

付属資料 1-2 被災事例と海外無堤河川渡河施設事業に関する考察

1. 無堤河川に建設された橋梁の洪水被害

日本の河川では、洪水の計画規模に基づいて策定された河道の縦横断形状により連続堤が築かれている。一方開発途上国のほか欧米でも、築堤されている河川は極めて少なく、ほとんどが無堤である。これらの海外の無堤河川における渡河施設で発生している問題点を河川形状別に整理すると次のようになる。このような形態の橋梁被害の多くは日本では見られない。

- 1) 中小規模の河川の氾濫原に建設された取付け盛土と橋梁の洪水被害
- 2) 大河川の氾濫原に建設された盛土道路とその橋梁の洪水被害
- 3) 都市河川での橋梁被害と市街地への洪水の氾濫
- 4) 大規模な沖積河川の河道変動に起因する橋脚・橋台基礎の河床低下と橋脚周りの局所洗堀

これらの状況を説明した付属資料 1-1 に基づいて、被災のメカニズムを考察し、対策に関する所見を本付属資料 1-2 で記述した。ただし上述 4) については、大規模沖積河川の河道変動と橋脚周りの局所洗堀現象が関連しており、1)～3)とは別テーマの研究課題と考えられることから、本資料での考察の対象とはしないこととした。

2. 実際に発生した被害の状況

(1) 中小規模の河川の洪水流路ないしは氾濫原に建設された取付け盛土と橋梁の被害

中小規模の河川では概ね非洪水時の流路にのみ架橋され、洪水発生時の氾濫域には盛土による取付け道路が建設されている事例も多い。その状況を日本の有堤河川と比較し、モデル化して図 1 に示した。無堤河川では、取付け盛土が洪水の流下を阻害するために、設計対象以上の洪水では橋梁の上流側水位が上昇し、盛土と橋桁が越流されて流失している。橋台や橋脚の耐洗堀対策が不十分な場合は、これらが損傷して橋桁の流失に至る例も見られる。以下に具体的な事例を説明した：

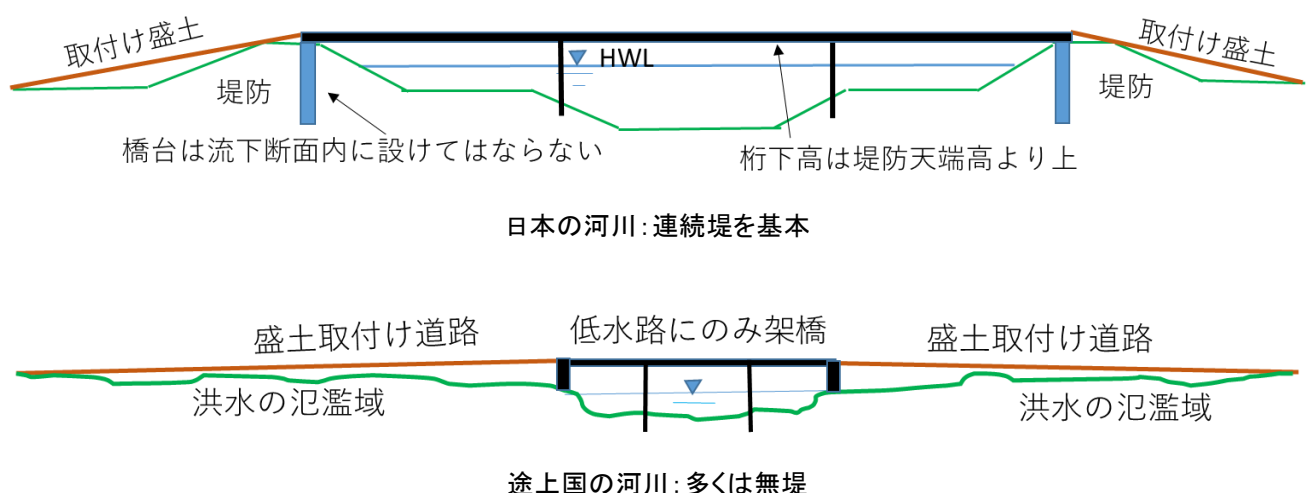
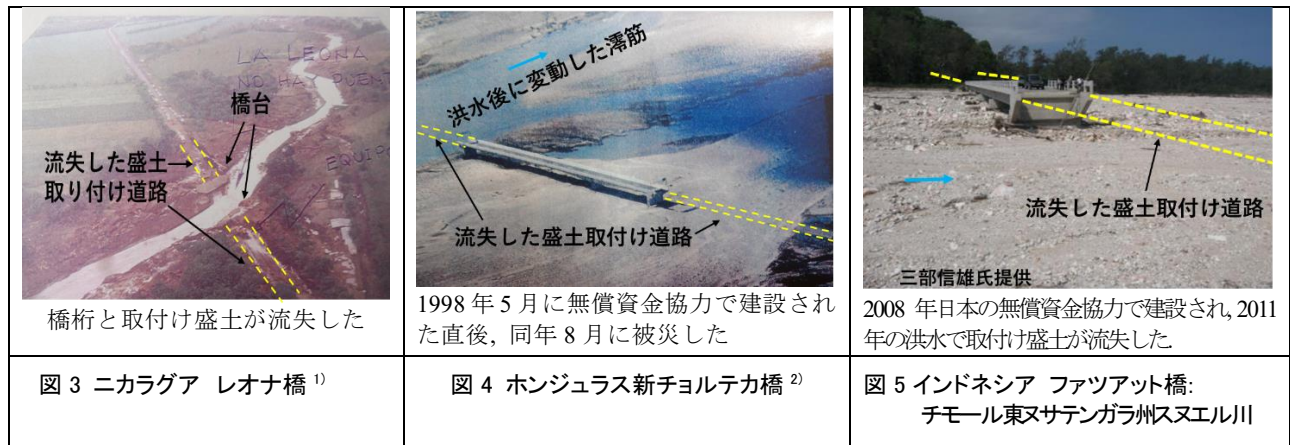


