

アンコール時代の石橋の形態的、構造的特徴*

Morphological and Structural Characteristics of the Stone Bridges in Angkor Era, Cambodia

松村 博**

By Hiroshi MATSUMURA

Abstract

The arterial roads in every direction from the central part of the royal capital were improved in the Angkor dynastic age and played an important role in economy and military affairs. It has been thought that in its most prosperous period, many stone bridges were built over straight roads extending in every direction from the royal palace.

Many stone bridges on these arterial roads were built in order to ensure stable transportation routes. In this paper, first, I described for the morphological characteristics of those stone bridges. The stone bridges were constructed on the corbeled structure, which caused large obstruction of the cross-sectional area of river. Therefore it is thought that to secure the structures during a flood, the bridge heights of relatively large-scaled bridges could be built higher so their bridge could avoid being exposed to flowing water and their width larger to resist the lateral load caused by flowing water power.

To prove this theory, I calculated the flowing water pressure loaded on the bridges when the water level rose to estimate the safety of the structure of the bridges.

As the result, I think that I was able to show the direction of the analysis.

1. 石橋の分布と形態的特徴

(1) 石橋の分布

カンボジア・シェムリアップ郊外、クメール王朝の王宮であったアンコール・トムから半径 100 km ほどの範囲に、その最盛期に建設されたと考えられる石橋が数多く残されている。その大半は長さが 20m ほどの小さなものであるが、中には 100m を越える長大橋もある。

これらの橋はフランスの植民地時代から紹介されていたが、近年広範囲な調査が可能になって、石橋がアンコールの王都から四方へ延びる道路上に分布しており、王朝の地方支配や軍の遠征に大きな役割をはたしていたことがフランス極東学院のブルギエ(Bruno Bruguier)などの調査によって明らかになってきた¹⁾。また日本の調査団による調査も行われている²⁾³⁾⁴⁾。

橋は 5 つのルートに分布している。アンコールの王宮を中心に東方向へ 3 本、すなわち現在の国道 6 号線に沿った南東ルート、ベンメリアを通して国道 66 号線に沿った東ルート、ベンメリアから分岐して北北東に向うルート、そ

して西方向には北北西と北西にタイ方面へ伸びる 2 本のルートである。

これらの道路は、11 世紀の前半のスールヤヴァルマン 1 世の時代や 12 世紀前半にアンコール・ワットを建設したスールヤヴァルマン 2 世の時代に整備されたと考えられているが、当時の橋は主に木橋であったようである。1177 年にヴェトナムのチャンパ軍が侵攻してきた際に多くの木造の橋が焼き落とされたために、その後に王位に就いたジャヤヴァルマン 7 世によって石橋で復旧されたと考えられている。

石橋の近くにジャヤヴァルマン 7 世が建設したとされる宿駅や施療院などの施設が存在することもその根拠とされている。

筆者が行った調査の石橋のリストと概略地点を表 1 と図 1 に示す。

(2) 南東ルートの橋

シェムリアップからプノンペン方面へ向う国道 6 号線を進むとアンコール王朝初期の王都があったとされるロリュオス遺跡群を過ぎた辺りからコンボン・クデイの間の左手に、次々と 10 橋ほどの石橋を見ることができるが、いずれも長さが 20m 程度、高さが 2~3m ほどの小さなもの

*keywords : アンコール時代 石橋 構造特性

**正会員 (株)ニュージェック

表-1 アンコールの橋一覧(2007. 12調査) :[]内の数字は文献2,3)参照

ルート	番号	橋名	橋長(径間数)	幅員(有効)	高さ	高欄	道路	その他
1. 東南ルート	1	Spean praptos	[85m (21)]	16 (15弱)m	[9.5m]	ナーガ俊 砂岩の高欄	車通行止め	仏が削り取られている
	2	Spean Khpos		7.3 (6.5)m		高欄なし		
	3	Spean Kilou Ta Chhaen		6.8 (5.8)m				
	4	Spean Svay	22.4m	7.7 (6.5)m				
	5	Spean Khmoch Ta Han	26.2m	8.5 (7.3)m				
	6	Spean Phum O	21.6m	8.8 (7.8)m				
	7	Spean Ta Meas	19.2m	8.8 (7.8)m				
	8	Spean Thma	18.4m	8 (7)m				
2. 東ルート Beng Mealeaより東へ	1	Spean Tnot	30.4m	6 (5)m		砂岩の高欄 端部に台座	現道路 (66号線)	
	2	Spean Teap Chey	16m	6 (5)m		高欄なし	通行止め 石敷(ラテライト) 撤ぼれ	
	3	Spean Khmeng	28.8m	9.2 (8)m		砂岩の高欄	現道路 (66号線)	ナーガ仏 3 体
	4	Spean Ta Ong	[65m (14)]	13m	[7.5m]	砂岩の高欄	現道路 (66号線)	ナーガ仏(東南角) 下流側にラテライトの護岸 上流側の橋脚磨り減り
	5	Spean Bak	12m	9 (8)m		砂岩の高欄		ナーガ仏の破片
	6	Spean Kvao	21.6m (7)	7.4 (6.5)m		砂岩の高欄	現道路 (66号線)	ナーガ仏
3. 北北西ルート	1	Spean Top (中央)	[全 180m (36)]	16 (15弱)m	[9.5m]	ラテライトの高欄	現道路 (68号線)	ナーガ仏の台座(ラテライト) スレン川上流部 上流側の橋脚磨り減り
	2	Spean Khmeng		9.6m		高欄なし		道路廃絶
4. 北西ルート	1	Spean Sraeng	30.4m (11)	7.4 (6.4)m		ラテライトの高欄 、台座	現道路、 前後直線道	
	2	Spean Stung Sreng	80m以上 [120m]	不明 [15m]	[12m]	ラテライトの高欄 一部残存	石敷(ラテライト)	下流側に堰堤築造 北側の石組み確認
	3	Spean Memai	50m以上	8m	3m程	高欄なし		
5. アンコール内	1	北門の橋	5)					ラテライトの板石を貼り付け
	2	Spean Thma	[39m]	[12.5m]	[4.4m]		通行不可	全て砂岩

