

開発途上国の氾濫原道路とその橋梁計画のありかた 河川防災の視点から

PLANNING OF FLOOD PLAIN ROADS AND BRIDGES IN UNDERDEVELOPED COUNTRIES FROM THE POINT OF VIEW OF RIVER DISASTER PREVENTION

横倉順治¹・須賀堯三²

Junji YOKOKURA・Kyoza SUGA

1 正会員 MS 国際協力事業団 無償資金協力部調査役 (〒151-8558 東京都渋谷区代々木2丁目1番1号)
東京工業大学客員助教授 大学院理工学研究科国際開発工学専攻

2 フェロー 工博 宇都宮大学教授 工学部建設学科 (〒321-8585 栃木県宇都宮市陽東7丁目1番2号)

In developing countries, elevated roads on embankments that cross flood plains and approach roads to bridges which thrust out into river channels are often seen. Such structures interfere with flood flow, causing scouring around piers and soil embankments. One possible solution to this problem would be the construction of bridges completely over flood plains or rivers; however, this is not entirely realistic due to limited financial conditions in the affected countries.

When designing such roads and bridges, two facts must be taken into account: rivers are in their natural state (i.e., without flood control) and there is a high probability of floods occurring beyond a design flood discharge due to insufficient hydrological data. Design criteria in Japan cannot simply be applied to the local situation. In this paper, such problems actually occurring at individual locations are analyzed and feasible countermeasures are proposed from the point of view of river disaster prevention.

Key Words : *natural rivers, road embankments across flood plains, scouring around piers, overflow of soil embankments, submerged bridges*

1. はじめに

1996年9月にメコン河下流域において、1980年以来最大の洪水が発生した。この洪水によりカンボジアのコンポンチャム～プノンベン間のメコン河右岸の氾濫原を走る国道6A号線、6号線において26号橋等の橋梁地点の河床と道路盛土に洗掘による被害が発生した。その被害は両国道がプノンベンの北方で氾濫原を横断している区間に集中した。この状況を図-1に示す。これらの被害は氾濫原を横断して盛り土構造によって建設された道路が洪水流を阻害し、橋梁、盛土などの構造物にとって危険な水理的状況が発生したことによるものと想定された。

本論文においてはまず1996年9月に発生した洪水において、プノンベンとコンポンチャムの間のメコン河右岸に広がる氾濫原で洪水がどのように流れたのか、実際に観測されたメコン河の水位記録と周辺住民からの聞き取

りをもとに検討した。つぎに26号橋の河床の洗掘については、実際に発生したと想定される水理的状況を水理計算を行って検証した。さらに他の開発途上国の橋梁と、氾濫原に盛土構造で建設した道路の被災例についてもその状況を明らかにし、その原因を探った。以上より、自然河川が多い事、水文データが不十分である事、財政が限られている事、などの開発途上国の現状を踏まえ、氾濫原道路と橋梁建設のありかたについて河川防災の視点から考察を行った。

2. プノンベン上流メコン河氾濫原道路の被災

(1) 氾濫原の自然状況

メコン河流域の気候は5月中旬から10月までの雨期と、11月から5月初旬までの乾期に分かれる。クラチエで乾期の平均流量1750m³/s、雨期の平均流量52,000m³/

