

ハリケーンカトリーナによる橋梁被害の特性

川島一彦¹

¹フェロー 工博 東京工業大学教授 大学院理工学研究科土木工学専攻
(〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

1. はじめに

2011年3月東日本大震災では多数の橋梁が津波によって流出する等の被害を受けた。我が国でも1923年関東地震、1933年三陸津波地震等により橋梁の被害が生じているが、当時はまだ津波による被害を防止することなど思いもよらなかった時代であった。また、終戦前後には1944年南海地震、1946年南海地震が立て続けに生じたが、戦時中であつたため調査が制限されたり、敗戦後の混乱期で調査が十分されていなかった。戦後の復興期から現在までの間には1960年チリ津波地震、1964年新潟地震、1983年日本海中部地震、1993年北海道南西沖地震等が起っているが、津波によって大規模に道路や鉄道が被害を受けていなかったこともあり、現在まで、橋梁に対する津波対策は考えてこられなかった。

一方、米国では2004年ハリケーンアイヴァン(Ivan)、2005年ハリケーンカトリーナ(Katrina)等、ハリケーンによって度々橋梁が被害を受けてきており、そのための対策が検討されてきている。津波による橋梁被害とハリケーンに伴う高潮による橋梁被害とは同じメカニズムではないが、水面の上昇によるPC桁の浮上がり等、類似した被害形態も見られることから、2012年3月にハリケーンカトリーナにより大被害を受けたニューオールリンズ市北部に位置するポンチャントレイン湖の東端を横断する州際道路10号線(I-10)等の被害を現地調査する機会を得たので、ここに報告する。

2. カトリーナ及び調査の概要

カトリーナは2005年8月に米国南東部を襲った大型のハリケーンであり、8月25日にフロリダ州に

上陸後、ミシシッピ州、ルイジアナ州に甚大な被害をもたらした。このため、ミシシッピ州のガルフポート、ビロクシやルイジアナ州のポンチャントレイン湖に面するニューオールリンズで壊滅的な被害が生じた。特に、ニューオールリンズ市では、北部に位置する南北約40km、東西65kmと広大な面積を持つポンチャントレイン湖の堤防が決壊し、市内の約8割が水没したと言われている。犠牲者は約1800人、行方不明者は約700人とされているが、これらの大部分がルイジアナ州に集中している。

今回のハリケーンカトリーナによる橋梁被害調査は米国連邦道路庁 Philip Yen 博士の支援により連邦道路庁ルイジアナ地区事務所及びルイジアナ州の協力の下に、2012年3月17日、18日に実施した。調査対象は、I-10の他、ポンチャントレイン湖横断道路、これにほぼ平行した走る鉄道橋、ポンチャントレイン湖の東端に位置する州道90号線等である。