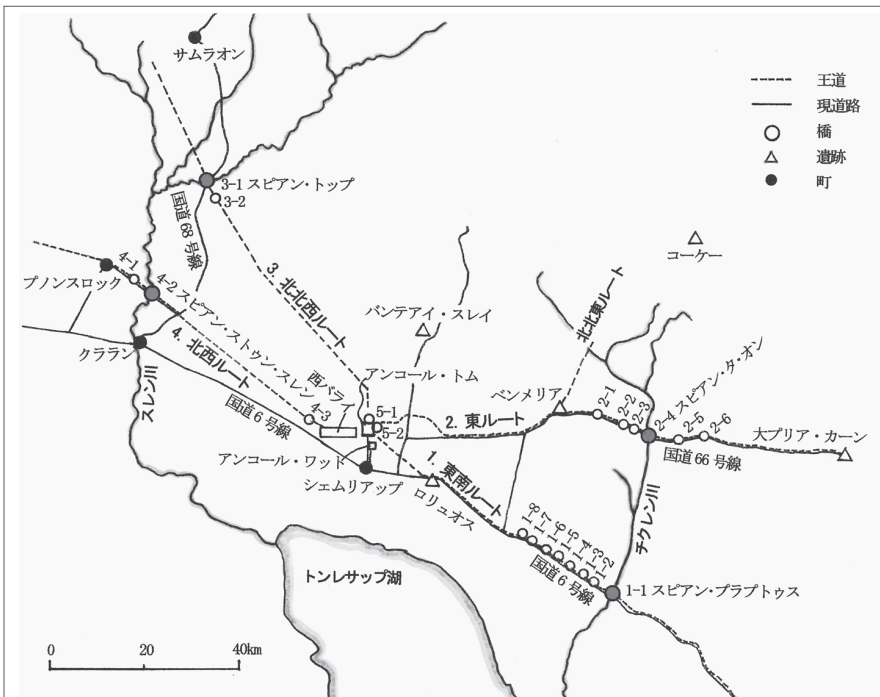


図-1 アンコールの橋の位置図 (作図: 松村)

である。

ジェムリアップからおおよそ 50 km離れたコンボン・クデイにはスピアン・プラプトゥス(Spean Praptos)という石橋(写真-1)があり、つい 2~3 年前まではカンボジアの最重要幹線の一環としての役割を果たしていた。この橋は地元ではスピアン・コンボン・クデイと呼ばれている。スピアンとは橋のことで、コンボンとは船の着く所という意味があり、プラプトゥスとは方向を示すという意味を持ってお

り、この位置は水上と陸上の交通の結節点であると言える。

スピアン・プラプトゥスの構造体は全てラテライトのブロックが空積みされたものと考えられる。ラテライトは、紅土とも呼ばれる多孔質の石材で、固く成形しにくいいため主として建物の基盤材として使われている。

この橋の長さは約 85m、21 径間からなり、橋脚幅は 1.5m ほど、流水幅は 2m ほどで、橋台部の石積みを加えると、全体の流水幅は 50% ほどしかなく、極めて河積阻害率の大きい橋である。それは構造的な制約に要因がある。上部の橋体を支える構造頂部ではラテライトのブロックを徐々に迫り出して両側からもたれかからせるようにした、持ち送り構造で構成されている。

アンコールの建築には真のアーチは使われていない。あの壮大なアンコール・ワットやバイヨン寺院も全てせり持ち構造で作られている。このため大きなスパンを構成することができず、膨大な量の石を積み上げてヴォリューム感をあふれる構造体ができあがった。芸術作品としては見る人を圧倒する迫力を生み出しているが、構造としては未発達な状態であったといえる。



写真-1 Spean Praptos (南東ルート) 下流側側面 (撮影: 松村 2007. 12)



写真-2 橋詰のナーガ像



写真-3 Spean Kilou Ta Chhaen(南東ルート)



写真-4 Spean Thma(南東ルート)

カンボジアの気候は雨季と乾季がはっきりしていて、シエムリアップ周辺のトンレサップ湖へ流れ込んでいる川は乾季にはほとんど水の流れがないが、橋脚の下流側に残っている水位の痕跡から判断すると、雨季には河床から5m位まで水位が上がるがあると推測される。ただ、水位データを得ていないので、その頻度はよくわからない。

これほど河積阻害率が大きいと大雨の時には橋の上下流でかなりの水位差が生じて、流水孔の上付近まで水がかかるがあると推測され、橋面が周辺の道路や宅地よりかなり高くつくられているのは、流水断面を確保するためであると考えられる。

スピアン・プラプトゥスの幅は全幅で16mほど、有効幅で15m弱になっている。同じ道筋に架かる小規模な橋の幅が全幅で約7m、有効幅は6mほどで、その間の道路幅も同じような状態であるから、この橋が異常に広い幅を持っていることになる。