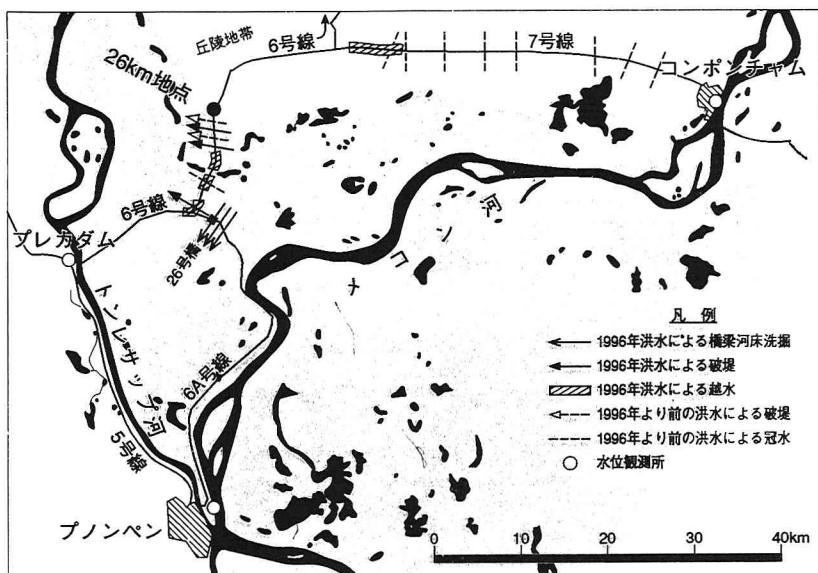


図-1 メコン河プノンペン上流右岸氾濫原における橋梁・道路被害

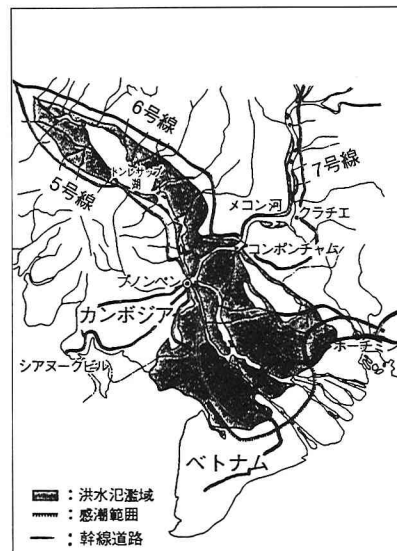


図-2 メコン河下流域の洪水氾濫域

sが観測されている。このため下流域にあるカンボジアでは毎年雨期に氾濫が発生している。メコン河はトンレサップ河とプノンペンで合流しているが、雨期にプノンペンでのメコン水位はトンレサップ湖よりも高くなるため、メコン河の水の一部はトンレサップ河を逆流してトンレサップ湖に流れ込む。雨期のメコン河下流域における氾濫域は図-2に示すとおりであり、これをカンボジアの幹線道路と重ね合わせてみると、氾濫域の外縁は国道5、6、7号線と一致していることがわかる。

氾濫原の中の植生は、6、7号線沿い南側は3～5kmの幅で水田になっている。さらにその内側は灌木の繁る湿地帯である。これらの国道を境にして北側では、6号線北側の丘陵地帯を除いては、水田が国道沿いにコンボンチャムまで10km以上の幅で続いている。氾濫原の標高はMSL（平均海面）約10mで、地表は全体的に粘性土あるいはシルト質の粘性土で覆われている。

6A号線がメコン河沿いから外れる地点から6号線との交差点を経て氾濫原外縁にあたる6号線26km地点までの19kmの区間は氾濫原を横断している。このうち6-6A交差点から氾濫原外縁にあたる6号線26km地点の間10kmの区間の中央付近は氾濫原の中心に位置しているため灌木で覆われ、乾期においても湿地帯となっている。この10kmの間には1996年洪水時に2本の橋が建設されていた。6A号線がメコン河沿いから外れる地点から6号線を結ぶライン沿いには草地と水田が続き、雨期の流路も通っている。この区間には5本の橋が建設されている。6号線26km地点より先の6、7号線は氾濫原の外縁部分を通してコンボンチャムに至っている。

