

コンクリート土木構造物の設計方法の進歩

池田 尚治*

1. はじめに

コンクリート技術の変遷を概観し、その将来展望を描く中でコンクリート土木構造物の設計方法の進歩に焦点を当てて考えることは意義深いことである。言うまでもなく設計という行為は、その置かれた状況のもとで最適と思われるプランを具現化するための人間の英知の発現であり、その良否の及ぼす影響は極めて大きい。構造材料の進歩、力学の発展、社会経済の成長などに対応して設計方法や設計哲学が現在でも大いに進歩している最中であると言えよう。ここでは、今までのコンクリート土木構造物の設計方法を概観し、設計という行為の重要性と今後の展望について私見を述べることとする。

なお、著者は本誌の1981年7月号に総論として「土木構造設計法の変遷と今後の方向」と題した私見を述べており、その後17年も経過していることに驚いている次第である¹⁾。著者自身が17年前と比べて今回はどのような記述ができるのか興味深く感じつつ本文を表すものとする。

2. 設計について

ある行為を行うときに筋道を立てて所期の目的を達成するプログラムを作ることが、大きな意味での設計という概念であると思われる。個人が将来に向けて自身の計画を立てることを人生設計あるいは生活設計と言ったりもするが、設計は一般的には物を造るときに用いる言葉である。別の言い方をすれば、物を所期の目的のように造るには設計なしには出来ないということである。

古くは古代エジプトのピラミッド、ギリシャ時代の神殿（写真-1）やローマ時代のアーチ橋（写真-2、写真-3）などが大規模構造物として現存しているが、これらは設計という行為なしには建設しえなかつたはずである。おそらく相当に精密な設計図が作成され、これに基づいて施工されたものと考えられる。著者はかつてパリのルーブル美術館において、何世紀前だから分からぬ古い石造建築物の設計図面を見たことがある。それは極めて精緻なもので、当時の技術者の心に触れたような気が



写真-1 パルテノン(Parthenon)神殿（建築家 Ictinus と Callicrates の設計により BC 438 年に完成したドーリヤ式の神殿で幅 31 m、長さ 70 m、柱の高さ 10 m の大理石製、ただし、屋根は木造であった。1687 年 9 月に戦争により大きく破損した）



写真-2 ガールの水道橋(Pont du Gard)

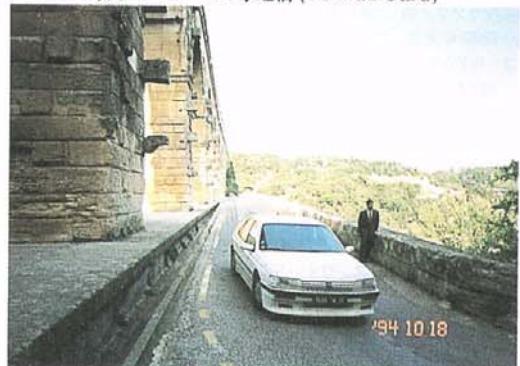


写真-3 現在でも道路橋として用いられているガールの水道橋（1743 年に下層部が拡幅された）

* いけだ・しょうじ／横浜国立大学教授 工学部 建設学科（正会員）

した。また、この事実から上に述べたような現存する古代の構造物も詳細な設計図の基で建設されたものと類推しているのである。

さて、設計という行為は新しく物を造るための企画であるのまさに創造的な仕事である。しかし、その行為の基本となるものは大部分過去の経験と模倣である。模倣と言っても数多くの過去の例や経験を選択し、あるいは組み合わせて用いるところに独創性が發揮できる。一般に新奇なことがよく、模倣はよくないとする風潮があるが、設計という行為の中では模倣は重要である。そもそも教育ということが模倣から成り立っていることに留意すべきだと思われる。孔子が「学んで時にこれを習う。また楽しからずや」といった意味はいったん勉強したことを再び復習することの楽しさをいっており、一度学んだ設計手法を何回も適用することが楽しいというようにも解釈できる。

レオナルド・ダ・ビンチ(1452-1519)、ガリレオ・ガリレイ(1564-1642)、およびアイザック・ニュートン(1642-1727)を経て構造力学が発達し、また、産業革命(1760年頃～1830年頃のイギリスにおける変革)を経て鉄や鋼およびセメントが生産されるようになると、それまでの木造や石造の構造物に代わって鉄やコンクリートの構造物が造られるようになった。鉄は鍛鉄、鍊鉄を経て性能の優れた鋼が生産されるようになり、構造材料として不動の地位を確立してきた。