このように流水幅の狭い橋では大雨の時などには上下流の水位差が大きくなり、その分の水圧が橋にかかることになるから、それに耐えるためには橋の上部の重量を重くして、石どうしの摩擦抵抗を大きくする必要がある。このため水量が大きく、橋の高度が高い橋ほど橋の幅を広くす

る必要があったと考えられる。いくつかの橋を比べてみると、川底からの高さが大きい橋ほど橋の幅が広がっている傾向が窺える。また橋面を高くしたのも橋体の重量を大きくするためであろう。

スピアン・プラプトゥス以外の南東ルートの橋もラテライトを積んだ河積阻害率の大きな構造になっている(写真-3、4)。当時の王道は雨季においても水没することがないような高さに盛土をして造られたはずであるから、上流側に溜まった水を一定量、下流側へ抜く必要があることから乾季には水はなくても雨季には顕在化してくる小さな川にも橋が架けられたと考えられる。結果として道路盛土によって一定の水が上流側に貯留されることになったはずであるが、これらの道路や石橋がダムや堰の役割を果たすように意図的に造られたとは考えにくい。

スピアン・プラプトゥスの橋台部にそって上下流へ10mほどにわたって階段状の石積みが見られるが、ブルギエは、橋の所では意識的に川幅を拡げ、川の流れを固定させるために石積みを造ったと説明している¹⁾。

一方この石積みは川へ接近するための施設でもあったと考えられる。橋のたもとは船着場で、荷揚場があったとされ⁴⁾、川で沐浴するための場所であった可能性もある。

スピアン・プラプトゥスには砂岩でつくられた立派な高欄がある。地覆石の上に石台が置かれ、その上に高さ 40～50 cm のかまぼこ型の石が並べられているが、これはナーガという蛇の神の胴を表しており、橋の 4 隅に九頭の蛇の頭部の彫刻が据えられている。この彫刻の中央には瞑想する仏の姿が彫られていたはずだが、削り取られてしまっている(写真-2)。

(3) 東ルートの橋

ベンメリアからコンボン・スヴァイの大プリア・カンまではほぼ真東へ向う、現在の国道 66 号線に沿ったルートには 10 数橋が残されている。その中で最大の橋がスピアン・タ・オン(Spean Ta Ong)で(写真-5、6)、スピアン・プラプトゥスが渡るチクレン川の上流にあたっている。

橋長はおよそ 65m、幅員は全幅で約 13m、高さは 7m 強の規模をもっている。径間数は 14、橋脚幅と流水幅はともに 2m 弱で、河積阻害率は 50%ほどに達する。

この橋では特に下流側に、水切りのような、橋脚の基部を流れの方向に階段状に突き出していく構造が造られており、橋下と橋脚から 5m 以上の範囲に石敷きが設けられている。また橋のたもとに造られた石の階段からさらに下流側にラテライトのブロックを積んだ施設がある。これは橋でせき止められた川の流れが急流となって河岸に当た

るためにそれを守る護岸の役割をもたせた施設であると考えられる。スピアン・プラプトゥスではこのような施設は見られなかったが、上流のスピアン・タ・オンでは雨季の急流による橋脚周りの洗掘を防止することや河岸を防護することが必要であると考えられる。さらに橋脚の上下流を見比べると、上流側の橋脚の下部分がかなり削られて、すり減っている。雨季にはかなりの水位差と土砂交じりの急流が発生すると推測される。

ベンメリアからスピアン・タ・オンまでの 10 km 余の間に 3 つの比較的大きな橋がある。中でもスピアン・タ・オンに最も近いスピアン・クメン(Spean Khmeng)(写真-8)と呼ばれる橋は保存状態がよく、そのまま国道の橋としての役割を果たしている。橋長は 35m ほど、幅員は全幅で 9m ほどあり、砂岩製の立派なナーガの高欄が付けられている。親柱の位置に九頭のナーガの彫刻があり、その中央に仏の姿がはっきりと残っている(写真-9)。

スピアン・タ・オンの橋詰にも同様の石像(写真-7)があり、そこから一つ東のスピアン・バク(Spean Bak)とスピアン・クヴァオ(Spean Kvao)にもこのナーガ仏の断片があり、これらの橋の建設年代が特定できる貴重な史料であるばかりでなく、美術品としても価値の高いものである。



写真-5 Spean Ta Ong(東ルート) 下流側側面



写真-6 Spean Ta Ong(東ルート) 上流側側面

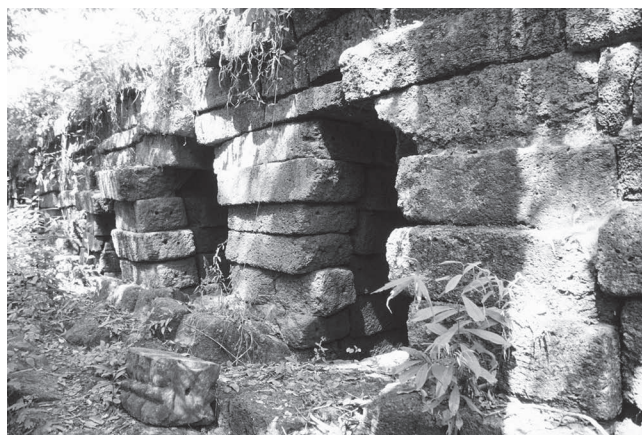


写真-7(左) Spean Ta Ong 橋詰の仏像

写真-8(中央) Spean Khmeng 下流側

写真-9(右) Spean Khmeng 九頭のナーガの光背をもつ仏像

(4) 北北西ルート of 橋

アンコールの王宮から北北西へ直線距離にしておよそ70 kmのところにスピアン・トップ(Spean Top) (写真-10、11)という大きな石橋がある。この橋は現在も国道68号線の橋として機能しており、シェムリアップからは国道6号線で北西へ、クラランから分岐してサムラオンへ通じる68号線で40 kmほど北上した地点にある。