(2) 国道の構造と被害の状況

これらの国道6、6A、7号線は氾濫水位より高い路面を確保するため全線盛土構造、盛土天端幅は10m前後で2車線のアスファルト舗装である。1996年およびそれ以



写真-1 6号線交差点手前での6A号線盛土の越流

前の洪水被害状況を図-1に示した。

a) 国道6A号線：プノンペン～6-6A交差点の間44km

プノンペンからメコン河沿い35kmの区間には、メコン河から取水して灌漑用水として使用するための水路が30本掘削されている。これらの水路が6A号線を横断するための12m～120mの中小橋梁が21ヶ所、カルバートが9ヶ所に造られている。残りの9km区間の氾濫原を横断する部分に架けられた5橋のうち23号橋は橋長60mで、氾濫原の中に形成されている流路を横断している²⁾。22および24、25、26号の4橋梁については橋の上下流それぞれ100～200mの区間は洗掘によると思われる凹状の地形が形成されているが、その先は、それぞれほぼ平坦になっていて流路は消えて、草地、水田、灌木帯が広がっている。ただし湿地帯にはなっていない。26号橋の河床は、厚さ5～10mでN値15～41の固結粘性土で覆われている。この粘性土は水を含むと柔らかくなる。その他の橋の基礎も類似の地質である。

1996年の洪水の際には26号橋と6-6A交差点との間で越流があった（写真-1）。また26号橋（橋長36m、3径間RC橋、径400mm鋼管を使ったパイルベントの橋脚）の河

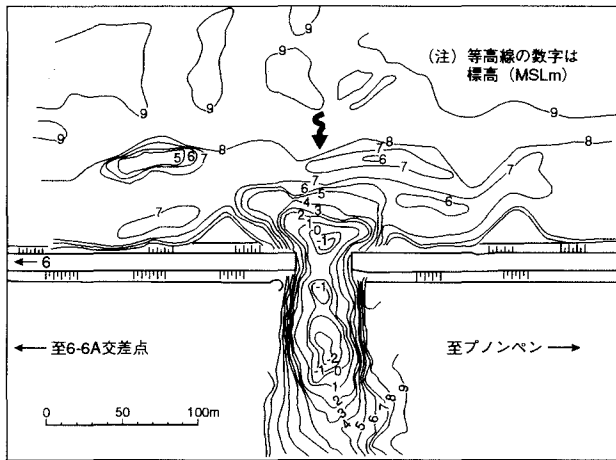


図-3 26号橋の河床洗掘

床が洗掘を受けMSL-2.5mまで9.5m低下した。この洗掘によって橋台土留め壁が崩れ、さらにその後橋脚が次第に沈下し、6ヶ月後には最大沈下量398mmとなって橋梁が使用できなくなった。洗掘後の等高線を図-3に示した。洗掘はパイルの位置に関係なく橋長全部にわたって凹状に発生している。上流側では横長、下流側では縦長で橋をはさんでT型の形状に洗掘されている。25号橋（橋長12m、単径間RC橋）でも河床が洗掘を受け、橋台のフーチングの下基礎地盤が1m程度露出した。24号橋（橋長84m、7径間RC橋）では大きな河床洗掘はなかったが、右岸側の橋台練り石積み護岸が一部崩壊した。これら橋梁の1996年以前の被害は記録にはないが、26号橋については洪水前の河床高は聞き取りによればMSL約7mで、一方周辺河床高がMSL9～10mであることから、毎年雨期に少しずつ洗掘されていたものと推測できる。

b) 国道6号線：プレカダム（6号線0km地点）～6-6A交差点（16km地点）～氾濫原外縁（26km地点）

高さ1m～3mの盛り土構造で氾濫原を横断している。プレカダム～6-6A交差点の間は1996年洪水による道路盛り土の越流、破堤はなかった。この区間には橋梁、カルバート等はない。同交差点付近から氾濫原外縁の26km地点にかけては、1996年に越流した所が3区間延長5.5kmあった他、3ヶ所で盛り土が延長442mにわたって決壊した。1978年には、越流の他1996年に決壊した3ヶ所のうち氾濫原外縁に近い2ヶ所が決壊している³⁾。

c) 26km地点以東の国道6号線とこれに続くコンボンチャムまでの7号線

氾濫原の外縁に沿って走っている。盛り土高1m以下の平坦な道路構造である。1996年には44km～50km地点の区間で冠水したが、この冠水が氾濫原外側からの水か内側からのものであるのかは確認されていない。この他地域の降雨によって冠水する地点が7ヶ所ある。1991年の洪水でもこれらの地点が冠水し損害を受けた⁴⁾。