コンクリートに関しては1850年代に鉄筋コンクリートが登場し、1928年にはプレストレストコンクリートがフレシネーの努力によって実用化され今日に至っている。構造力学の進歩と材料の進歩は当然設計方法を大いに革新させ、力学的な論理性が設計の中に取り入れられるようになった。しかしながら設計という行為自体は経験や模倣が重要であり、そこに若干の創意工夫が施されて進歩してきたのである。経験や模倣の範囲を越えて新しい設計を行う場合には、当然ながら大きな危険が伴うものである。したがって、冒険的に新しい設計方法を採用するときには危険を避けるために研究や実験を十分に行なうことが大切となる。

構造物を築造するには一般に多大な経済負担が生ずる。したがって、構造力学による論理性が認識されるようになると、これを活用して最も経済的な構造物を設計することが求められる。同時に構造物の景観に対する要望も取り入れなければならない。このためには、時間軸も含めた構造物の構造的性能と構造物に及ぼすであろう外乱について可能な限り正確に把握することが必要となる。しかしながら、これらには必然的にばらつきや未知のことが内在するために確率論的な考え方を導入して安全度の確保が図られる。一方、構造的性能や外乱をすべ

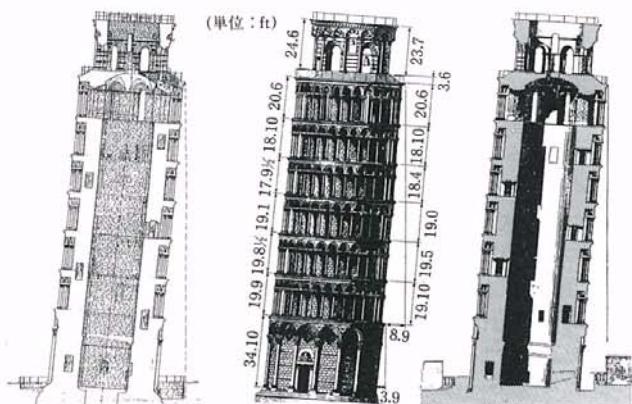


図-1 ピサの斜塔



写真-4 ピサの斜塔 (Leaning Tower of Pisa)(Bonanno Pisano の設計で建設が開始された。高さ 56 m, 外径 15.5 m, 重量 14 500 トン)

て確定的なものと仮定すれば許容応力度設計法のように簡潔な設計体系を構築できる。

所要の性能を持つ構造物を設計しようとする場合、その構造形式には無限の自由度がある。設計者は、その中から最も妥当なものを唯一つ選択して設計を遂行することとなる。この選択が絶対的に正解であるとの判定を行うことは恐らく不可能なことである。そのため、設計の妥当性は設計者が責任を負うのである。ただし、大きな責任を負う設計者は、責任とともに大きな名誉を持つこととなる。

構造物の持つ価値は、時代とともに変化することも認識しなければならない。中国の万里の長城は、現在では中国の最高の観光資源となっているのである。イタリアのピサの斜塔(写真-4)は1174年に建設が開始され、一時工事が中断されたが1350年に傾いた状態で完成した。基礎部分の設計が不適切であったために不等沈下したのであるが、結果としては世界の文化遺産となっており、歴史的に見て最適の設計であったことになる。図-1に斜塔の図面を示す。

3. 設計方法の進歩

最近のコンクリート土木構造物の設計方法の進歩について考えるとき、前述の著者の 17 年前の報文の内容と現在の状況とを比較してみるとよく分かる。ここではいくつかの例をあげて述べることとする。

(1) 限界状態設計法

現在においても許容応力度設計法が道路橋示方書などに用いられているが、その中で破壊に対する安全度の検証が同時に行われているので実質的には限界状態設計法に近い形になりつつある。一方、土木学会のコンクリート標準示方書では 1986 年の改訂以来設計法の形式が限界状態設計法へと改められた。ここでは限界状態として

- a. 終局限界状態 (Ultimate Limit State)
- b. 供用限界状態 (Serviceability Limit State)
- c. 疲労限界状態 (Fatigue Limit State)