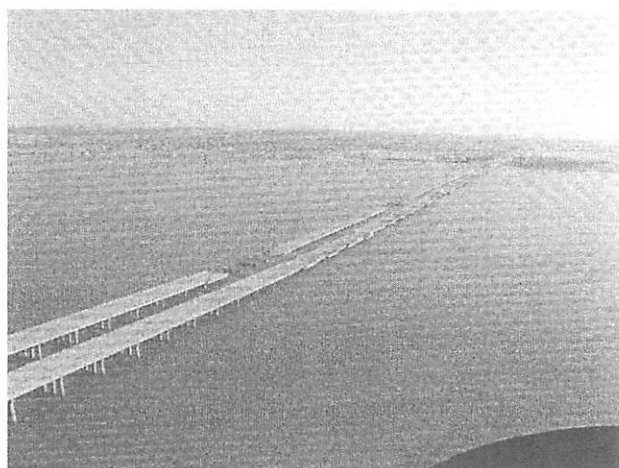


写真-1 I-10の被害（上方がニューオールリンズ市、右側がSouth Bound、左側がNorth Bound、Art Aguirre氏による）

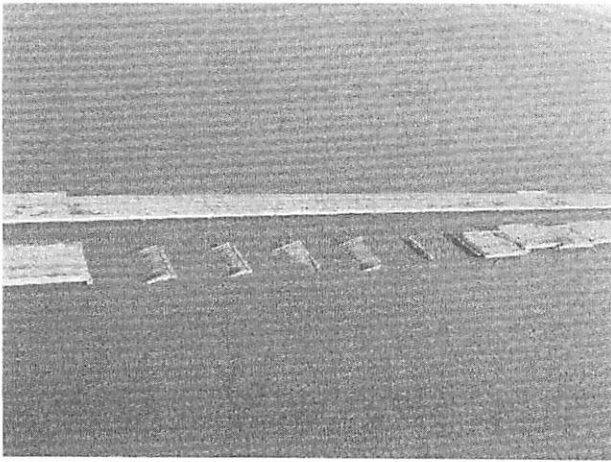


写真-2 I-10のSouth Boundの被害（右側がニューオーリンズ市、下がSouth Bound, Art Aguirre氏による）

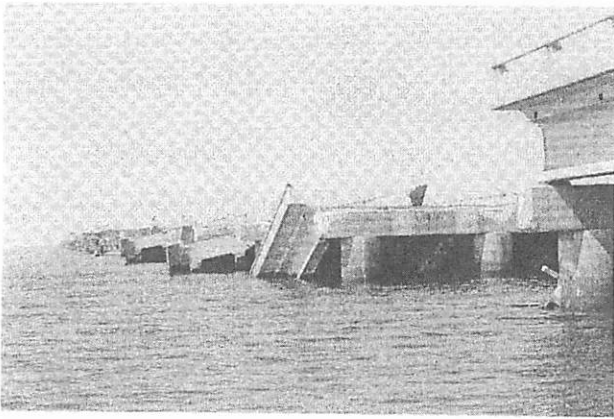


写真-3 橋軸方向に移動し落橋した橋（I-10のSouth Bound, Art Aguirre氏による）

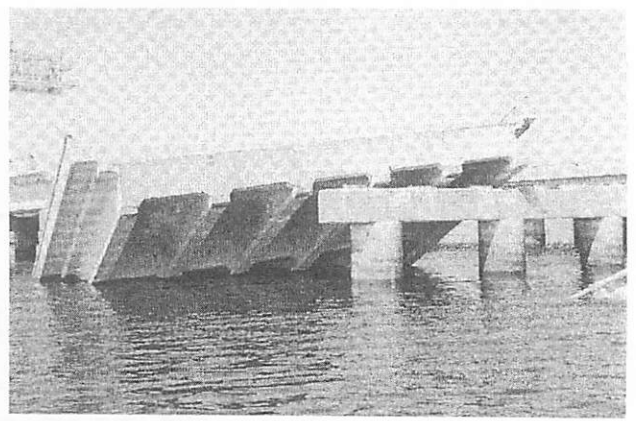


写真-4 橋軸直角方向に移動し落橋した橋（I-10のSouth Bound, Art Aguirre氏による）

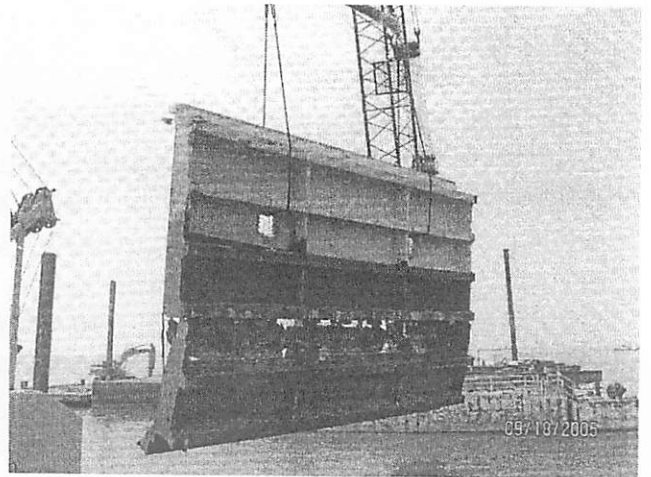


写真-5 鉄橋中の桁（I-10, Art Aguirre氏による）

3. 旧I-10の橋梁被害

I-10 は支間長 30m 程度の PC 桁 6 本から構成されていた。橋脚は 3 本のパイルベント橋脚からなる。

写真-1, 写真-2 は被災直後の I-10 である。高潮によりポンチャントレイン湖の東側から流入した大量の海水が湖の西岸に吹き寄せられ、これが東側にはね返って I-10 にぶつかった結果、東側に位置する North Bound よりも西側に位置する South Bound の方が著しい被害を受けた。