(3) 1996年洪水の氾濫原における流れ

9月10日に南シナ海に発生した台風ウイリーは13日か

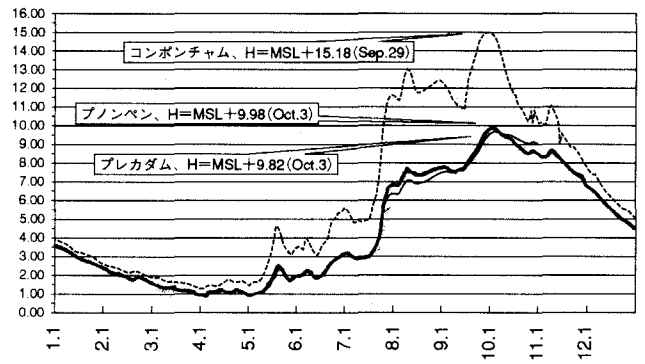


図-4 1996年メコン川水位、MSL+m

ら21日までメコン河流域に大雨をもたらし、ラオスでは記録的な降雨が観測された。この降雨によって9月中旬より下流域で急激に水位が上昇し始め9月末～10月初めにかけてピークに達した。コンボンチャムでは16日間で水位は4.8m上昇し、9月29日にピークのMSL15.18mとなった。プノンベンでは10月3日にピークのMSL9.98m、プレカダムで10月3日にピークのMSL9.82mになった。9月中旬から10月初旬にかけてはプノンベンの水位はプレカダムよりも20cm程度高かった。これらの水位は図-4に示すとおりであり1980年以来の最高値であった。

コンボンチャムが最高水位となった9月29日において3地点の水位差とその間の縦断勾配は次のようになる。

コンボンチャム-プノンベン

$$\Delta h = 5.32\text{m}, \quad L = 78\text{km}, \quad I = 1/15,000$$

コンボンチャム-プレカダム

$$\Delta h = 5.59\text{m}, \quad L = 73\text{km}, \quad I = 1/13,000$$

プレカダム-プノンベン

$$\Delta h = -0.27\text{m}, \quad L = 36\text{km}, \quad I = -1/133,000$$

このような水位の関係からコンボンチャム下流でメコン右岸氾濫原に溢れた洪水はプノンベン方向に流れると同時に、むしろプレカダム方向により多く流れる事となった。その結果3地点のうちもっとも水位が低く流れの合成ベクトルの先端にある6-6A交差点付近と6号線26km地点の間に洪水が向かった。地形と植生からもこの流れに沿って氾濫原の主流路が形成されている事がわかる。

(4) 1996年洪水の被害ヶ所周辺における流れ

被害にあった国道の沿線周辺において住民からの聞き取り調査を行った。聞き取り調査によって得る事のできたメコン河サイド(上流側)とトンレサップ河サイド(下流側)の水位、および国道の中心線における地盤高を縦断的に整理すると図-5のようになる。そのほかの聞き取り調査結果の主な点をまとめると以下のようになる。

・26号橋付近の氾濫原の水深は例年は約1mであるが、1996年9月下旬には3mとなって道路面より下0.8mまで水面が迫り、この状態が2週間ほど10月初旬まで続いた。上下流の水位差は例年30cm～50cmであるが、1996年

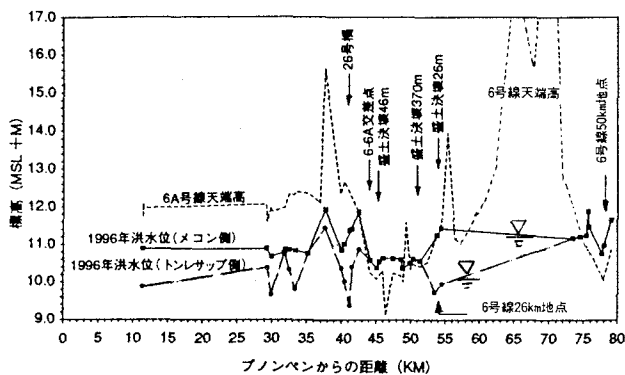


図-5 聞き取り調査による6A/6号線水位縦断

には1～2 mの差がついた。高水位が継続した期間中は、26号橋を通過する流速は3～4 m/sであった。

・6-6A交差点～26km地点では道路盛土をはさんでメコン側（上流）とトンレサップ側（下流）の水位差が最高1.5mであり、この水位が9月下旬から1週間続いた。この区間で越流があり3ヶ所で破堤した。