図 1 日本と途上国の河川の違いによる渡河施設の比較



- 1) 1998 年に中米を襲ったハリケーンミッチによる洪水によって、同地域では多くの橋梁が被災した。ホンジュラス全国で 85 橋、ニカラグアでは全国で 82 橋に上った。代表的事例を図 2～4 に示した。
- 2) ニカラグアの被災渡河施設（図 2, 3）の場合は、平水時の流路だけに架橋されているように見える。最小限の予算で渡河施設を多く設置するためにコストのかかる橋梁部を最小限とし、残りは被災しても容易に復旧可能な盛土構造とするのは典型的な設計例である。

日本の ODA における橋梁の設計にあたっては、計画洪水流量を水文解析により計算して流水の疎通能力をチェックしており、単に平水流路のみに架橋することはしていないが、設計対象洪水以上の出水に対しては取付け盛土が被災する事例も発生する。

- 1) 無償資金協力により 1997 年に建設されたホンジュラスの新 Cholteca 橋の洪水流路に建設された取付け道路は、ハリケーンミッチによる洪水により約 900m にわたって流失した（図 4）。被災したのは盛土部分のみであり、橋桁の流失はなく、橋脚、橋台などの橋梁構造には被害はなかった。被災後には日本の追加的無償資金協力により 7 径間 294m 追加された。同橋は 1/100 年確率降雨による洪水を対象として設計されたが、今回の洪水は 1/200 年確率降雨によると言われている。ただしこれらの災害をもたらした降雨規模と設計対象洪水との関係は解明されておらず、ここで渡河施設の計画規模の適否を評価するものではない。
- 2) 無償資金協力により 2008 年に建設されたインドネシアのファツアット橋では、2011 年の洪水で盛土取付け道路が流失した（図 5）。橋梁構造への被害は軽微であった。被災後に自国予算により盛土部が修復され、さらに 1 径間追加された。

以上の被害は橋梁地点での計画規模を超える洪水が取付け盛土によって阻害されたことが原因である。このメカニズムを図 6 に示し、以下に説明した。

- 1) 橋梁設計の対象とする流量以上の洪水にあつては、橋長不足により、洪水流量 > 橋梁からの流出量、となって取付け盛土の上流側水位が上昇する。

- 2) 取付け盛土上流側に水衝部が発生して盛土が洗堀される。
- 3) さらに上流側水位の上昇が継続して盛土を越流し、盛土下流側法面を流下した流水により法尻が洗堀を受け、引き続き法面が洗堀されて、盛土全体が流失するに至る。