写真-3, 写真-4 は代表的な落橋であり、橋軸方向に徐々に桁が移動し落下したものもあれば、橋軸直角方向に 4m 以上移動し、落下したものもある。一気に桁が移動したのではなく、高潮により水面が上昇し、波が桁にぶつかったり、水流によって桁が少しずつ移動し、小さな移動が蓄積したことにより落

橋に至ったと考えられている。この際、桁下空間に閉じ込められた空気によって桁に浮力が作用し、桁移動をより大きくしたり、桁が浮上がった可能性が指摘されている。

写真-5 はハリケーン後に撤去中の桁である。床版に穴が空いているが、これらはケーブルの取り付け等、桁を撤去しやすくすると同時に、バージに積み込めるようにするために、ハリケーン後に開けられたものである。支承部を除けば、桁自体には大きな損傷は認められない。桁の両端と同時に中間の 2 箇所計 4 箇所にダイヤフラムが設けられている。これらが、水面が上昇した際に桁下空間に空気を閉じ込め、上述したように、桁に浮力が作用する原因になったと考えられる。

写真-6 は被災当時のままに放置されている当時の I-10 である。右側の桁は落下し、左側の桁も左方向に移動し、落橋寸前であったと考えられる。パイルベント橋脚や横ばり（キャップビーム）自体には損



写真-6 被害当時のままに残されている落橋部 (I-10)

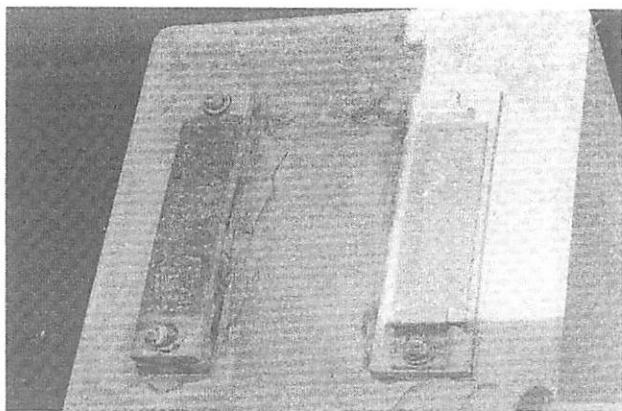


写真-9 下支承 (I-10, Art Aguirre氏による)



写真-7 被害当時のまま残る上沓 (I-10)

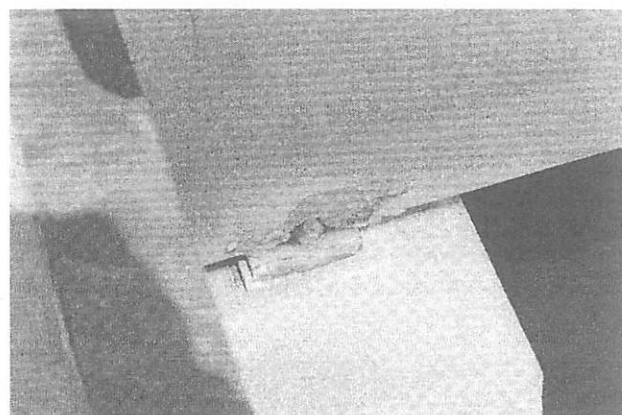


写真-10 桁移動に伴い桁側面のコンクリートが剥離し、外側に飛び出した下アンカーボルト (Art Aguirre氏による)