の三つの主な限界状態を設定し、これらの限界状態に達することがほとんどないように適切な安全度を持たせて設計する方式となっている。なお、ここで b. の「供用限界状態」については「使用限界状態」という用語が広く用いられているが、Serviceability Limit State の日本語としてはサービスをする側の用語としての供用という用語を用いる方が適切と思われる。

限界状態設計法では、荷重の値および材料の抵抗値は終局限界、供用限界および疲労限界に関してそれぞれ異なる特性値を持っている。例えば荷重について言えば、終局限界に対する荷重は実際にはほとんど作用することのないような大きな値をその特性値とするが、供用限界状態に対しては、実際に作用する荷重のうちのほぼ最大のもの、あるいは規格で定めた最大の荷重がこの特性値に該当する。材料の場合では、鉄筋を例にとるとその降伏強度が終局限界についての特性値の対象となるが、供用限界に対しては、コンクリートのひび割れ幅の制限から定まる値、例えば 200 MPa 程度がその特性値となる。

安全率は荷重の特性値および材料の特性値にそれぞれ別々に適用し、それらを設計荷重および設計抵抗値（あるいは設計強度）とする。したがって、荷重と材料の双方に安全率を用いるのでこれを部分安全率 (Partial Safety Factor) と呼んでいる。

限界状態設計法における安全の検証は、部材の断面力と断面耐力との比較によって行われる。一方、許容応力度設計法では材料の強度と許容応力度との比率が安全率であるので作用する荷重と発生する応力度とが正比例する場合には安全度の評価は容易であるが、プレストレストコンクリートや軸力と水平力とを同時に受ける柱のような場合には荷重と応力度とが正比例しないので、許容応力度設計法では直接安全度を評価するのは困難である。このため、このような場合には終局強度や保有耐力

などの検証を別に行うことが必要となる。

なお、土木学会コンクリート標準示方書では、荷重や材料強度の規格値に修正係数を掛けて特性値としているが、荷重に関して言えば、規格荷重に修正係数を掛けて終局限界状態の荷重の特性値とし、それに荷重係数を掛けて終局設計荷重としている。したがって、荷重係数設計法 (Load Factor Design) における荷重係数に匹敵する係数として土木学会コンクリート標準示方書の場合には荷重係数に修正係数を掛けた値が対応する。つまり、同じ荷重係数という用語が異なった用い方をされていることに注意しなければならない。

(2) 耐震設計法

土木学会のコンクリート標準示方書では、1978 年の宮城県沖地震による橋脚の被害を教訓として從来からのコンクリートの許容せん断応力度を大幅に低減するとともに鉄筋の段落としに関する設計法や最小せん断補強鉄筋の量を昭和 55 年版 (1980 年版) で規定した。また、1986 年のコンクリート標準示方書の改定に際しては新たに耐震設計の章を設け、次のような規定を設けた。すなわち、耐震設計の原則として「地震時の安全性と地震が終わった後の構造物の供用性能」を指標とする世界に先駆けた規定としたのである。地震力については応答を考慮して通常の構造物では 2 倍の応答倍率が生ずるものとし、これを地震後に要求される供用性能に応じて低減する方式が規定された。また、柱の基部には少なくとも 0.2% の横方向鉄筋を配置することも規定されている。1995 年 1 月の兵庫県南部地震の前にこのような設計方法が定められたことは大いに評価されるべきであろう。

日本道路協会の道路橋示方書耐震設計編では、1990 年に既に 1.0 g に対する地震時保有水平耐力の照査が規定されており、大地震時の橋りょうの安全性の確保が図られてきたのである。1996 年には兵庫県南部地震の経験に基づいて大幅な改定が行われ、直下型地震に対しては応答加速度で最大 2.0 g に対する地震時保有水平耐力の照査が規定された。

また、地震動としていわゆる L2 レベルの地震動をタイプ I のプレート境界型とタイプ II の直下型に分類し、保有水平耐力の検討を行うことが定められた。免震や落橋防止などについても規定されており、画期的な示方書となっている。なお、構造細目や断面耐力の算定法については現実の設計施工により即した方向に今後改められることを期待したい。

