

(83) インテグラルアバットのPC橋への適用

日本道路公団札幌建設局 正会員○高橋昭一

1. はじめに

JHの橋梁技術の大きな柱の一つとして、「橋梁の連続化」がある。「なるべくジョイントをつくらない」は、橋梁計画を立てる上でのコンセプトともいべきものであり、われわれ橋梁技術担当者が橋梁に対峙するときの基本となっている。

PC橋を連続化多径間化すると、端部下部工の寸法がPC橋特有のクリープ乾燥収縮で決定され、多くの場合、更なる連続化は設計不能となる。これを諸工夫で克服しても、橋台部にはジョイントがどうしても必要となる。インテグラルアバットは、米国にて一般的に用いられている橋台構造で、盛土法肩に打設した一列杭基礎を橋梁上部工に剛結させた構造となっている。杭前面が傾斜地盤のため柔らかい基礎となり、構造物に発生する内力外力に柔かく抵抗する。特に、PC橋特有のクリープ乾燥収縮など構造系中心に向かって作用する力に対しては、内部応力を低減できうる構造となる。

JH札幌では、北海道縦貫道のオタモイ川橋、ナイベコシナイ川橋(長万部工事事務所管内、橋長はともに約100m)において、インテグラルアバットを用いた長大橋にも適用できる橋台部での連続化を試みており、これを報告するものである。

2. インテグラルコンストラクション

2.1 インテグラルコンストラクションとは

インテグラルコンストラクションは、橋梁床版部にジョイントを設けずに建設することと定義され、インテグラルアバット橋の設計思想となっている。インテグラルとは、ものごとを複合的一体的に考えることを意味する。橋梁の長大化、近代構造力学の発展に伴い、計算上の仮定として支承や伸縮ジョイントは必要なものとなり、またこれらを用いずに建設された橋梁に変状が生じるにおよんで、これら橋梁付属物は橋梁に欠かせないものとなった。

2.2 ジョイントレス橋の背景

米国では冬期路面管理に用いられる凍結防止剤が岩塩として豊富にあり、比較的安価に入手できることからこれの大量散布により、ジョイントを有する橋梁の耐久性や健全性は重大な影響を受け続けている。しかし、ジョイントレス橋は、凍結防止剤に痛められもせず、目立った維持管理補修もなく長い期間正常に機能している。さらには、高価なジョイントや支承を削除することによって、橋梁はより経済的となる。

2.3 米国における設計思想の背景

「構造技術者の技術力はジョイント無しにいかにも橋梁を長く設計できるかによって決まる」という言葉のもと、「連続化をした結果として、桁や床版に多少のクラックが入ったからといってどうしたというのだ。ジョイントを無くすことによって、技術的に乗り越えなければならないような問題など無い。ジョイントがあったとしたら、維持補修上の問題がより大きなものとなったはずだ」と、技術者たちは語っている。

中小規模橋梁においては、ジョイントを無くすことによって生じる二次的な応力によるより、ジョイントを使用することによって生じる橋梁の破損の方が甚大であるという認識が橋梁設計思想の根底にあり、インテグラルアバット橋のようなプラグマティックな建設方法を正当化させていることになる。

3. 米国におけるインテグラルアバット橋

3.1 基本思想

米国西部テネシー州の設計マニュアルには、「インテグラルコンストラクションのための最低条件を記載したものであり、橋梁設計者は詳細を詰め適切な設計を行い、連続延長をより大きくするよう心がけなければならない」と基本思想が述べられている。上部構造の連続化、橋脚上での固定あるいはインテグラルアバット構造を取り入れて伸縮ジョイントを完全に無くすか、仮に伸縮ジョイントが必要であっても橋台上のみに設置するように推奨している。

3.2 インテグラルアバット橋

具体的には、橋台部における伸縮量が21cm未満の場合は、基本思想に従って橋台部に伸縮ジョイントを設置せず、橋台は上部構造の伸縮を拘束するよう設計してはならないとされている。構造は、盛土上でフレキシブルな単列杭によって支えられている切り株状（Stub）のインテグラルアバットとなる。これは、1930年代から使用され、適用橋長も最大で285mとなっている。（図1、2）この構造形式には橋台部に伸縮ジョイントや支承が無く、踏掛版が端横桁にヒンジ結合されていて、これが温度による桁の伸縮により、背面盛土上で動くことになる。またジョイントを設ける場合も極力橋台部のみに設置するものとしており、写真1はこの趣旨に沿ってつくられたPC29径間連結合成箱桁橋（ $l=829\text{m}$ ）である。