盛土道路が越流されない場合でも、氾濫原に広がった流れによって、道路盛土の上流側の法面が洗堀される被害が発生している。代表的事例は以下のとおりである。

- 1) ネパールのタライ平野に建設された橋梁で被害が発生した（図 7）。
- 2) ボリビアの国道 4 号線上に日本の無償資金協力によって 2007 年に建設された日本ボリビア友好橋において、2008 年 3 月洪水により橋梁構造には被害はなかったが、取付け道路盛り土が洗堀される被害が発生した（図 8）。被災した取付け道路盛り土はボリビア側が建設した部分であり、修理は自国予算により実施された。

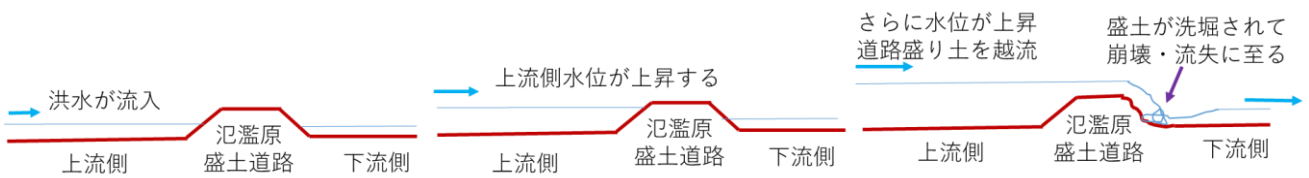
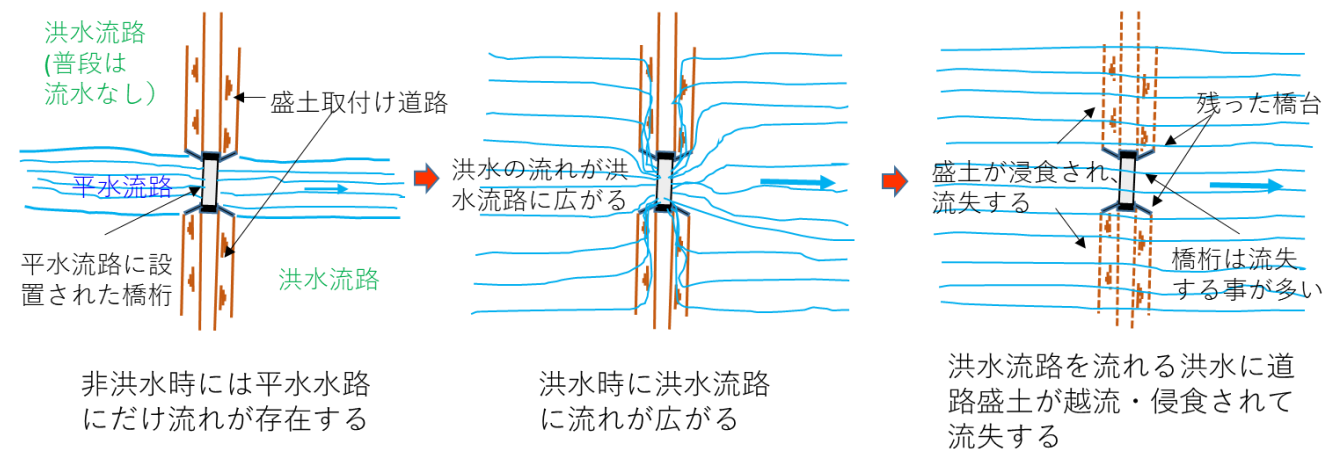