以上より次のような状況が発生したと推定される：氾濫原主流路の通る6-6A号線交差点から6号線26km地点の間の方面に向かった洪水は、氾濫原を横断して建設された道路盛土に障害された。洪水は6A号線の22～26号橋と6号線の2橋、合計7ヶ所に建設された橋梁から流出したが、その橋長が不十分であったため流出しきれない水は上流側に貯留されて次第に盛土上下流の水位差は大きくなった。また26号橋から6号線26km地点までの氾濫原主流路を横断している部分の道路高は、その前後のものよりも1～2 m低くなって、この10kmの間は横断形状が凹になっている。このため洪水はここから盛土を越流して洗掘・破堤に到ったと推察される。

メコン河のような大河川でも氾濫原の水位上昇速度が大きく（16日間で4.8m）なったが、この場合道路盛土下流の貯留容積が大きく（一帯に湖のように湛水した）、また橋長が短かったので橋梁下流側の水位上昇速度が相対的に小さくなった。このため橋梁上下流の水位差が増大して大きな流速と洗掘が生じたと考えられる。

(5) 1996年洪水による6A号線26号橋の橋脚洗掘に関する水理的検討

26号橋地点における不等流水理計算と2次元水理計算を、河床洗掘前と洗掘後の地形についてそれぞれ行った。洗掘前の地形は洗掘後のものをMSL 7 mまで水平に埋め戻した形状とした。計算結果を表-1、図-6～7に整理した。2次元計算には米国で開発されたSMS(Surfacewater Modeing System)を適用した。これは平面2次元浅水方程式を適用し、有限要素法により数値解を得ているものである。E（渦動粘性係数）=25m²/s、n（粗度係数）=0.04、河岸は壁立てとし、水位の境界条件は図-7に示した。

聞き取りの際に得た水位差は最大で2 m、その時の流

表-1 26号橋における水理計算結果

	不等流計算		2次元計算		周辺住民からの聞き取り
	洗掘前	洗掘後	洗掘前	洗掘後	
上下流水位差 (m)	2.01	1.33	2	1.4	1～2
流速 (m/s)	橋真下	4.82	1.65	3.2	3～4
	50m下流	2.34	0.79	1.8	
流量 (m ³ /s)	355	355	250	380	

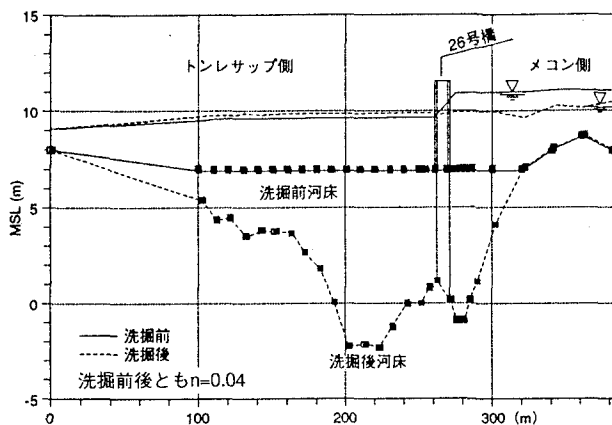


図-6 不等流計算による水位縦断

速は3～4 m/sという数字はこれら計算でも再現されており、両者ほぼ一致している。またこの水位と流速が2週間続いたという住民の証言は、MSL 9.50m以上の水位が9月26日～10月12日の17日間続いたというプノンペンの水位の記録と整合している。実際にこのような水理状況が発生して2週間継続したものと推定できる。更に河床の固結粘性土が水を含んで軟くなっていた事も原因し、大きな洗掘を受けたものと思われる。橋脚の局所洗掘の大きさは須賀らの方法⁵⁾によればFr、ho/dm、ho/D、いずれのパラメーターも適用の範囲外となった。このうちho/dmは上限の10⁴を超えるうえ粘性土なのでこの方法により洗掘深を評価することは適当ではない。