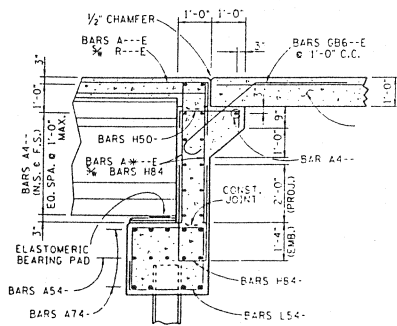


図1 米国における
インテグラルアバット

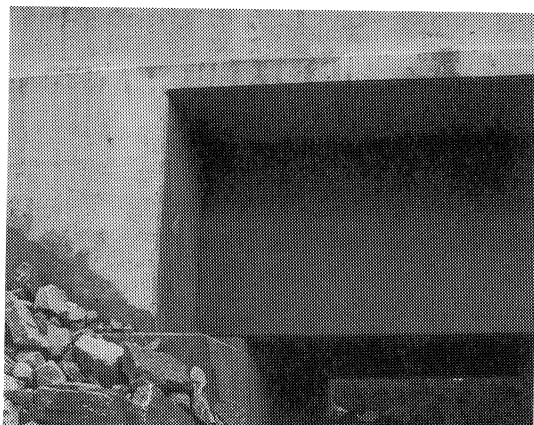


図2 インテグラルアバット橋橋台部

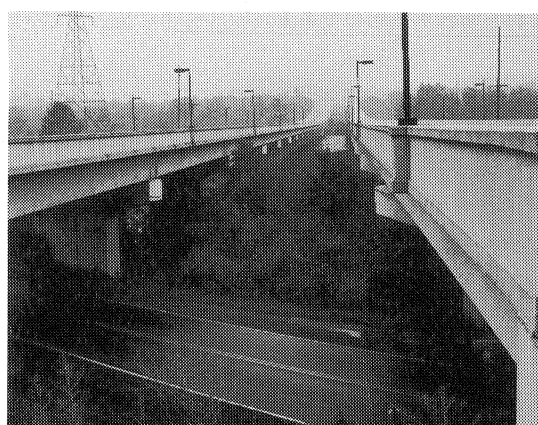


写真1 テネシー州ロングアイランドブリッジ

4、米国における設計上の配慮

4.1 二次力への対応

インテグラルアバット橋は不静定構造物であるため、クリープ、乾燥収縮、プレストレスによる弾性短縮、温度変化、不同沈下などによる二次的な力が桁内部に生じる。さらに本形式に特有なものとしては、盛土変位荷重、伸縮によって橋台裏込めが圧縮され生じる受働土圧、踏掛版摩擦力、舗装との接触面である端面部に生じる軸方向圧縮力がある。米国はプレキャストの国であり、弾性短縮については、特に設計上影響を及ぼさない。しかし、日本は場所打ちを基本とする国であり、日本で適用させようとなると、施工的に弾性短縮を逃がす工夫が必要となる。場所打ち箱桁橋としたナイベコシナイ川橋では、下部工バラベットと一体打ちとなる端横桁を打ち残す形で緊張し、緊張後横桁の施工を行うものとしている。コンクリート以外の土にかかわる二次力は、定性的にはわかっているが設計基準の中で定量的な評価はすんでいない。そこで、設

計上の制約条件、様々な工夫を行って、実設計でこれらを明らかにすることを回避している。

4.2 盛土に対する対策

土圧の計算にはクーロン式が用いるが、桁の押し込みによる受働土圧を最小にするため、裏込め材には精選した粒度の材料を用い、非転圧としている。踏掛版は橋台背面に雨水が浸入して裏込め土を流してしまうのを避けるとともに、裏込め材の固結を最小にし、裏込め材に活荷重が作用するのを抑えるために用いられている。土圧は面積に比例するため、橋台は可能な限り最小の高さにし、前面盛土は1:2の安定勾配を近づけている。

4.3 杭の対応

水平方向に作用する杭の曲げを低減させるため、H杭を使用しこの弱軸を橋軸方向に向けて断面力を小さく抑えている。鋼杭は活荷重温度など繰り返し荷重に有利となる。また岩に杭を打設する場合はプレボーリング工法を併用し、間隙に粒度調整された砂や礫を充たして横方向のバネを弱くしたり、計算水平方向移動量に相当する厚さのゴム系伸縮材をH鋼ウェブに張り付けてこれに対応することもある。