図 6 取付け盛土流失のメカニズム



図 7 ネパールのタライ平野での 2019 年 7 月洪水で発生した取付け盛土の洗堀



図 8 ボリビア国道 4 号線での 2008 年 3 月洪水で発生した取付け盛土の洗堀

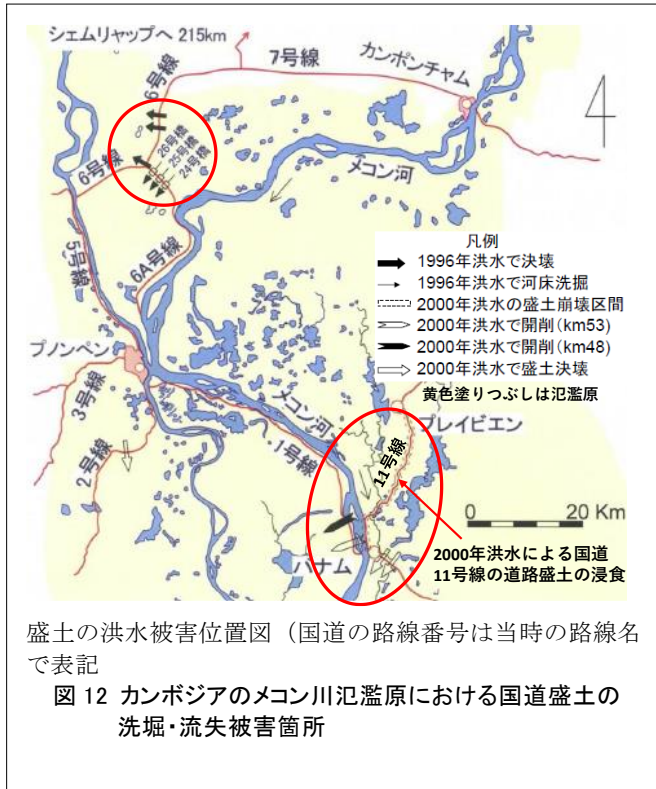
このような橋梁の復旧にあたっては、取付け盛土のみの流失あるいは損傷と橋梁の損傷とでは、復旧の時間もコストも大幅に異なることに留意すべきである。道路交通のネットワークとして各渡河地点に優先順位を付け、ネットワーク的に重要な地点では、洪水に対して強靱な施設を配置することも検討する必要がある。一方地方・村落間の連絡道路などの橋梁については、取付け盛土の流失は許容する構造として建設費用を縮減する、という選択肢も検討されてよいケースがあると思われる。

(2) 大河川の氾濫原盛土道路とその橋梁の被害

カンボジアのメコン川、バングラデシュのジャム川などの大規模河川の氾濫原、あるいはネパールのタライ平野のような多数の中小規模河川を包含する大規模な氾濫原では、雨季に発生する洪水による交通の阻害を避けるために、道路は盛土構造とされている。これらの道路盛土が氾濫原内の水路・中小河川を横断する箇所には橋梁が設置されている。これら広大な氾濫原では、洪水時に盛土道路が洪水の流下を阻害し、盛土上流側の水位が上昇して盛土が越流されて（図 9）流失する被害が発生している。さらに図 10 に示したように、盛土を挟んで氾濫原上下流に水位差が生じて、橋梁地点で大きな流速が生じる。これに対して適切な対策工（護床工、護岸工）を設置しなければ、河床・河岸が洗堀され、橋台・橋脚が損壊し、橋桁が流失する。以下にその事例を説明した。なお、図 10 は 1996 年のメコン川洪水後に日本の無償資金協力によって建設された国道 6 号線の橋梁地点での 2000 年洪水における水理状況であるが、対策工が功を奏し、洗堀などの被害はなかった。

- 1) ホンジュラスで 1998 年にハリケーンミッチによる洪水の越流により、アグアン川の氾濫原を横断する盛土道路が浸食された。（図 11）
- 2) カンボジアのメコン川において（位置図は図 12 に示した）：
 - ・ 2000 年洪水により、プノンペン下流のメコン川右岸に沿って建設された国道 1 号線の道路盛土が堤防の機能を果たして、洪水流の氾濫原への流出を妨げ、水位が上昇しプノンペンに被害が及ぶとの懸念から、人為的に開削された。開削直後の様子を図 13 に示した。
 - ・ 2000 年洪水により 11 号線盛土道路が越流されて浸食された。図 12 にその位置を示した。

