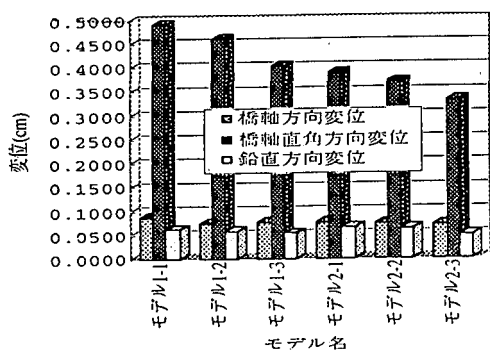


図-3 変位の最大値

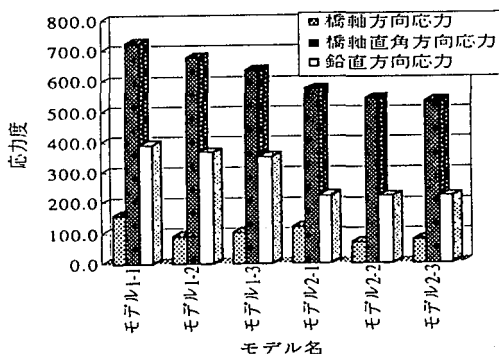


図-4 応力の最大値

(A) 横構省略に対する考察

図-5、6に示した変形状で、主桁上フランジは床版コンクリートの慣性力で床版とともに全体的に水平移動する傾向であった。このような変形に対して図-3に示す橋軸直角方向の変位が最も大きいのは、橋軸直角方向の支持が主桁下フランジ位置で横構を省略したモデルであり、最も小さいのは横桁中央で支持し横構を付けたモデルであった。横構が水平方向の変形に及ぼす効果は、それぞれの支持条件で15、18%の変位の減少であった。また、2主桁橋の断面にねじりモーメントが作用すると回転変形とともに橋軸方向のそり変形を生じる。これらの変形は橋軸直角方向の変形に比べると小さく、橋軸方向の変位は横構の設置により13%程度の変位の減少であった。文献10)による床版厚27cmの3径間連続2主鋼桁橋を対象にした同様な解析結果では、横構の設置により25%水平方向の変形が減少することが報告されている。この報告や上述した4主桁橋における横構の分担率を考慮すると、床版厚が31cmの2主桁橋の本橋では、この程度の変位の減少になることは理解できる。図-3に示した橋軸直角方向の変位からは、むしろ支持条件を変えた方が効果的であることが推測される。

図-4に示した応力の最大値のうち、モデル1、モデル2ともに橋軸方向応力が最大になるのは、中間支点上

横桁の下フランジ部であり、横構を省略した場合でも 160kgf/cm^2 程度であった。この値に対し、許容応力度 2100kgf/cm^2 (SMA570W) に対する地震時の許容応力度の割り増し量は 1050kgf/cm^2 であり、十分に小さい量であった。したがって、変形および応力から判断すると、横構を省略しても安全であると言えた。

(B) 支持条件に対する考察

図-5に示した変形性状で、モデル1の水平荷重を主桁下フランジで支える支持条件では、桁端部の垂直補剛材部が床版コンクリートの慣性力によるモーメントを直接負担するために、S字を描いたような変形性状を呈した。このような変形性状は、阪神大震災の鋼橋支点部の被害例としてみられた端支点部における塑性変形と類似した変形である。図-4に示した応力値の最大値で、橋軸直角方向および鉛直方向応力が最大となる場所は、中間支点上の垂直補剛材と横桁との取付位置であり、地震時に被害を受けるとすれば損傷は主桁にまで及ぶことが推測される。これと比較して、図-6に示したモデル2では、水平荷重を横桁中央部で支えているため、モデル1のような端支点部の補剛材に特徴的な変形はみられず、また、橋軸直角方向および鉛直方向応力が最大となる場所は中間支点上横桁であり、地震時に被害を受けたとしても主桁の損傷におよぼす影響はモデル1よりも小さいことが推測される。したがって、水平荷重に対しては床版と水平方向の支点との距離を小さくして、横桁位置で支持するモデル2の方が構造上有利であると考えられ、本橋ではモデル2の支持条件を採用した。