幅は16mほどあり、3箇所に分かれていて、その長さを合わせると200m近くにもなり、アンコールの橋としては最大のものである。ここはスレン川(Stung Sreng)の上流部にあたり、蛇行しながら流れる広い河川敷を一定の高さを確保しながら渡っている。

他の橋と同様、頂部を持ち送りにされた橋脚が橋体を支える構造で、河積阻害は大きい。ブルギエはこのような構



写真-10 Spean Top(北北西ルート) 下流側側面

造上の欠点を、流水部分をできるだけ分散することによって水の抵抗を緩和したと解説している¹⁾。上流側の橋脚の石積みの角が、下流側に比べて、相当地にすり減って丸くなっていることから、かなり激しい水流が想像される。

橋の高欄が部分的に残っていた。石材はラテライトであるが、かまぼこ型の断面形になっていることからナーガの胴部を形取った欄干が続き、橋端に石像があったと想像されるが、石像は見つけられなかった。

このルートには、他にもいくつかの橋の存在が報告されているが(写真-12)、現在このルートは分断されていて、隣の橋へいくのにも相当迂回しなければならない。

(5) 北西ルート of 橋

アンコールの北門を出て、西へ進み、西バライの北西角辺りから北西へ進む王の道もあった。西バライから少し離



写真-11 Spean Top(北北西ルート) 上流側側面



写真-12 Spean Khmeng(北北西ルート) 側面



写真-13 Spean Memai(北西ルート) 側面



写真-14 Spean Stung Sreng(北西ルート) 橋上



写真-15 Spean Sreng(北西ルート) 側面

れたところにスピアン・メマイ (Spean Memai) (写真-13) と呼ばれる長い石橋が残っている。全長は確認できなかったが、少なくとも 50m は越えている。高さは 3m ほどで、幅は 6m ほどである。

このルートを北西へ延ばしたところにスピアン・ストゥン・スレン (Spean Stung Sreng) (写真-14) と呼ばれる大きな橋がある。ポル・ポト政権時代に下流側に道路兼用の堰堤が築かれたため、現在その全容を見ることはできないが、上流側の石組みの一部と橋上の石敷きを確認することができる。かつては 100m を越える長さで 15m ほどの幅があり、高さも 12m ほどの大きな橋であったようである。この橋の欄干も残された石材からラテライト製であったと考えられる。

この橋の少し北西にスピアン・スレン (Spean Sraeng) (写真-15) と呼ばれる橋も残っていた。橋長は約 30m で、11 径間、幅員は全幅で 7m 強。地覆石の上にラテライト製のかまぼこ断面の細長い石が残っており、同じ形の石が橋の下にも散らばっていて、かつてはナーガの欄干があったと考えられる。2つの橋はクラランから 10 km ほど北上、直角方向にプノンスロックへ向かう直線の道で 10 km ほど進んだところにあるが、この道は古い王道の状態をよく残しているように見受けられた。

(6) 王宮の橋

アンコールの王宮に隣接したところにも石橋がある。アンコールの東側、勝利の門から少し東にスピアン・トゥモ (Spean Thma) (写真-16) と呼ばれる、全てが砂岩で造られた石橋の遺構がある⁵⁾。古くはこの橋のところにシエム



写真-16 Spean Thma(勝利の門の東)



写真-17 アンコール・トム北門の橋

リアップ川の本流があり、川の流れが変わったために放棄されることになったと説明されることが多いが、シエムリアップ川が千年足らずでこれほど深く掘られたとは考えにくく、深い谷には大きな木橋が架けられていたと考えた方が良さそうである。

アンコール・トムの北門を出たところにも石橋(写真-17)が架けられている。東西南北の門前では唯一流水を渡る橋である。現在の橋は成形されたラテライトのブロックが整然と積まれた丁寧なつくりの橋に見えるが、詳しく見ると、橋の本体はコンクリートで造られ、表面に板石を張っただけの、まさに「張りぼて」の石橋である。アンコールの保存修復には、いろいろな国が協力していて、その方法をめぐってもいろいろな考え方、手法があるようだが、北門の橋の復元は文化財修復の悪例であると言える。

(7) 石橋の役割と特徴

アンコールの石橋群はいずれもスパンは短く、河積阻害率の大きいもので、その構造上の差異はほとんど認められない。また、石橋群がダム役割を持っていたとする説もある。堰として使われたのなら上流側に堰板をはめ込む施設が必要であるが、そのような痕跡は見当たらない。またダムアップした水を誘導する水路もなさそうで、ダムとしての役割は意図されていなかったと考えられる。

恒常的な道路を確保することは王国の統治には不可欠なことであった。また対外的な遠征にも必要であった。当時の象の軍団を通すために強固な石橋を架けたと説明されることもあるが、これほどの石の重量のある橋本体を支えているので、2〜3頭の象を通すことはたいした負担ではない。木橋のように寿命の短いものより、メンテナンスが少ない石橋を選んだと考えた方がよい。