 <p>写真提供 PCI 1996.10.3</p> <p>メコン川プノンペン上流右岸の氾濫原に建設された国道 6A 号線の盛土道路は、1996 年洪水で越流された。道路盛土が洪水を阻害し、上流水位が上昇したためと考えられる。</p>	 <p>2000.9 写真提供 大林組</p> <p>メコン川プノンペン上流右岸の氾濫原に建設された国道 6 号線の盛土道路の橋梁では、2000 年洪水では盛土を挟んで氾濫原上下流に水位差が生じ、橋梁地点で射流、その下流では跳水が生じた。ただし特段の被害は生じていない。</p>	 <p>写真提供 細川容宏氏</p> <p>国道 13 号線は、アグアン川を橋長 150m の橋梁で渡河し、その左右岸合計約 5km の間続く氾濫原を盛土道路で横断している。この盛土道路が氾濫水により越流され、盛土が数か所で合計延長約 1km にわたり洗堀された。</p>
<p>図 9 越流されている 6A 号線盛土道路</p>	<p>図 10 2000 年洪水時における日本の無償資金効力で新設された 6 号線橋梁での射流と跳水現象</p>	<p>図 11 ホンジュラスのアグアン川氾濫原で 1998 年ハリケーンミッチにより発生した道路盛土の洗堀³⁾</p>



- ・ 1996年洪水により、国道6A号線26号橋において河床が洗堀されて橋台が崩壊し橋脚が沈下した。（図14）
- ・ 1996年洪水により、国道6A号線の25号橋において、橋台回りの河床が洗堀された。（図15）
- 3) バングラデシュのジャムナ川氾濫原では、2007年7月に発生した洪水により、Z5401号線では道路盛土が流失し、カルバート橋が崩壊した。（図16～20）
- 4) ネパールのタライ平野を横断する国道ポスタルハイウェイでは、2019年7月洪水により、道路盛土が越流されて流失し、カルバート橋梁が崩壊した。（図21～23）
- 5) これら被害のメカニズムは図6と同様と考えられる。カルバートが設置された盛土道路の流失（図18）については、カルバートと盛土の境界面に沿って発生した浸透水による浸食も想定される。

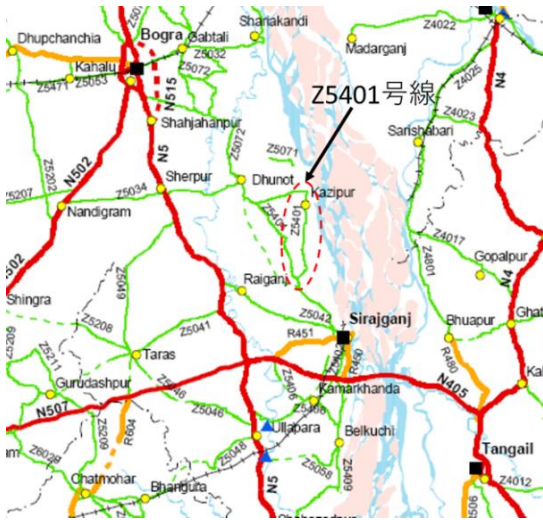
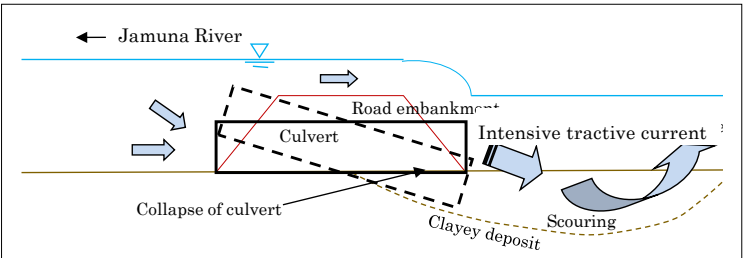


図 16 バングラデシュ Z5401 号線位置図



- ・ジャムナからの氾濫水が大きな流速でカルバートを通して下流側の河床が洗掘され、カルバートが崩壊したと想定される。
- ・2007 年のバングラデシュの洪水では、道路局（Road and Highway Dept.）の所管する全国の道路で 52 橋/カルバートが流失した。ジャムナ河に接する Sirajganji 周辺では 8 橋/カルバートが流失、最も被害の大きかったのは Z5401 号線で、洪水ピーク時には、最大約 1m の越流があった。（栗原敏広氏提供）