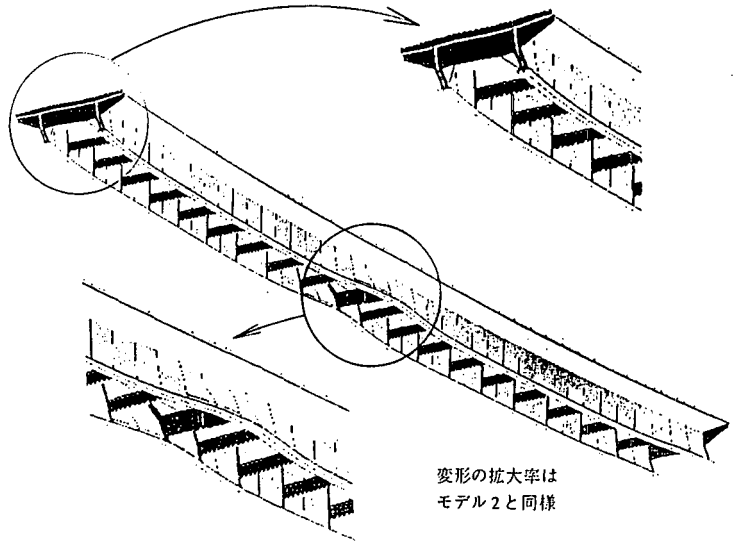


図-5 モデル1の変形

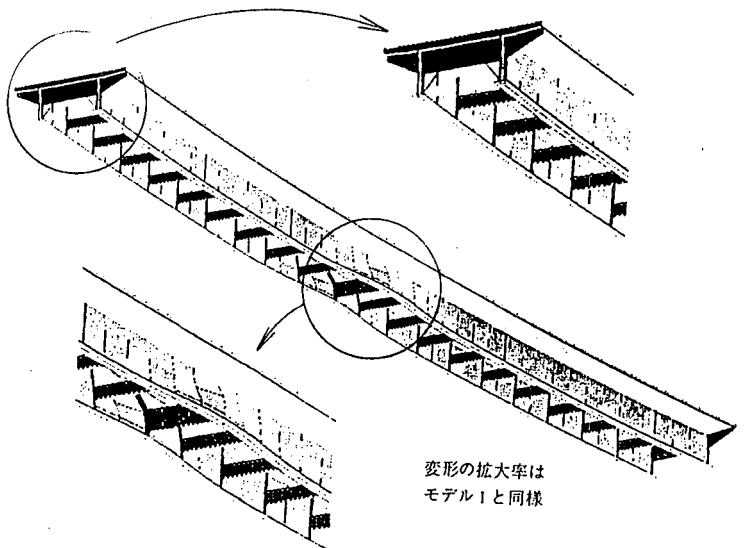


図-6 モデル2の変形

4. スタッダの配置検討

4.1 FEM解析結果と力の伝達区間

図-6に示した変形図より、水平荷重に対して変形が顕著であったのは、中間支点到隣接する横桁までの区間であり、力の伝達はこの区間でなされることが推測される。床版における鉛直方向の直応力および橋軸直角方向に作用するせん断応力は、図-7に示した

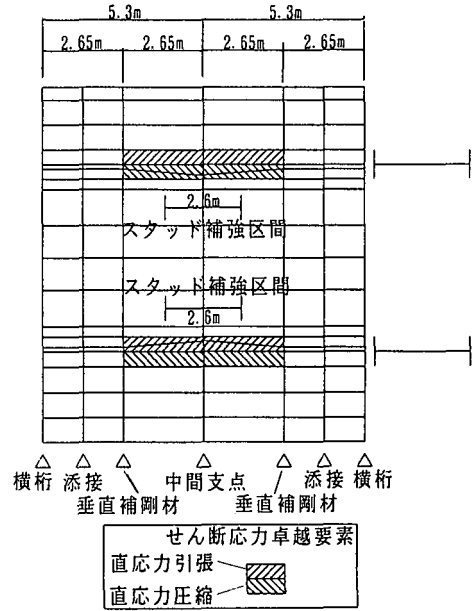
要素が顕著であったが、他の要素は応力値そのものが小さかった。ここで、床版における鉛直方向の直応力は、中間支点上横桁が床版を含めてラーメンとして挙動するために生じるものである。橋軸方向の要素分割が粗い