石橋の建設には莫大な資金と労働量が必要だったはずであるから、アンコール王朝の絶頂期の王にしかできなかった事業であったいえる。石橋の分布が王宮からほぼ 100 km 以内に限られているのは、これが当時の王権の財政力と支配力の限界を示していると考えられることもできる。

石橋の建設がジャヤヴァルマン 7 世の時代に行われたとされているが、その例証の一つが橋の 4 隅に据えられた九頭のナーガに守られた仏像の存在である。スピアン・プラプトゥスでは削り取られているが、東ルートではスピアン・タ・オンなど数橋にその姿が残っており、これらの橋の建設が仏教によって国を治めようとした王の時代のものであることを示唆している。そして次のジャヤヴァルマン 8 世の時代に行われた廃仏毀釈が東ルートにまで及ばなかったことになり、その意味でも東ルートの橋の仏像は貴重な文化財であると言える。

2. 石橋の構造的安定性の解析

(1) 解析の意義

前章において、東ルートのスピアン・タ・オンや北北西ルートにあたるスピアン・トップなどの橋は増水期にはか

なり激しい濁流にさらされていると想像されること、そしてこのように河積阻害率の高い、すなわち流水幅が極端に狭い橋では増水時には上下流に大きな水位差が生じて、その分、橋に流水力による横荷重が加わるため、橋の上部の重量を重くして、摩擦抵抗を大きくする必要があり、かつ橋体への水圧を軽減するために、橋の高さを高くするとともに、幅を広くして橋体の体積、ひいては重量を大きくしたのではないかという想定をした。

アンコールの石造構造物には真のアーチは適用されておらず、持ち送り構造によって石を両方からもたれかからせるようにして構造を維持しており、必然的に上から大きな荷重をかけることによって構造物の安定が確保されることになる。したがって大量の石材を積むことになり、構造的には無駄の多い空間構成になっている。

橋においてもこのような構造上の特徴が指摘できる。しかし今日までその構造が保ちえていることは何らかの必然性があり、構造的な工夫があったはずである。それが圧倒的な石材の投入であり、その重量によって構造的安定性を確保してきたと考えることができる。

これについて数値的な裏付けを行うべく、一定の仮定の下ではあるが、安定性を確認するために以下のような試算を行って、このような構造についての議論を深めるための資料を提示することとした。



写真-18 スピアン・プラプトゥスの部分形状

(2) 解析のモデルと条件

ここで解析の対象としたのはスピアン・プラプトゥス（写真-1）で、その橋長は85m、橋全幅は16m、橋面の高さは河床から平均約8mで、21径間から成る。中央付近の形状は写真-2のようになっており、橋脚は全面にわたって同じ形状とし、現地での概略測定によりその平均幅は1.5m、純径間すなわち水流の幅は2.0mとした。

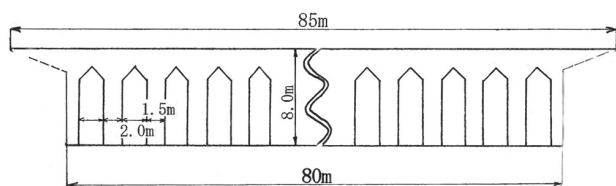


図-2 スピアン・プラプトゥスの全体モデル

計算を簡略化するため、橋周辺の川の断面を長方形として、河床の幅を80mとした（図-2）。そして各径間の形状は図-3のように模式化した。

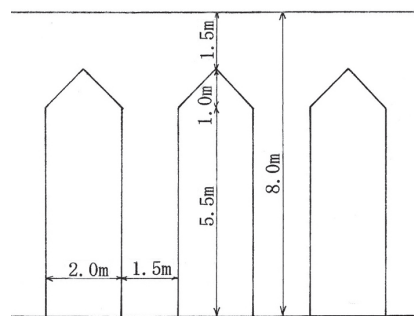


図-3 スピアン・プラプトゥスの部分モデル

橋面は周辺地盤に比べてかなり高くなっているが、周辺の詳しい地形的な情報がないため、その高低差は不明である。また上流側の堤防の状態もよくわからないが、おそらくは橋脚の最上部か、その上の持ち送り構造の部分より上に水位が上がることはないと思われる。すなわち、充腹の橋体に流水力が及ばないように橋面高が上げられていると考えられる。

したがって、今回の計算においては上流側の最高水位を持ち送りが始まる高さまでと想定した。

周辺部、特に上流側の地形によってはもう少し高い位置まで水位が上がる可能性もあるが、それは想定外とした。

橋を観察すると、下流側の橋脚側面には泥水の痕跡が残っており、かなりの頻度でここまでの水位上昇があると考えられる。この高さは河床より約4mであるが、さらにその上まで水が上がることもあると見られる。

これらの観察から、以下の水位計算では、下流側の水位が4mとなるとときと上流側の水位が橋脚の上まで約5.5mにまで達したときを想定して下流側の水位が4.5mのときの2つのケースで行った。

なお、マッシュな構造物に対する安定性の検討では、通常は滑動と転倒についての検討を行うが、転倒に対する安定性はほとんど問題にならないと考え、以下では橋脚基部での滑動に対する安定性のみを検討することにした。