(3) 最近の特色と課題

最近におけるコンクリート構造の設計に関する特徴的な事柄は次のようなものである。

- ① 構造物に対する構造美および機能美についての要望
- ② 限界状態設計法による合理的な設計
- ③ 構造物の耐久性への関心

- ④ コンピュータの普及による設計の合理化と解析の高度化
- ⑤ 高強度・高性能コンクリートの出現
- ⑥ 高強度鉄筋の出現
- ⑦ 炭素繊維やアラミド繊維などの登場
- ⑧ プレハブ化、プレキャストセグメント化による施工の合理化、外ケーブルの活用
- ⑨ 鋼コンクリート複合構造の発展
- ⑩ 阪神大震災を契機とした耐震性の大幅な向上
- ⑪ 直下型地震に対する耐震補強
- ⑫ コンクリート材料のリサイクル
- ⑬ 仕様規定から性能規定への移行
- ⑭ ISOによる国際規格化
- ⑮ コスト縮減を考えた設計

これらに関しては、土木学会、日本コンクリート工学協会およびプレストレストコンクリート(PC)技術協会において対応がなされ種々の設計施工指針を既に定めたものもあり、また、現在も調査研究が進められている。

複合構造のうち、鉄骨鉄筋コンクリートに関しては、1986年の土木学会コンクリート標準示方書の中に明確に規定することができた。ウェブに波形鋼板を用いた複合PC橋に関しては著者の提案した複合形式を取り入れた支間97mの連続ラーメン橋(本谷橋)が設計施工され、この形式のものとしては現在世界最大支間のものである²⁾。

PC構造に関しては、1991年に土木学会よりPC工法設計施工指針が刊行され、実用的なPC工法に関する規定が定められた。一方、PC技術協会では1994年にPC技術規準委員会が発足し、1996年に外ケーブル・プレキャストセグメント工法設計施工規準(案)およびPPC構造設計規準(案)が定められた。これらは最近建設された新しい形式のPC構造物の設計や施工に適用されてきた。また、翌1997年にはPC橋の耐久性向上のための設計・施工マニュアルが定められた。現在、PC技術協会では、複合構造、耐震、エクストラドーズド橋・PC斜張橋、および吊床版橋に関する設計施工規準のための調査研究を鋭意進めているところである。

仕様規定から性能規定への移行に関しては、限界状態設計法とよく対応するものと考えられ、設計の重要性が一段と増加するものと考えられる。フレシナーが1930年に完成させた支間186m3連のアーチ橋であるブルガステル橋(写真-5)は、約70年の歴史をもつ鉄筋コンクリート構造物であり、設計施工に対するフレシナーの卓見を改めて学習する必要がある。

コンピュータの設計への応用に関しては誠に目覚しい進歩をとげており、有限要素法や非線形動的解析が設計にしばしば用いられるようになってきた。コンピュータグラフィックも大いに進み、従来の製図とは隔世の感がある。設計計算や製図はもともとヴァーチュアルリアリ



写真-5 ブルガステル(Plougastel)橋(道路鉄道併用橋として建設されたが、鉄道は敷設されなかった)

ティ的なものであるが、コンピュータによるそれは一層その傾向が強く、経験や実績を踏まえずに業務が進行することに注意を払う必要がある。北海で石油採掘貯蔵施設であるスライプナーが沈没試験時に破壊し海底に沈んだ事故の最大の原因は、設計が有限要素法に全面的に依存していたからだと言われている。心すべきことであろう。

4. 今後の展望

設計という行為はそもそも主觀的、能動的なものであって、決して受け身のものではないはずである。与えられた条件を満足することを検証するだけでは決してよい構造物を設計することはできない。耐震設計についてもこのことが重要である。

地震による構造的な被災は、地盤の振動と構造物の振動特性とが一致するときに大きく現れる。この場合、構造物が損傷してくると固有周期が増大するので、これと地震動の卓越周期とが一致しないようにすることが肝要である。また、免震支承の採用や隣接構造物との衝突を回避することも重要である。鉄筋コンクリート柱の鉛直方向にプレストレスを導入して地震時の安全性と地震後の供用性を大幅に向上させることも可能であるので、耐震設計に際しては積極的に耐震性を向上させるべく検討することが重要である³⁾。

橋脚の軸方向にプレストレスを導入すれば地震時の復元性を確保しながら共振現象を回避できるので、今後はこの種の橋脚の採用を望みたい。これに関しての手法は現在鋭意検討が進められている。また、高強度鉄筋の採用や新素材などによるせん断補強も有効である。