図 17 2007 年洪水でのカルバート崩壊のメカニズム



図 18 流失した道路盛土と崩壊したカルバート橋



図 19 下流側河床洗掘で傾いたカルバート橋



図 20 左図カルバートから流出した氾濫水により形成された落堀、深さは約 10m

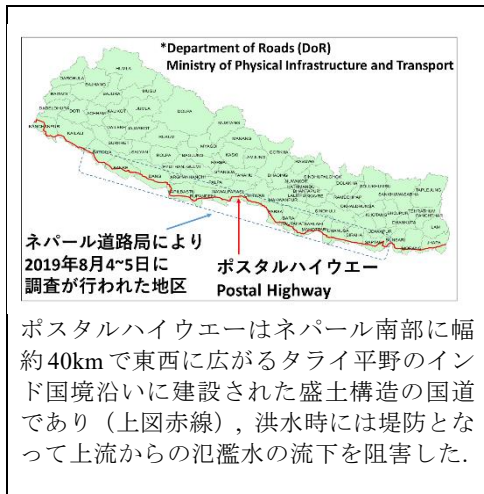


図 21 2019 年 7 月洪水が発生したpostalハイウェイ位置図

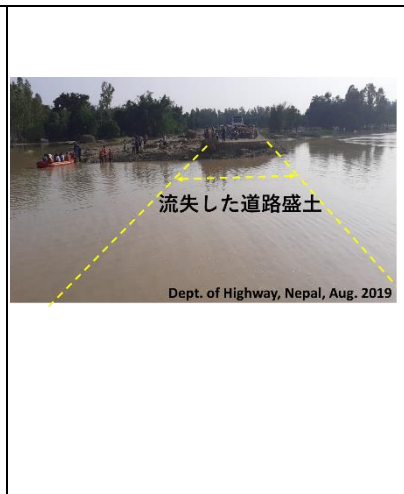


図 22 洪水に越流され流失した盛土道路



図 23 洪水の越流により損壊した道路舗装

なお、これら災害もたらした降雨が被災した施設の計画規模以上であったかは確認できていないので、施設計画の適否を結論づけることはできないが、道路交通のネットワークとして各渡河地点に優先順位を付けて渡河施設の構造を策定する方法は、前項と同様検討するに値すると考えられる⁴⁾。

1996 年メコン川洪水による被害の復旧のために国道 6A 号線と 6 号線に日本の無償資金協力により整備された橋梁では、道路ネットワーク上の重要性から、既往最大洪水である 1996 年洪水が計画対象洪水として橋長・桁下高が設定され、護岸・護床工が設置されたため^{5), 6)}、2000 年などその後の洪水において洗堀は発生しなかった。

(3) 都市河川での橋梁地点での市街地への氾濫と橋梁の被害

橋梁地点で洪水流が阻害されて上流側水位が上昇し、市街地に氾濫する災害が発生している。その事例を以下に説明した。

- 1) 東チモールの首都ディリ市での 2021 年 4 月洪水では、橋梁地点で氾濫が発生した（図 24）。氾濫の直接的な原因は橋梁地点での流下能力を超える洪水の発生であるが、これらの橋梁地点では以下の要因により流下能力の低下が見られる。橋台が河道に張り出て建設されており、また橋面高が周辺地盤高と同じで、そのために桁下高が少なくなり、河道断面が橋梁の上下流側に比較して橋梁地点で縮小している。
- 2) 1998 年のハリケーンミッチによりホンジュラスの首都テグシガルパでは多くの橋梁で橋桁が流失し、橋脚が倒壊した（図 25）。橋面高が周辺地盤高と同じであって、河道が満水となれば洪水流は直接橋桁に流水圧を及ぼす構造となっている。

都市河川の橋梁の設計にあたっては、以下の点に注意する必要がある。

- 1) 河積を阻害しないように、橋台と橋桁が河道断面にはみ出ないようにするとともに、河道掘削などにより流下断面を確保する。
- 2) ディリ市のマロア川とテグシガルパ市の河川は、いずれも無堤で河道の流下能力は比較的小さいので、橋梁は越流を前提とし、越流されても致命的な損傷を受けず、容易に補修できる設計とすることが合理的であると思われる。