洗掘の形状と範囲については、橋梁の下流側で細長く橋軸直角方向に伸びている形状は2次元計算の流速分布で再現されている。一方上流側で橋軸平行方向に長く洗掘されている形状は洗掘後の2次元計算の流速分布にはやや表現されているが、洗掘前の計算では表現されていない。橋梁上流側の洗掘は、貯留されている水の3次元的な流れも原因になっているためであり、2次元解析ではこの動きを表現できないからであると思われる。また2次元計算で洗掘後メコン側の流速が増大するのは、橋梁から約50m以上上流では河床が顕著には洗掘されていないので、水理計算ではこの部分の流積が縮少するためである。この傾向は不等流計算にも表われている。

3. その他の事例

(1) 氾濫原道路

a) 氾濫原を横断して建設された道路盛土が上流からの越流によって洗掘を受けた例

表-2 ハリケーン・ミッチによる橋梁の被害

被害の状況	橋梁の数
取り付け道路の流出と橋台裏側の洗掘	13
橋台前面河床の洗掘	2
橋脚周りの河床の洗掘	3
橋桁のみの流失（流木等による）	18
合計	36

盛土上下流の水位差はつきにくいいため)

(2) 橋梁

1998年10月下旬に中米諸国では、ハリケーン・ミッチによってもたらされた洪水が橋梁に大きな被害を与えた。このとき被災した橋梁のうちホンジュラスとニカラグアの36の中小橋について被害状況を表-2に整理した。なお越流を受けても被害の無い橋がハイチとホンジュラスの各首都にあった。これは取付け道路が河道に突き出しておらずまたその路面高が周辺地盤高程度に低く押えられていて洪水を阻害しなかった事と流木が無かった事に加え、トラス構造で桁高が比較的薄く流水圧を受けにくかった事(ハイチ)、石積アーチ橋で流水圧に抵抗できた事(ホンジュラス)、などの理由によるものである。

4. 考察

開発途上国で建設される氾濫原道路と橋梁には、わが国とは異なり以下のようなものが少なからずあることが分かった。

- a) 大河川の沖積氾濫原を道路が長距離にわたって横断している区間がある。この場合雨期の冠水を防ぐための方策として、盛り土構造の道路が建設され、橋梁は必要最小限の長さに押さえて造られている。
- b) 同上氾濫原の外縁部に河川と平行して盛り土構造の道路が建設されている。
- c) 谷底平野を流れる河川では、低水路にだけ橋梁が建設され、氾濫原に盛り土構造の取付道路が建設されている。
- d) 中小河川では橋長を短くすることによって建設費を低く押さえるため、河川の中に取り付け道路を張り出している。

このため洪水の際に次のような被害が生じている。

- a) 氾濫原を横断して造られた道路盛り土、あるいは河川の中に張り出して造られた取り付け道路が洪水を阻害し、洪水が越流して洗掘されている。
- b) 沖積氾濫原の外縁に沿って造られた盛り土道路が堤防の機能を果たして支川からの洪水の流入をを妨げ、一種の内水が発生して道路盛り土に被害を与えている。
- c) 盛り土の越流が起こるまでは洪水は橋梁に集中するため橋梁における流速が大きくなり、橋台・橋脚周りの河床を洗掘している。