(3) 橋脚に加わる流水力

解析を簡単にするために、水路断面を図-2のように、幅80mの長方形断面と仮定したから、

$$A=bh, \quad R=bh/(b+2h)$$

A : 流水断面積、 R : 径深、 h : 水深、 b : 水路幅

上述のように下流側の水深が4mと4.5mのときを目安に以下の計算を行う。

a) 下流側の平均流速

Manning の平均流速式を適用した⁶⁾。

$$V=(1/n)R^{2/3}I^{1/2} \quad (\text{式-1})$$

V : 平均流速、 n : 粗度係数、 R : 径深、 I : 水面勾配

・ $h=4\text{m}$ のとき、 $A=80\times 4=320\text{m}^2$ より、 $R=3.64$ となる。
 北部山地からトンレサップ湖へは 1000 分の 1 程度の勾配になっているとされている⁷⁾から、 $I=1/1000$ とし、
 河床の状態は自然河川で、蛇行していて淵瀬もあるから、 $n=0.04$ と仮定する⁶⁾と、流速は (式-1) より
 $V=1.85\text{m/sec}$ となる。さらに、
 $Q=A\cdot V$ より、全流量 $Q_0=592\text{m}^3/\text{s}$ となる。
 1 径間あたりに流れる流量 Q は、
 $Q=592/(80/3.5)=25.9\text{ m}^3/\text{s}$
 ・ $h=4.5\text{m}$ のとき、 $A=80\times 4.5=360\text{m}^2$ より、 $R=4.045$ となる。

$I=1/1000$ 、 $n=0.04$ と仮定すると、流速は (式-1) より

$V=2.01\text{m/sec}$ となる。さらに、

$Q=A\cdot V$ より、 $Q_0=724\text{m}^3/\text{s}$ となる。

そして、1 径間あたりに流れる流量： $Q=31.7\text{ m}^3/\text{s}$ となる。

b) 橋脚に作用する力を表す式

洪水時の水流は充腹の橋体にまでは達しないと考えたから、開水路状態として解析する。各橋脚間を一定間隔としたから、下図のように 1 つの水路として模式化した。

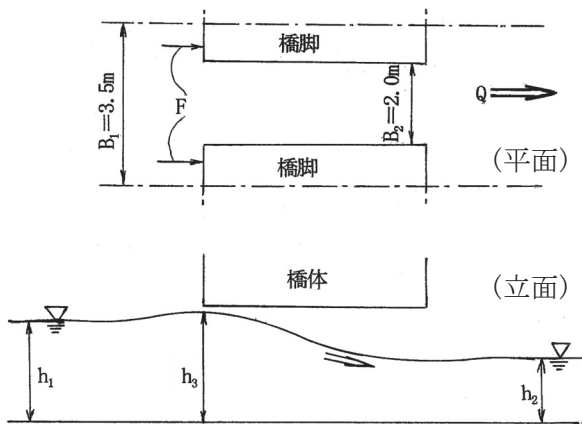


図 - 4 解析のモデル

そして、上下流の水流には、次のような運動量式から導かれた式が成り立つとした⁸⁾。

$$\rho v_1 Q + (1/2) \rho g B_1 h_1^2 = \rho v_2 Q + (1/2) \rho g B_2 h_2^2 + F \quad (\text{式-2})$$

ρ : 流体の密度、 v_1 : 上流側の流速、 v_2 : 下流側の流速、

B_1 : 上流側の水路幅、 B_2 : 橋脚間の水路幅

h_1 : 上流側の水深、 h_2 : 下流側の水深、

F : 流体が橋脚から受ける力 (橋脚に作用する力)

F の評価として、 $F=1/2(\rho g h_3^2 (B_1 - B_2))$ (式-3)

とし、ここでは、 $h_3=h_1+\Delta h$ と橋脚による堰上げ量 Δh を加えることとした。

なお、 Δh の計算には以下のような D' Aubuisson の式を適用した⁹⁾。

$$\Delta h = \frac{Q^2}{2g} \left\{ \frac{1}{c^2 B_2^2 (h_1 - \Delta h)^2} - \frac{1}{B_1^2 h_1^2} \right\} \quad (\text{式-4})$$

$$\frac{\Delta h}{h_1} = \frac{v_1^2}{2gh_1} \left\{ \frac{1}{c^2} \left(\frac{B_1}{B_2} \right)^2 \frac{1}{(1 - \Delta h/h_1)^2} - 1 \right\}$$

c) 計算の手順

① 下流側の水位 h_2 を与え、式-1 より Q を求める。

② h_1 を仮定して、式-4 より、 Δh の収束計算をする。

③ 式-3 より、 F を求め、左右の差が許容値になるまで、繰り返し計算を行う。($|M_1 - M_2| \leq \varepsilon$)

④ 収束しない場合は h_1 を仮定し直し、②～③を繰り返す。

d) 計算の結果

上記の計算の結果、次のような値を得た。

・ $h_2=4.0\text{m}$ のとき

$Q=25.9\text{ m}^3/\text{s}$

上記の収束計算の結果、

$h_1=4.71\text{m}$ 、 $\Delta h=0.715\text{m}$ を得て、橋脚にかかる作用力は、 $F=216\text{ kN}$ となり、tf 換算では 22.1tf となる。

・ $h_2=4.5\text{m}$ のとき

$Q=31.7\text{ m}^3/\text{s}$ で、計算の結果、

$h_1=5.34\text{m}$ 、 $\Delta h=0.84\text{m}$ を得て、橋脚にかかる作用力は、 $F=280.7\text{ kN}$ となり、tf 換算では 28.6tf となる。