兵庫県南部地震による阪神地域の橋りょうの地震による被災は、設計で想定した地震力を大幅に超える地震動によって橋脚がせん断破壊したこと、あるいは鉄筋の段落とし部の悪影響に誘発されてせん断破壊したことが主因であることに留意しつつ、反省点や教訓を十分に生かして今後の耐震技術を発展させることが肝要と思われる。

大地震による外乱については、正確にこれを予測することは本来不可能であるので、設計に用いる地震動は戦略的に定めることが求められる。現在のところ、直下型の地震は局所的に大きな外乱を発生させるが、各地域にとってその発生の間隔は数百年から千年である。一方、プレート境界型の地震はその発生頻度が100年程度と言われ、また、その影響範囲は広大である。ただし、震源からある程度離れた地域が広いのであって、この広い地域における外乱の強さは直下型地震のそれよりはある程度小さいと言える。ただし影響範囲が広大であるので、この地域での被災は相当に限定されたものとすることが社会的に必要である。そこで、直下型地震による震源近傍での被災の程度とプレート境界型地震による広範な影響地域での被災の程度とを、分けて耐震設計を行うことが得策と考えられる。この場合、構造物の重要度を反映させて構造物の性能を妥当に確保することが必要と思われる。

既に土木学会コンクリート標準示方書では、1986年版において性能規定型のフォーマットで耐震設計を定めたが、この考えをベースに直下型地震を含めた構造物の耐震性能を構造物の重要度ごとに定めるのがよいと思われる。

鉄筋コンクリート構造物は、一般に所要のせん断補強を行うことによって曲げ破壊先行型の終局状態とすることが可能である。また、適切な配筋によって降伏変位の6倍以上の交番外力に安定して耐えるようにすることは可能である。そこで、鉄筋コンクリート柱のじん性能が $6\delta_y$ (δ_y : 降伏変位) 確保されるものとして、これをベースとして地震動の強さ、およびコンクリート構造物の重要度に対応した性能の分類を、設計塑性率を指標として表-1のように行うよといと思われる。

なお、じん性能を $6\delta_y$ としているのでこれに対する余裕率は次の表-2のとおりとなり、現行の道路橋示方書耐震設計編9.2に示される安全係数 α の数値とたまたま一致することは興味深い。

ただし、道路橋示方書の安全係数 α は塑性変形量のみを対象としているので、この方式によってじん性能が $6\delta_y$ のときの設計塑性率は $(1+5/\alpha)$ 式によって求めることとなり、表-1の値より若干大きな値となる。これを

表-1 設計塑性率

	一般	重要度A	重要度B
プレート境界型	3.0	2.5	2.0
直 下 型	6.0	5.0	4.0

表-2 余裕率

	一般	重要度A	重要度B
プレート境界型	2.0	2.4	3.0
直 下 型	1.0	1.2	1.5

表-3 じん性能を $6\delta_y$ としたときの道路橋示方書の設計塑性率

地 質	A種の橋	B種の橋
プレート境界型	3.1	2.7
直 下 型	5.2	4.3

表-3に示す。

鉛直方向にプレストレスを導入した柱についても、じん性の評価方法は上述の鉄筋コンクリート柱の場合と同様に行えることが現在明らかにされつつある。

塑性率が2.0の場合、被災は軽微な損傷以内であり、地震後の損傷は外見上ほとんど認められない。また、塑性率4.0に達しても地震後の供用性は確保できる。重要度Bの構造物はこのように設計することにより、地震後もその役割を果たすことができると思われる。重要度Aの構造物では、重要度Bの場合に比して若干被災の程度が大きくなるが、当座の供用には問題が生じないと思われる。一般的な構造物の場合でも直下型に対して安全度は十分に確保できる。

地震動のような、未来に発生するであろう外乱のシナリオに対して構造物が所期の性能を発揮できるようにするには、設計の体系を性能規定型にすることが大切であると思われる。

次にプレストレストコンクリート(PC)の設計について若干の私見を述べる。

プレストレスのレベルについては、FIPの構造設計指針の用語を適用し、例えば、死荷重のもとではフルプレストレス状態、通常の変動荷重のもとではリミテッドプレストレスの状態、および供用限界状態ではパーシャルプレストレス(PPC)の状態といったように、作用する荷重のもとで、PC部材のプレストレスの程度を表す用語として活用すればよいと思われる。