4.4 コンクリートのヤング係数

テネシー大学の調査によれば、温度による橋梁の伸縮量や発生応力は、計算値より非常に小さいものとなっていた。これら2次力が1年あるいは多年にわたって非常に緩やかに進行するために、コンクリートのクリープにより伸縮量や発生応力が低減されるからである。このような実橋の挙動を踏まえ、長期荷重に対するコンクリートのヤング係数を動的短期的荷重の場合に用いられる $3\,000\,000\text{lbs./in.}^2$ (約 $211\,000\text{kgf/cm}^2$)に対し、1/3の値に換えて内部応力の照査を行っている。また300ft(約90m)までの橋梁であれば、設計時に温度を考慮する必要がないとしている。

5、インテグラルアバット橋の状況

5.1 米国でのアンケート調査

オクラホマ州交通局のよって行われたアンケート調査によれば、回答のあった38州のうち29の州でインテグラルアバット橋を採用していた。報告された不具合としては、背面へ橋台が押し込まれ床版、端横桁、ウイングに亀裂が生じたこと、裏込め材に段差が生じたり、踏掛版が路面上方に持ち上がったことなどであった。また、施工上の問題点は、橋台前面盛土のためにクレーンが近くに寄れないことや橋台盛土を行った後にしか桁を架けられないことなどであった。不具合については、前章に述べた設計施工上の配慮を行うことによって解消された。

5.2 耐震構造としてのインテグラルアバット橋

米国における最もすすんだ耐震設計基準である AASHTO、ATC-6によれば、防災上国防上の要件によって分類する重要度分類で、重要な橋梁(IC=I)として指定されている橋梁で、最も大きな地震力を想定しなければならない耐震水準Dの地域に建設される橋梁に適切な構造形式として本形式を推奨しているが、これは在来の形式では伸縮ジョイントや支承が潜在的な破壊機構となるのに対し、これらを有していないからである。

5.3 踏掛版端部での変状

インテグラルアバット橋の橋台部に設けられた踏掛版端部では、踏掛版が桁の伸縮に従って背面盛土上を移動することにより、端部ではこれに追従できない舗装が盛り上がり、また隙間を生じることになる。しかし、実際に数百橋も自動車で走行した経験によれば、軽い擦過音が生じるだけで、橋梁端部の伸縮ジョイント上とは違い、振動騒音は無い。土工部であるため、段差による衝撃が土構造に吸収されているからであると思われる。この隙間から雨水等が浸入しても、踏掛版の下には土しかなく、支承や落橋防止装置など腐食してしまうようなものも無い。踏掛版が移動すると、舗装面上にはクラックが生じるが、温度変化による桁

の伸縮は年間を通した非常に緩慢な動きとして現れるため、走行車両の転圧により車両走行位置ではクラックは閉じてしまい、舗装の割れは面的に広がることはないようである。

6、日本での設計法

6.1 設計の基本姿勢

インテグラルアバット橋は、上部構造と下部構造を構造ごと個々に設計するのではなく、複合的一体的に設計することになる。この点で、「上部構造と下部構造が支承などにより明確に区別されていること」を前提条件としている道路橋示方書では包含し得ない形式となる。

6.2 設計上の配慮

今回、長万部工事事務所管内のナイベコシナイ川橋、オタモイ川橋を設計するにあたっては、前記4章の米国における設計上の配慮を踏襲し、盛りこぼし橋台と同様の安定勾配1:1.8の盛土を採用し、さらに橋台下を路床仕様として地盤変位を極力抑え、また橋台に作用する土圧を少なくするため、根入りを小さくするなどして可能な限り橋台高さを低くした（図3）。