(4) 橋脚の抵抗力と安全率

a) 橋脚底面の摩擦抵抗

大きな水平方向の流水力に対して橋体を維持するためには橋脚石積底面の摩擦抵抗がそれを上回っていなければならない。以下では 1 橋脚あたりの自重によって生じる摩擦抵抗力を算定して、流水圧に対する比率、すなわち横移動に対する安全率を求めることにする。

計算の前提として、橋体を構成するラテライトの単位体積重量の値が必要である。1 つのデータとして、西アフリカ産のラテライトの単位体積重量を測定した結果として $2.6\sim 3\text{tf}/\text{m}^3$ の値が得られている。この変化は吸水率が $2\sim 8\%$ の岩を測定して、その関係を求めたもので、当然吸水率が高ければ、軽くなる¹⁰⁾。

アンコール近郊の石切場から採掘されたラテライトを用いて、摩擦試験が行われている¹¹⁾が、その中で、 $300\sim 300\sim 100$ の試験体 3 体を用いており、その重量平均は 21.3 kg f となっていることから、単位体積重量は 2.37 となる。

これらを参考にして、今回の計算では単位体積重量を 2.5 とした。そして石積の空隙率を 20% と仮定すると、橋の石積の単位体積重量は $2.0\text{tf}/\text{m}^3$ となる。

1 橋脚あたりの重量は、橋脚 1m 幅あたり、

$$(5.5 \times 1.5 + (1.5 \times 3.5) / 2 \times 1 + 1.5 \times 3.5) \times 2.0 = 29.5\text{tf}/\text{m}$$

橋の幅は 16m ほどであるから、総重量は 472tf となる。

次にラテライトの石積の摩擦係数を仮定しなければならないが、文献 11) では、ラテライトの摩擦係数の測定値として 0.73 を得ている。

橋脚の石積は平面的に積まれており、かみ合わせがほとんどなく、接触面も実験の供試体のように密着していないと考えられるから、摩擦係数はかなり割り引いて設定しなくてはならない。そこで、石の加工面のばらつきも考慮して、摩擦係数を 0.5 とすることにした。

b) 安全率の計算

以上のような数値上の仮定において、水平作用力を受けた場合の安全性を確かめてみる。

下流側の水深が 4m の場合、上流側の水位との平均値の水深分の浮力を受けるとすると、見かけ上橋脚はその分軽くなる。

橋脚部：

$$[1.5 \times (4.71 + 4.0) / 2] \times (2.0 - 1.0) + 1.5 \times (5.5 - 4.36) \times 2.0$$

$$\text{橋体部} : [1.0 \times (3.5 + 1.5) / 2] \times 2.0 + 1.5 \times 3.5 \times 2.0$$

1 橋脚あたりの重量は上の 2 つの合計に幅 16m を掛けて

$$(9.97 + 15.5) \times 16 = 407 \text{tf}$$

となり、摩擦係数を掛けた水平抵抗力は $P_f = 204 \text{tf}$ で、流水による水平力 22.1tf に比べて十分の安全率を持っている。

次に下流側の水深が 4.5m のときを確かめる。

橋脚部：

$$[1.5 \times (5.34 + 4.5) / 2] \times (2.0 - 1.0) + 1.5 \times (5.5 - 4.92) \times 2.0$$

$$\text{橋体部} : [1.0 \times (3.5 + 1.5) / 2] \times 2.0 + 1.5 \times 3.5 \times 2.0$$

1 橋脚あたりの重量は上の 2 つの合計に幅 16m を掛けて

$$(9.12 + 15.5) \times 16 = 394 \text{tf}$$

となり、摩擦係数を掛けた水平抵抗力は $P_f = 197 \text{tf}$ で、流水による水平力 28.6tf に比べて安全率は $197 / 28.6 = 6.9$ となり、十分な安全率を持っている。この結果より水に浸からない橋体部の重量が大きなウェイトを占めていることがわかる。

c) 橋幅が狭かった場合の安全率

ここで、仮に橋の幅が、同じルートの小規模な橋と同様の 7~8m 程度とした場合の安全性の評価をしてみることにする。

評価を単純にするために、幅を半分の 8m とすると、橋体重量も半分になるため、安全率は $98.5 / 28.6 = 3.4$ となる。それでも、橋体が水の上にある限りは危険にさらされることはない。

上の解析では橋脚がラテライトの基盤面に乗っていることを前提にしたが、橋脚が土の上に直接築かれているとしたら、そこでの摩擦抵抗はかなり小さくなるはずである。

(5) スピアン・トップの安定性

上記のようにスピアン・プラプトゥスでは、上流側の水位の痕跡が十分確かめることができなかったため、水位の想定を持ち送りの下端程度、つまり橋脚の上あたりまでとしたが、スピアン・プラプトゥスをしのぐ規模を持つ北北西ルートにあたるスピアン・トップでは、上流側の石壁が写真-10、11 のようにかなり磨滅しており、激しい水流にさらされていることが想定される。この橋の形状を示

すデータを得ていないために今回は解析の対象にはできなかったが、スピアン・プラプトゥスよりも大きな流水力を受けている可能性があり、今後解析の対象にしなければならない。

(6) 洗掘に対する安全性

速い流れにさらされる橋脚の安定に関しては、洗掘も重要な課題である。橋脚の前面では下方向への流れが発生し、それが河床の土砂を巻き上げる渦を生じさせる。その土砂が下流へ流されると窪みが生じて、橋脚基礎の耐荷力が減少し、橋脚が倒壊する事故が起こる可能性がある。