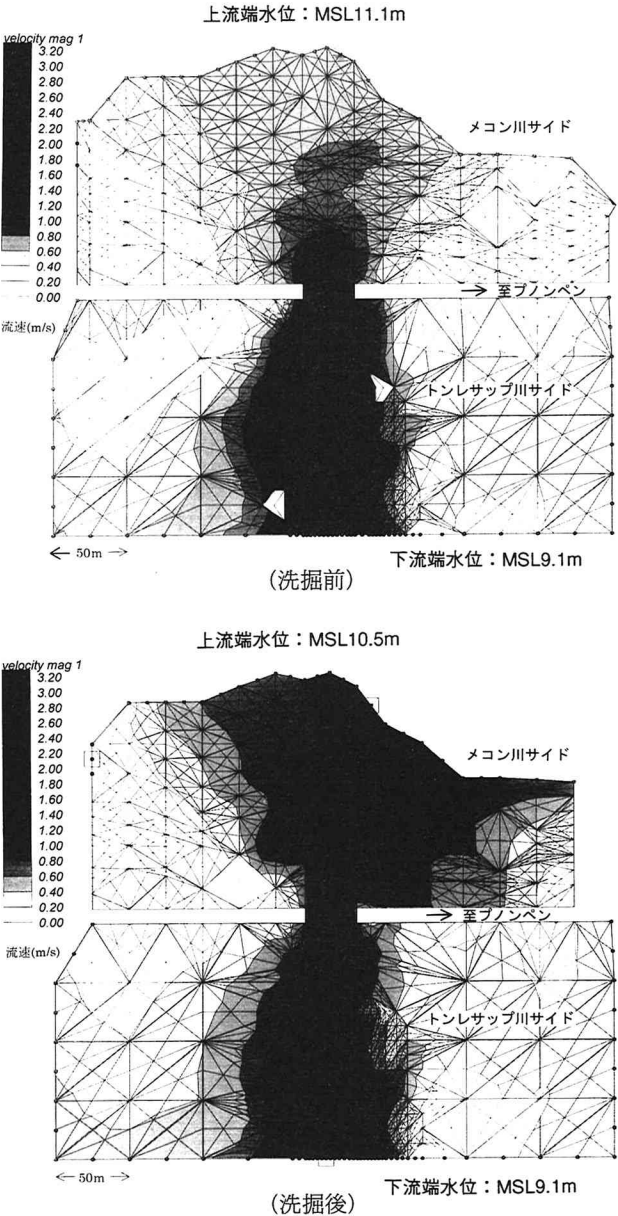


図-7 2次元計算による流速コンター図

- ・ホンジュラス・アグアン川下流部5kmの区間（1998年・台風ミッチ）
- ・ホンジュラス・スーラバレー出口 5 kmの区間（1998年・台風ミッチ）
- ・カンボジア・7号線メコン河コンポチャム対岸の左岸氾濫原 3 kmの区間（1996年洪水）
- b) 氾濫原外縁沿いの道路盛り土が支流から氾濫原に流入しようとする洪水に越流された例
 - ・ラオス13号線でメコン河支流セドン川とその右岸側山地との間を走るの70kmの区間（1986、95、96年）
 - ・カンボジア6号線でトンレサップ湖とシェムレアップ背後の山地との間を走る 7 kmの区間（1997年）
- c) 越流による被害がほとんどない例
 - ・バングラデシュ・ダッカ～チッタゴン道路でダッカから南東80kmの区間（この区間は盛り土構造でメグナ河の氾濫原を通過しているが、氾濫原では水位の上昇は緩慢で

以上を踏まえ、開発途上国における道路・橋梁の建設計画に関して問題点と課題を以下に示す。

- a) 開発途上国では一般に比較的小規模な洪水を対象として設計されている。このため上述被災例からもわかるように、橋梁の場合には橋長や桁下高の不足が原因で被災するケースが多い。従ってより大きな洪水を想定して設計する必要があるが、その分工事費が高くなるので、どの程度の洪水を想定するかについてはその国の経済・財政状況も考慮して判断しなければならない。安全度とコストの問題である。
- b) 開発途上国では一般に水文観測、河川測量、などのデータが揃っていないため、水文・水理解析を行っても信頼性が乏しい。そのため計画高水を設定してそれ以下の洪水には安全な構造にするというわが国の考え方はそのまま通用しない。開発途上国における自然現象（規模、発生確率）を推定することの困難さの問題がある。
- c) 開発途上国において道路、橋梁を日本の技術協力または資金協力によって建設する場合、このような事情を考慮し、わが国の基準を画一的に適用するのではなく、設計上種々工夫することが必要である。従来は計画規模をできるだけ大きくとり、それに対する安全を確保するがそれを超える洪水（超過洪水）については考慮してこなかった。しかし水理解析の精度を考慮すると、とりわけ超過洪水に対する配慮が必要である。またその国の財政状況や経済効果を考えると、通行不能の頻度が多くなるなど、多少の利便性を犠牲にしても、もう少し小さな規模の洪水を設計対象とし超過洪水に対する配慮を重視する設計がより合理的であると考えられる場合もある。たとえば、50年確率洪水を設計洪水としそれを超える洪水が発生すれば破壊されるような設計よりも、20年確率程度の洪水を設計洪水とするが50～100年確率洪水が発生しても被災し難い、または被災しても容易に復旧できる構造である。