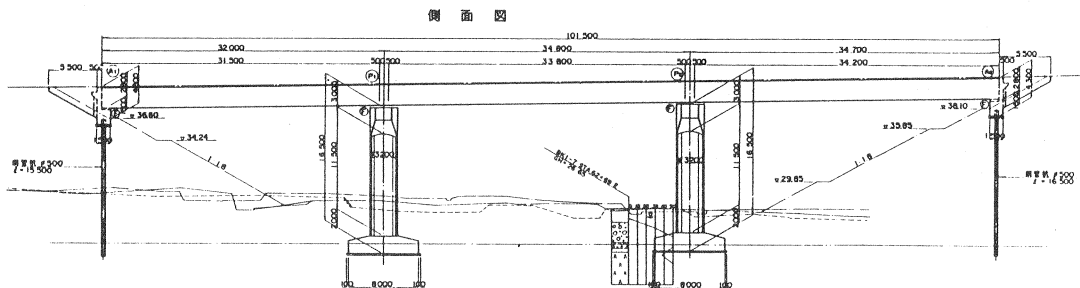


図3 オタモイ川橋橋梁一般図

6.3 動的応答解析

本形式を地震国日本で採用するにあたり最も懸念された事項は、地震水平力によって杭頭部に過大な力が働き、結合部の破損が生じるのではないかとということであった。これに対し、地盤を二次元連続体要素に、構造物を梁要素に置き換えて橋軸方向の最大応答解析を行った結果では、盛土地盤と杭が一体として挙動する1次モードが有効質量の40%程度となった（図4）。この結果、杭は余り水平抵抗に寄与せず、部材の設計としては震度法による静的解析値を用いれば十分安全側の設計であることがわかった。

※※ MODE 1 T=0.4592(S), F=2.178(HZ) ※※

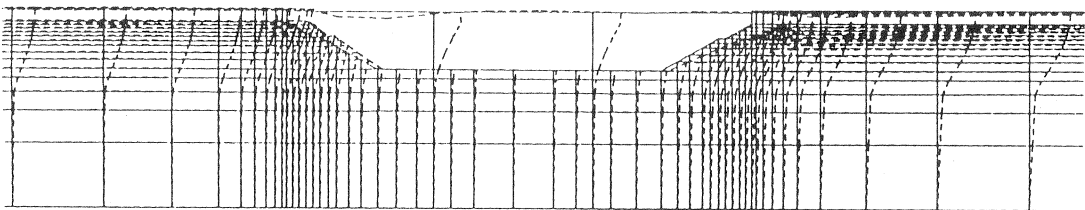


図4 オタモイ川橋動的応答解析結果（1次モード）

6.4 安定計算

安定計算の方法として、概略次の3つの手法がある。

- ① 地震時水平力は中間固定橋脚でもつ。杭は地震等で変位するため、これに伴う杭体応力度は満足させる。
- ② 前面地盤の塑性領域をゼロもしくは受働土圧を上限値とするバネとし、水平力は全支点で受け持たせる。
- ③ 桁端部背面の裏込め土への押し込みを考え、裏込め土の受働土圧を期待する。

米国における設計は③の手法によっている。踏掛版を設置して橋台背面への水の浸入を防ぎ、かつ裏込め土を厳選しており、上部構造の水平力を押さえるのに最も有効な背面受働土圧に期待すると、中間橋脚の水平力分担は小さくなり、最も経済的な手法となる。

6.5 連続化のためのバネ値の設定

前項①の方法が耐震設計上最も安全側の設計となる。設計も可能であるし日本になじみやすい設計法である。しかし、桁長が伸び100mを超えると、計算上発生するクリープ乾燥収縮温度など地震以外で杭の寸法が決定されてしまう。これは、盛土地盤のN値は5~15とされており、締め固まった状態のN=15で、拘束圧を考慮した正規のバネで計算してしまうと、地盤の抵抗により杭体に許容の2倍程度の応力度が発生してしまうからである。

このため、本形式を成り立たせるには、少なくとも前項②の方法などでクリープ乾燥収縮対し構造的に軟らかく抵抗するように、斜面前面のバネを軟らかく補正することが必要となる。JHにて高盛土上で一般的に用いられている盛りこぼし橋台では、杭の抵抗を十分担保するために、フーチング前面に10mの平場を設けるなどの諸工夫をしているが、インテグラルアバットでは、これとは全く逆に、インテグラルアバットの杭が「斜面上でありかつ浅い地盤」の軟らかいバネを有した杭とすることが必要であり、このことがPC橋の橋台部での連続化を可能とする「設計上のミソ」となる。

すなわちPC橋にとっては、PCの宿命であるクリープ乾燥収縮など構造系中心に向かって作用する力に対しては、内部応力を低減できうる構造となり、また、地震力については乾燥収縮によって低減されかつ、背面側の低減されない固いバネで抵抗できることになる。

先に示した2橋の試設計では、杭変位量の計算値は道示に示される15mm以下に収まる。バネ値を補正すれば杭の変位量に許容値は設けなくとも良いが、変位がたとえ大きくなっても、問題となるジョイント・支承は本橋にない。