洗掘には、流速、水深、橋脚幅、橋脚の形状、土砂の密度、粒径などが関係するとされ、多くの推定式が提案されているが、

現状ではかなりのばらつきがある。

文献 9) には、最大洗掘深さ Z_s と橋脚幅 D との比 (Z_s/D) に対する平均水深 h_0 と橋脚幅 D との比 (h_0/D) の関係がグラフに表されている。これからスピアン・プラプトゥスの洗掘量を推定することにした。

橋の上流側の平均水深を 5.5m とし、橋脚幅を 1.5m とすると、

$h_0/D = 3.7$ となるが、文献 12) の図 2-6.23 より、それに対応する Z_s/D の値はおおよそ 1~2 の間に分布しており、それより $Z_s = 1.5 \sim 3 \text{m}$ 程度になる可能性がある。

現地の観測からは洗掘の証拠は見当たらなかった。また橋脚の下に上下流いくらかの範囲に石敷きが施されており、洗掘の防止になるが、現段階ではそれを確かめるすべはない。

スピアン・タ・オンでは写真-5、6 のように橋の上下流の少なくとも 5m ほどにわたって石敷きが施され、上流側ではかなり磨り減っているが、上下流に水切りに相当する石積があり、速い水流に対する対応がなされている。

3. 考察と課題

アンコール時代に建設された橋は、持ち送り構造という構造的な制約から、スパンが極端に短く、川の流れを大きく阻害する構造となっている。

このため橋高を上げて、橋体に水流が当たることを避けており、橋高の高い橋では橋幅を大きくして橋の重量を増やすことによって安定性を確保する工夫をしたと想定した。

この仮説を確かめるために、橋脚に対する上下流の流れによる流水力を求め、橋体の石積の摩擦抵抗との比率を計算してその安全性の指標にした。

結果は、上の仮説を数値上からは必ずしも立証することには至らなかったが、水位が高くなると上下流に 1m 近い水位差が生じることや大きな堰上げ効果があることが計算上から求めることができ、一定の数値的な裏付けを得ることはできたと考えている。このように大きな水位差が生じることから、これらの橋が堰やダムを兼ねた施設である

という説が生まれた可能性があるが、橋に堰などが付属している形跡は見られず、橋が持つ構造的な特徴から生じた説であると言えるだろう。

現地の川では竹木の流下もあり、それらが橋脚に引っ掛ったときには、さらに大きな堰上げ効果が発生するはずである。

今回の解析に用いた流速、泥水の比重、橋体の単位体積重量、摩擦係数などの数値は一定の仮定によって設定したもので、実際の数値と合わない可能性もある。

このような試みがきっかけとなり、今後、現地での測定データの蓄積とより適用性の高い解析法の改良が提案されることにつながればよいと思う。

構造的な解析を行うためには基本的な観測データの蓄積が重要であることは言うまでもない。石橋の正確な計測など現地の調査が着実に行われ、そのデータが蓄積されつつあることは大変ありがたいことである¹³⁾。

さらに形態的な調査も並行して行われる必要がある。1章で指摘したように、66号線に沿った東ルートに分布している九頭のナーガの光背をもつ仏像を調査していくと、橋や道路の建設年代を特定する有力な情報が得られる可能性がある。また北北西ルートや北西ルートにはラテライト製の高欄が見られるが、橋詰にあったと推定される仏像が見つければ、ルート全体の関連性や石材の違いの要因なども議論できるはずである。多面的な調査、研究の深化に期待したい。

謝辞： 石橋の調査に先立って、日本大学の伊東孝氏、伊東氏を通じて片桐正夫氏より現地の情報をご教授いただいた。また、水理計算については京都大学名誉教授・井上和也氏より、石積の力学計算については(財)地域地盤環境研究所専務理事・岩崎好規氏よりご親切なご指導をいただいたことを記し、深謝に変えたい。

参考文献

- 1) ブリュノ・ブルギエ、古カンボジアの石橋、フランス極東学院報告書87編2巻、2000年
- 2) 三輪悟他、アンコール時代の古代橋について、日本建築学会学術講演梗概集(関東)、2003年9月
- 3) 片桐正夫他、「王道調査とその現状について」など(カンボジアのアンコール王国時代の王道と橋梁と駅舎に関する総合学術調査(1)～(4))、日本建築学会学術講演梗概集(関東)、2006年9月
- 4) 石澤良昭：『アンコールからのメッセージ』, 山川出版社, pp127～140, 2002年5月
- 5) 上智大学アジア文化研究所：『カンボジアの文化復興(6)』 pp. 32～37, 1992年
- 6) 『土木工学ハンドブック第4版』 p494, 1989年11月
- 7) 文献4) p134
- 8) 京都大学名誉教授の井上和也氏のご教授による。

- 9) 土木学会編『水理学公式集』昭和46年版, pp251～252, 1971年

- 10) 地域地盤環境研究所の岩崎好規氏のご教授による。

なお、元論文は、M. D. Gidigas: Laterite Soil Engineering, Developments in Geotechnical Engineering 9, p. 384, 1976

- 11) 三野、山田、新谷：アンコール遺跡における構造分析その1 ラテライト及び砂岩の摩擦試験、『日本建築学会学術講演梗概集C-2』, pp999～1000, 2008年9月

- 12) 土木学会編『水理公式集』平成11年版, pp. 217～222, 1999年

- 13) 伊東孝、片桐正夫他：カンボジア12～13世紀建造の王道石橋群 測量データ解析を中心として、『第29回土木史研究 講演集』 pp. 203～208, 平成21年6月