 <p>2021.6.5 八千代エンジニアリング</p> <p>河道に張り出た橋台、および周辺地盤高よりも低い桁下高は、橋梁地点での洪水の流下を阻害している。</p>	 <p>1998.12.6 セントラルコンサルタント</p> <p>橋脚、橋桁（橋長 69m, RC3 径間）が流失した。桁下高が周辺地盤高と同じであって、河道が満水すれば洪水流は直接橋桁に流水圧を及ぼす構造となっている。</p>
<p>図 24 東チモール首都ディリ市で 2021 年洪水で氾濫したマロア川の橋梁</p>	<p>図 25 1998 年ハリケーンミッチによる洪水により被災したテグシガルパ市 Juan Ramon Molina 橋⁷⁾</p>

まとめ

1. 海外の無堤河川における渡河施設に関して、1996 年～2021 年に実際に発生した洪水による道路橋梁の被災状況を明らかにし、原因を考察した。被災状況は河川の規模からは以下のように類別される。
 - ・ 中小河川では、洪水流路に建設された取付け盛土の浸食・流失、および橋梁地点での収縮流による河床浸食と橋脚・橋台の損壊が発生している。
 - ・ 大河川の氾濫原における盛土道路およびその橋梁においても同様な被害が発生している。
 - ・ 都市内の中小河川では、橋梁地点での流下能力不足により橋脚と橋桁が被災し、周辺地区に洪水が氾濫している。
2. これらの結果を踏まえ、途上国における道路・橋梁の建設計画に関わる水文・水理、あるいは河川工学上の問題点と課題を以下に示した。
 - 1) 【設計対象洪水】 無堤河川で渡河施設を計画する場合、橋長、桁下高など橋梁の諸元を決定するためにはまず設計対象洪水を決定する。被災の頻度を少なくするためには、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。したがって、どの程度の洪水を想定するかについては、交通ネットワークにおける当該渡河施設の重要性も考慮して判断しなければならない。道路サービス水準、および建設コストを勘案して決定する。
 - 2) 【水文データの不足】 開発途上国では従来水文観測、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ことが多かった。しかし近年気象衛星データ等の活用により、流量の推計は容易になってきた。気象衛星データ等の活用による降雨量の推計とデジタル地形モデルを使った流出解析により、現地での観測データの不足を補完するよう対策を進めることが肝要である。
 - 3) 【無堤河川渡河施設の水理現象】 無堤河川の渡河施設では、多かれ少なかれ氾濫原に取付け盛土を構築し、橋梁を架設する。すると洪水の収縮流が発生し、流速の増加と塞き上げにより洗堀などで橋台・橋脚に被害が及ぶ。従来この現象に対して十分な水理学的検討がなされていない事例が見られた。また同時に洗堀対策も不十分な事例も見られたのは残念なことである。無堤河川ではこれらの水理現象の解明は重要であり、計画・設計段階で特に注意して検討すべき課題である。
 - 4) 【国内基準の画一的な適用】 開発途上国において渡河施設を日本の技術協力、または資金協力によって建設する場合、我が国のマニュアル（河川施設等構造令など）を画一的に適用することはできないので、設計上種々工夫することが必要である。次のような点に留意する必要がある（河川構造令の適用に関しては付属資料 3 参照）。
 - ・ 従来は適正な洪水規模を設定し、桁下高や橋長を決定することにより橋梁の安全を確保して来ているが、それを超える洪水については考慮してこなかった。国内有堤河川では、水位が堤防天端を超えると越水するので、水位の上昇は堤防天端高が限度となるが、一方無堤河川ではこれとは異なり、堤防がないために水位は流量に応じて上昇を続ける。近年水文解析の精度が向上しており、また気候変動への対処の必要性を考慮すると、今後は設計洪水を超える一定規模の大洪水を想定して、致命的な損傷に至らないように設計することも意味のあることとなる。
 - ・ その国の経済成長、財務状況と経済効果及びその路線としての役割を考慮して最適な計画とすることが必要である。たとえば、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、より小さな規模の洪水を設計対象とし、大規模な洪水に対しては致命的な損傷を避ける設計の方がより合理的であると考えられる場合もある。一例をあげれば 100 年