JICAも個々のケースで、途上国の実情にあわせて幅広い選択枝について検討している。具体例としては、橋梁については氾濫原に高い盛土構造の取り付け道路を造る事を避けて洪水流の阻害を最小限に押さえ、周辺道路路面高と橋面高をあわせた潜水橋（越流を許容する橋）、氾濫原道路については路面高を道路交通能上支障がない程度低くし、さらに一部区間をより低くし（コーズウェー）或いはカルバートを設置して越流・冠水の影響を緩和する工夫、などである。

- d) 潜水橋あるいはコーズウェーについては今のところその設計の方法は個々のケースで違っており統一されていない。潜水橋およびコーズウェーの設計ガイドラインを作成することが今後必要とされている。

5. 結論

- a) 開発途上国の氾濫原上の道路とその中の流路や小支

川に架けられた橋梁の被災に関する現地調査を行った。これら事例の実態を通して、従来は個別対応であったものを今回総合的見地より共通する問題点を明らかにし、河川側からみた計画と設計のありかたに関し、実用性を重視した提案を行った。

- b) 架橋部と橋脚周辺洗掘については、氾濫水が逆流して道路盛土を挟んで生じる水位差が原因する事から2次元計算による検証を行い、現地調査および聞き取り調査に基づく検討結果が概ね信頼し得るものである事を確認する事ができた。なお2次元計算結果から流入側の洗掘形状を照合するとこの付近の3次元性が高く、2次元計算で洗掘の実態を十分には説明する事は困難であることが判明した。
- c) 水文観測資料が少ないので現象の解明に苦労したが、住民からの聞き取り調査をきめ細かく行う事により洪水時等の状況をかなり信頼できるレベルで把握する事ができた。
- d) 固結粘性土に関する橋脚洗掘深の実測例を得た。この洗掘には橋脚周辺洗掘と流出流による局所洗掘の両方が入っている。洗掘は2週間という通水時間の経過につれて次第に進行していったものと思われるが、洗掘速度と時間の関係の定量化は今後の課題である。
- e) 被災しなかった橋梁の事例から、取付け道路による洪水阻害と流水圧等への配慮を適切に行えば越流を許容する橋梁とする事ができる事が実証された。しかし、流木がある場合にはその対応は今後の課題である。
- f) メグナ河の事例のように橋梁下流の水位が氾濫原の水位上昇と合わせて上昇する条件下では橋梁の被害は生じていない。今回のメコン河被災の最大の原因は、道路盛土による流入水のダムアップと橋長の不足による大きな上下流水位差の発生である。

謝辞：本論文作成にあたっては（株）パシフィックコンサルタント・インターナショナルより貴重な資料を提供して戴きました。厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 吉松昭夫、小泉肇：メコン河流域の開発、山海堂、PP 6～8、1996年7月
- 2) 国際協力事業団：カンボジア国道6A号線復旧計画基本設計調査報告書、PP4-11、1993年4月
- 3) 国際協力事業団：カンボジア王国国道6・7号線改修計画基本設計調査報告書、PP2-25～2-27、1997年1月
- 4) 同上
- 5) 須賀寛三、西田祥文、高橋晃、坂野章：橋脚による局所洗掘深の予測と対策に関する水理的検討、土木研究所資料第1797号、PP46～49、1982年3月

(1999.9.30受付)