PC部材の設計では、従来より全断面有効として断面計算が行われてきた。これはPCがフルプレストレスを基本として出発したからと思われる。しかしながら PPCの設計概念が登場するに及んで PPCにはこの方法の適用が疑問視され、むしろ PPCには従来から用いられている鉄筋コンクリート方式による計算方法が用いられるようになった。そのため、PPCと、リミテッドプレストレス(限界プレストレス)との間に設計上大きな隔りが生じることとなった。そこで、これは著者の私案であるが、PCと鉄筋コンクリートとの共通的な設計手法の点から考えて、すべての断面計算でコンクリートの引張強度を無視する方式を採用すればよいと思うのである。ただし、全断面有効の計算方法は概略の計算方法として大いに活用することができる。

プレストレストコンクリートはPC鋼材の耐久性が最も重要な事項であり、また、長期間経過後のクリープ変形の影響も十分に考慮することが必要である。そのため性能規定型の設計概念が早く構築されることを望みた



写真-6 アネ(Annet)橋（フレシナー設計のマルヌ5橋のうちのひとつ）

い。フレシナーが1951年にプレキャストセグメント工法によって設計施工したフランスのパリ郊外のマルヌ川の5橋りょうはいずれも同一寸法のもので、建設後50年近く経過したが全く健全であり、フレシナーの創意工夫に驚くばかりである。写真-6に支間74mのPC偏平アーチ橋として卓越した姿を誇るアネ(Annet)橋を示す。性能規定型の設計規準を定めるに当たり、フレシナーの実績を改めて学習し、原点に戻って検討することが必要と思われる⁴⁾。

さて、現在第二東名および第二名神高速道路の建設が銳意進められ、多くの斬新なコンクリート構造物が建設中である。その中の木曽三川橋（木曽川橋りょうおよび揖斐川橋りょうで橋長はそれぞれ1145mおよび1397m）は支間長約270mの多径間連続複合エクストラドーズド橋であり、重量約400トンのプレキャストセグメントを350個以上用い、支間中央部の約100m部分7カ所は重量約2000トンの鋼げたを7連製作してそれを一括吊込みによって閉合する画期的な設計案が採用された。写真-7、写真-8に架設されたプレキャストセグメントと完成予想図を示す。この設計は極めてチャ



写真-8 木曽三川橋の完成予想図（日本道路公团 名古屋建設局四日市工事事務所）

レンジングなものであり、大幅な経済性が図られたこととともに景観的にも勝れたデザインである。しかしながら突然このような設計が誕生したのではなく、今までの多くの経験と実績が積み上げられた学習の効果を踏まえて創意工夫が図られているのである。この工事が無事に完成することを願うものである。今後はこの橋りょうの実績を大いに学習することにより新たな展望が開けるものと考えられる。

5. おわりに

西暦2002年10月に第1回fib国際大会が大阪で開催される(fib:fédération internationale du béton、国際構造コンクリート連合)。この大会が一層価値あるものとなるよう我が国のコンクリート土木構造物の設計が大いに進歩することを願い、またその実績として新しい発想の構造物が具現化されることを期待したい。

なお、コンクリート土木構造物を含めた土木設計一般の最近の進歩については伊藤学教授を中心に編集した便覧に記述されているので参照いただければ幸いである⁵⁾。

本文を御高覧いただいた方がもし著者の17年前の文を御一読され、17年間における設計に関する進歩を見ていただくことができるなら著者の喜びである。

参考文献

- 1) 池田尚治：土木構造設計法の変遷と今後の方向、コンクリート工学、pp.7~10、日本コンクリート工学協会、1981.7
- 2) 池田尚治：土木分野における複合構造の発展、コンクリート工学、pp.3~8、日本コンクリート工学協会、1998.10
- 3) 池田尚治：耐震技術の今後の展望、橋梁と基礎、pp.20~21、建設図書、1996.8
- 4) Ordonez, Jose A. Fernandez, Eugene Freyssinet, Bilingual Edition 1979, (現在、翻訳版より日本語版出版準備中)
- 5) 土木設計便覧、丸善、1998



写真-7 木曽三川橋の柱頭部プレキャストセグメントの架設状況