- ・ 確率洪水で設計し、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 年確率程度の設計洪水で設計するが、数百年確率の洪水に対しても致命的な被災にならない、あるいは被災しても容易に復旧できる構造である。この考えにより道路整備を迅速に進めることが可能になるであろう。
- 5) 【低交通量道路での渡河施設】 その他に高速道路などの大幹線ではない主要道路の場合は、具体的には以下のような構造が経済的な方法として考えられる。
- ・ 大河川の氾濫原道路盛土あるいは中小河川の取付け盛土については、同じ設計対象洪水であっても橋梁と盛土で余裕高（freeboard）に差を付けて、余裕高の小さい盛土部での越水を許容するこれにより水位上昇時に盛土部が橋梁よりも先に越水することで橋梁部損傷のリスクを低減することができる。盛り土部は被災しても比較的安価に復旧可能であるからである。
 - ・ 設計対象洪水の計画規模を比較的低く設定した沈下橋とコーズウエー、あるいは洗い越しを建設する。これらの渡河施設では河川流量がある規模を超えた場合には道路交通が遮断されるが、一方工事費を節減できるので、B/C に見合った計画となる場合がある。なおこれらの沈下橋、コーズウエー、洗い越しなどは、歴史的には世界中で多くの施工例が有り、また日本の無償資金協力でも実績がある。これらの事例を**付属資料 2**に整理した。
3. 今後の課題は以下のとおりである。
- 1) 海外無堤河川での渡河施設の計画・設計については、これまでは個々の現地状況に応じて検討され、ベテラン土木技術者の経験に基づく判断によるところが大きかった。しかし ODA 事業においては、技術的な視点からの事後評価は正式な手順とされてこなかった。このため、ベテラン土木技術者の技術的判断による、無堤河川渡河にかかる技術的な成功例も、あるいは失敗例もほぼ開示されることもなく、伝承・共有されては来なかったと思われる。今後はこれまでの実績・事例を単に経済社会的側面に限定することなく、技術的な側面まで踏み込んで総合的に分析し評価し、暗黙知ともいえるベテラン技術者のノウハウを形式知化して、技術の共有化、普及を図るべきである。
- 2) 無堤河川（自然河川）渡河施設の計画・設計は、日本の多くの専門家には海外における重要課題として意識されてこなかった。そのため無堤河川の特性を意識せずに渡河施設が設計されてきた。例えば氾濫原の取付け道路による洪水流の収縮は流速と洗堀の増大をもたらすが、この現象に対して十分な水理学的検討と対策工検討を実施していない事例が多い。このことに鑑み、ODA の実施機関においては、無堤河川渡河に見られるように、海外特有の技術的課題に関して第一の利害関係者として関心を持ち、事業の技術的評価から問題解決、そして再評価の PDCA サイクルを構築する必要がある。このことが ODA の質を高め、より効果的な成果に繋がると考える。

参考文献

- 1) Ministerio de Transporte e Infraestructura, Direccion de Vialidad : Reporte grafico de danos, Nicaragua, 1998
- 2) 国際協力事業団（大井英臣他）：ホンジュラス・ハリケーン災害復興調査報告書、1999 年 2 月 14 日、II-1、岡原美知夫、1998 年 10 月ホンジュラス国においてハリケーンミッチにより被災した橋梁の復旧に関する技術的所見及び助言、pp. 2~3、写真 3-3
- 3) 横倉順治、須賀堯三：開発途上国の氾濫原道路とその橋梁計画のあり方-河川防災の視点から、水工学論文集第 44 巻、2000 年 2 月、p337~342、（同論文に掲載された写真は細川容宏氏提供）
- 4) 国際協力事業団派遣事業部、渡辺正幸：ニカラグア共和国災害復興専門家派遣要請調査報告書 第一篇総括報告第 4 章 4-7、1999 年 4 月
- 5) 国際協力事業団、パシフィックコンサルタンツインターナショナル：カンボディア王国国道 6A 号線橋梁整備計画基本設計調査報告書、p.3-3、平成 12 年 7 月（2000 年）

- 6) 国際協力事業団, オリエンタルコンサルタンツ: カンボディア王国国道 6・7 号線改修計画基本設計調査報告書, pp. 3-56~3-57, 平成 9 年 1 月 (1997 年)
- 7) 国際協力事業団, セントラルコンサルタンツ: ホンジュラス, ニカラグア無償資金協力実施促進調査団写真集, 平成 10 年 11 月 27 日~平成 10 年 12 月 12 日