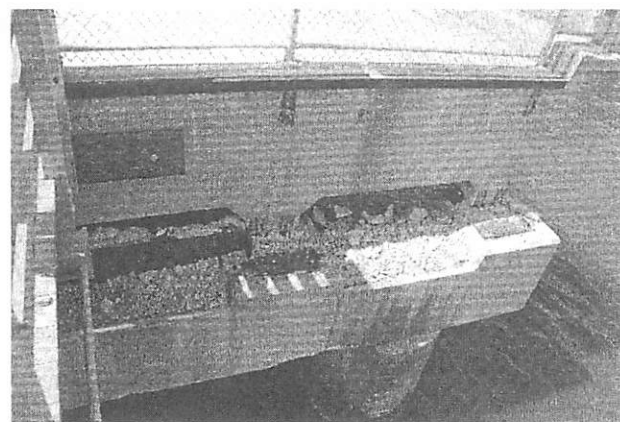


写真-8 支承部 (I-10, 向こう側の桁は橋軸方向向こう側に移動している)

傷は認められない。写真-7 は写真-6 に示した橋脚の端部の支承部を示したものである。PC 桁と一体となっていた上沓が残されている。

桁と上沓の固定度は相当弱いと推定される。橋脚の端部ではコンクリートが削り取られており、右側の桁が落下していく際に付けたものと考えられる。

写真-8 は別の桁の支承部である。下沓と考えられる橋軸直角方向の両側に小さな突起の付いた鋼板が残っている。ただし、支承を支持する横ばりには目立った損傷は生じていない。

写真-9 は横ばり上に残された下沓と考えられる鋼板である。両端に 2 本のアンカーボルトがあるがいずれも破断している。ボルト径はせいぜい 20mm 程度と小さなものである。写真-10 は支承部において桁の下フランジの側面が剥離し、そこからアンカーボルトが飛び出している状況である。このアンカーボルトが破断した状態が写真-9 である。これから見ると、上沓を桁に固定するアンカーボルトに対する桁コンクリートのかぶりりはほとんど無い。

写真-11 は相隣る 2 連の桁間の損傷である。左側の桁の下端部には大きなクラックが生じており、支承作用力に抵抗できないために生じたクラックと考えられる。また、桁の上部では桁衝突によると考えられるコンクリートの剥落が生じている。はっきり

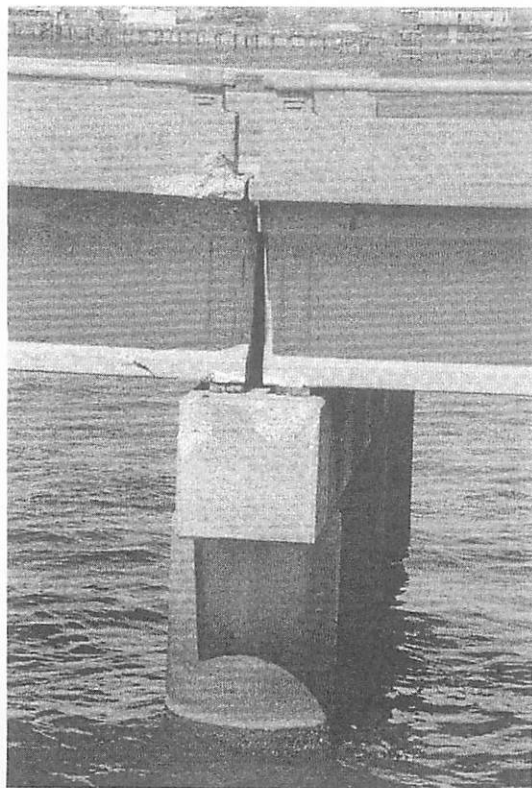


写真-11 桁衝突による桁の損傷と支承部の損傷(I-10)



写真-12 床版に開けられた穴 (I-10)

わからないが、少なくとも端部に位置する支承には損傷は生じていないようである。しかし、桁間の空隙を見ると、上側に比較して下側が不自然に大きくなっており、この位置にあるパイルベントが沈下した可能性がある。

写真-12 は海水面が上昇し、桁下に閉じ込められた空気によって桁に浮力が生じないように、床版に応急的に開けられた空気穴である。穴の直径は10cm 程度であり、桁の両側に軸方向に 10m 間隔程度で開けられている。米国では、ミシシッピー川等の河川の水位上昇によって桁が流出しないように、しばしばこうした措置が講じられているという。