6.6 上部構造の設計

インテグラルアバット橋の上部工設計は、通常の桁の設計と余り変わるものではなかった。これは、解析モデルとして、上部工端部に剛域を設定したフレーム構造で解くこととしたが、杭の剛性は上部工に比べ約0.4%しかなく、地震や温度乾燥収縮に起因する杭頭部の水平力、曲げモーメントは、杭体としては寸法が決まってしまうような大きなものであるが、桁端部に働く力としては小さく、フーチング、桁端部の配筋も最小鉄筋で決定されていた。インテグラルアバットの特徴といえるのは、杭が一系列杭となり通常の組杭形式橋台に比べて鉛直方向に柔らかな基礎構造となるため、橋台の移動、沈下を起こさぬよう杭は支持杭とする必要があることと、杭の軸方向のバネを見込み、相当程度の支点沈下による桁への曲げモーメントの増加を考慮する必要があることといえる。

7、インテグラルアバット橋のメリット

7.1 維持管理費の節減

北海道では、ここ数年のスパイクタイヤ禁止条例の施行により、冬期路面確保のための凍結防止剤散布量が多くなってきている。交通量のあまり見込めない路線であり、構造物に対する塩害損傷など将来に予想される維持管理費の削減が大きなテーマとなるが、インテグラルアバット橋はジョイント補修を要せず、塩害損傷にタフな橋梁となる。逆に言うと、補修すべきものが無くなるのが真の意味での維持管理費節減といえる。

7.2 工費の節減、省力化

オタモイ川橋を例に比較をすれば、次の2案が比較された。

- ①、橋長33mのPC単純合成桁+高さ17.5mのラーメン橋台(斜角75度)2基
- ②、橋長102mのPC連結合成桁+高さ16.5mの橋脚2基+アバットの杭2基

①案は通常、JHが経済的と判断し施工する橋梁形式である。橋台を河川の斜角なりにつくり、管理用道路をラーメン橋台の中に入れて橋長を短くする。一方、②案は図3に示したように、盛土を盛りこぼし状に仕上げ、法肩まで桁をのぼすことにより橋長が3倍になっている。ラーメン橋台の工事費は非常に高く、②案は上部工橋面積が3倍になっても、橋梁単体で約1割の経済性を有していることがわかった。また一般的にいっても、中規模程度以上の橋台を有する橋梁において、イニシャルコストの節減が可能となっている。

概略の比較の中では考慮していないが、橋梁上部工費の10%以上を占める橋梁付属物の多くを削除することができるため、単位あたりの上部工費は減少するものと思われるし、また、上部工面積が3倍になれば当然スケールメリットも生じると考えられる。さらに、支承伸縮ジョイント耐震連結装置は有形無形の調整業務が要求されるので、これが構造的にないインテグラルアバット橋は設計施工上の省力化も推し進められる。

7.3 周辺環境との調和

許容できる範囲内での橋梁景観への配慮はどの路線においても忘れてはならないが、比較的近い視点から見られることの多い中規模PC橋梁は、インテグラルアバット橋にすることによって、

- ① 桁と中間橋脚しか見えない。
- ② 盛土構造により、桁下空間が大きなる。
- ③ 煩雑になりがちな桁端部が納まる。
- ④ 経年変化に耐え、汚れない。

により、どの橋梁にも適用できる橋梁景観コンセプト、「シンプル・クリア・クリーン」が実行できる。

7.4 橋梁改良への応用

インテグラルコンストラクションを既設橋梁の連続化に用いると、新規に橋梁を設計するときより長い多径間化が簡易に実現できるが、JH札幌ではRC(7~8)径間連続橋3連を、RC22径間連続橋(L=360m)へ改良を行っており、PC橋でも同様の工事を予定している。

8、むすび

札幌建設局では旭川工事事務所管内の北海道縦貫道(旭川鷹栖~和寒)約30kmにおいて、本稿で述べたインテグラルアバット橋も用いながら、埋設ジョイントも含むいかなる伸縮ジョイントも作らないことを目標に橋梁計画を立案中である。耐久性、経済性、景観などの諸課題は、北海道の高速道路のみならず公共物たる橋梁共通のものであり、橋梁設計思想、すなわち、いかに橋梁を計画し設計するべきかということを深く念じて橋梁に対峙するとき、本稿に示したインテグラルコンストラクション、インテグラルアバット橋はその一つの解答を示すものと考えている。

関連文献、参考文献

- 1) 高橋昭一、橋梁設計思想としてのインテグラルコンストラクション、高速道路と自動車1994/4
- 2) Martin P. Burke, Bridge Deck Joints, NCHRP Report 141 TRB
- 3) Tennessee DOT, Tennessee Structures Memorandum 33, 45
- 4) Edward P. Wasserman, Aesthetics for Short- and Medium-Span Bridges, NCHRP Report TRB