ものの、これらの要素内の応力分布は中間支点位置で卓越して大きい傾向がみられ、設計においては図-7に示した補強区間のスタッドで水平力を伝達するものとした。

4.2 引き抜き力に対するスタッドの設計

スタッドが伝達すべき力は、床版と鋼桁接合部に生じる橋軸直角方向のせん断力に加えて、橋軸方向まわりのモーメントである。スタッドは、このモーメントによる引き抜き力に対しても安全のように設計する必要がある。せん断力に対しては、道示の規定に従い設計することができるが、モーメントによる引き抜き力に対しては設計方法が確立されていないのが現状であり、下記の要領で設計を行った。

コンクリートと鋼桁の付着を期待しないと接合面の引張強度をゼロとみなすことができ、この状態におけるスタッドの軸応力の算出は、図-8に示すように鉄筋コンクリートばりにおける鉄筋応力と同様に計算できる。頭付きスタッドを引き抜き力に耐えるよう設計を行おうとすれば、スタッドに働く引張応力に加え、スタッドの頭からコンクリートに伝達されるせん断応力も照査する必要がある¹¹⁾。コンクリートの許容せん断応力度については、道示ではコンクリートの設計基準強度 350kgf/cm^2 に対し、図-7 中間支点付近の床版応力状況とスタッド補強区間



$$\tau = q / S \quad S = \sqrt{2} \pi h^2 \quad \text{----- (1)}$$

q はスタッドの軸力、 S はせん断断面積、 h はスタッドの高さである。本橋で用いる $22\phi \times 150\text{mm}$ のスタッドでは、許容せん断応力度に対応するスタッドの引張応力度は 1315kgf/cm^2 になった。この値はスタッドの材質SM400に対する許容引張応力度 1400kgf/cm^2 よりも小さい値であり、許容応力度はコンクリートのせん断応力度で決まることがわかる。

以上の設計方法に対して、実際のスタッドには、橋軸直角方向のせん断力と引き抜き力が同時に作用し、組み合わせ応力についても照査すべきであると考えられた。このようなスタッドの挙動については不明であり、実橋においては、中間支点上のスタッドは可能な限り多く配置し、許容応力度の割増しは行わず上記の許容応力度にさらに安全を見込んでスタッドを配置することにした。

4.3 実橋におけるスタッド配置

実橋における中間支点付近のスタッド配置は、スタッドに働くせん断力よりも引き抜き力で決定され、この時の設計モーメントは 80.43tfm （地震時）であった。この値は、慣用的な平面骨組解析により求めた値であり、FEM解析結果はスタッドの補強区間を決定するために利用した。この設計モーメントに対して、上記のようにできるだけ多く配置し、スタッドに働く引張応力は十分な安全性を見込んで 1000kgf/cm^2 程度とした結果、図-9(B)に示すようなスタッド配置となった。

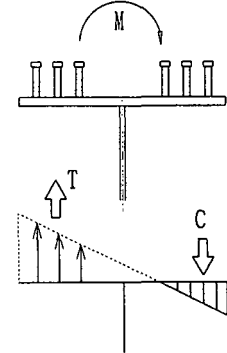


図-8 引き抜き力を受けるスタッドの設計

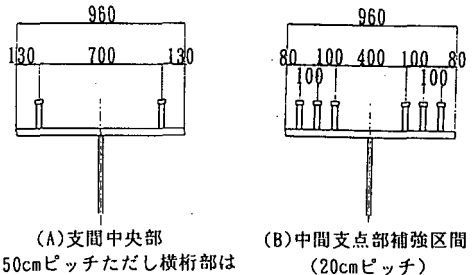


図-9 スタッド配置

ここで、スタッドの本数について、実橋の場合とホロナイ川橋を道示に従った合成桁橋として設計した場合¹²⁾との比較を表-2に示す。本橋では、一般部では図-9(A)に示す配置で、また、桁端部は床版の乾燥収縮を考慮して配置した。その結果、スタッド本数の総数としては、合成桁橋に比べると約半分になったが、

中間支点部は局部的に合成桁橋よりも多くなった。したがって、水平荷重に対して床版を完全合成と考えた場合の中間支点部のスタッド配置は、2主桁橋を合成桁として設計する場合にも無視できないと考えられた。

表-2 合成桁で設計した場合とのスタッドの比較

	実橋(非合成桁)	合成桁
桁端部	20本/m	25本/m
支間中央部	5.3本/m	12本/m
中間支点部	30本/m	20本/m
総数	1650本/桁	3380本/桁

(22φ×150mmを使用)

5. まとめ

ホロナイ川橋において、水平荷重に対して床版剛性を考慮してFEM立体解析を行った結果、横構を省略しても安全であることが確かめられた。また、支持条件としては、水平方向の支持を中間横桁中間とする構造が有利であることが確かめられ、実構造ではゴム沓を用いて横桁位置に鋼製のストッパーを設けた構造が採用された。また、中間支点付近の床版と鋼桁の接合部のスタッドについては、一設計方法を示し、可能な限り多く配置するように配慮した結果を示した。このスタッドについては、上述のようにスタッド自体の挙動が解明されていないことや、スタッドを柔なバネとして取り扱う弾性合成の考え方の適用検討など、設計方法については今後さらに検討する必要があるものと考えられた。

本橋では、鉛直荷重に対しては非合成桁として、水平荷重に対しては床版剛性を期待して設計を行ったが、スタッドの使用本数から判断すると、実構造としては鉛直および水平に対しても合成挙動するものと考えられ、第1章でも述べたようにヨーロッパで主流になっている連続合成桁について、経済性の観点からも、今後検討する必要があるものと考えられた。

参 考 文 献

- 1) M.Virlogeux ;Office Technique pour l'Utilisation de l'Acier(OTUR), Bulletin Ponts Metalliques, No.15, 1992.
- 2) 高速道路調査会；橋梁の単純化に関する調査検討報告書，21世紀の橋梁技術検討小委員会，1993.
- 3) 高速道路調査会；平成5年度欧州橋梁調査団報告書，1993.
- 4) 川田忠樹監修，野村國勝，梶川靖治編著；複合構造橋梁，技報堂出版，1994.
- 5) 高橋昭一，志村勉，橘吉宏，水野浩；PC床版2主桁橋による合理化検討，土木学会第49回年次学術講演会講演概要集Ⅰ，1994.
- 6) 高橋昭一，鈴木隆，志村勉，田中一夫，伊藤博章，橘吉宏；PC床版2主桁橋（ホロナイ川橋）の設計，土木学会第49回年次学術講演会講演概要集Ⅰ，1995.
- 7) 日本鋼構造協会；構造物の立体挙動挙動と設計法，JSSCテクニカルレポート，No.21，1992.
- 8) 日本橋梁建設協会・設計部会；プレートガーダー橋の下横構の省略に関する一考察，橋梁と基礎，89-9，1989.
- 9) 名取暢，明橋克良，尾下里治；鋼I桁橋における構造形式の簡略化に関する検討，横河ブリッジ技報，No.21，1992.
- 10) 酒井秀昭，橘吉宏，志村勉，小西哲司；水平荷重を受けるPC床版2主桁橋の挙動について，土木学会第48回年次学術講演会講演概要集Ⅰ，1993.
- 11) 坂井藤一，八部順一，大垣賀津雄，橋本靖智，友田富雄；合成2主桁橋の立体挙動特性に関する研究，土木学会，構造工学論文集，Vol.41A，pp945-954，1995.
- 12) 日本橋梁建設協会・設計部会連続合成桁WG；連続合成桁調査検討業務（平成6年度研究成果），1995.