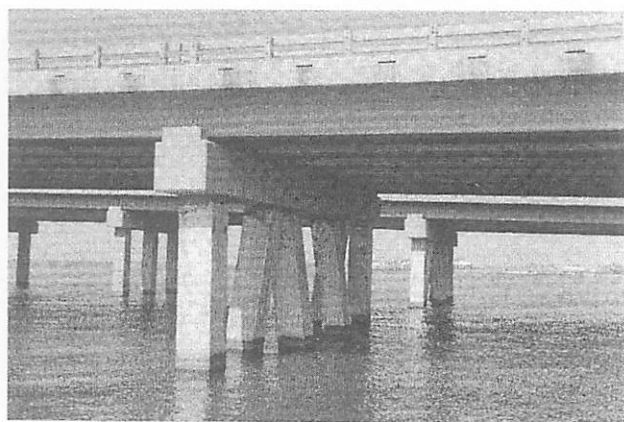


写真-13 6本杭によって支持され、中央の4本は互い違いになっているパイルベント橋脚 (I-10)

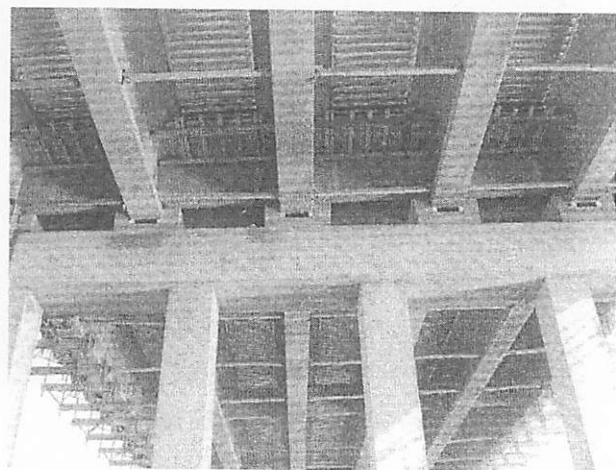


写真-14 高潮による橋軸方向の桁移動を抑え得る構造 (I-10)

4. 新 I-10 におけるハリケーン対策

復旧のため新設された I-10 ではハリケーンによる桁被害を防止するため、いろいろな対策が盛り込まれている。

写真-13 は 6 本杭から構成されるパイルベント橋脚である。旧橋よりも桁位置を高くし、高潮の影響を受けないようにしている。5 径間桁連結構造とし、端部橋脚を支持するパイルベント橋脚では、中央の 4 本の杭は橋軸方向に互い違いに配置された斜杭となっており、橋軸方向の剛性を高めている。

写真-14 は PC 桁を支持する支承部において、下フランジを包み込むようにセットされた橋軸直角方向の移動制限装置である。端部横桁として鋼板が使用されている。桁移動制限装置の施工時の状況を示したのが写真-15 であり、下フランジを包み込むように配筋されているのがわかる。写真-14 では端部

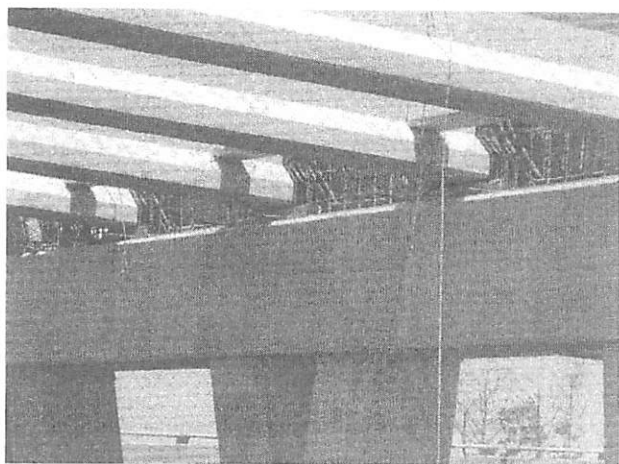


写真-15 橋軸直角方向の桁移動制限装置(I-10)

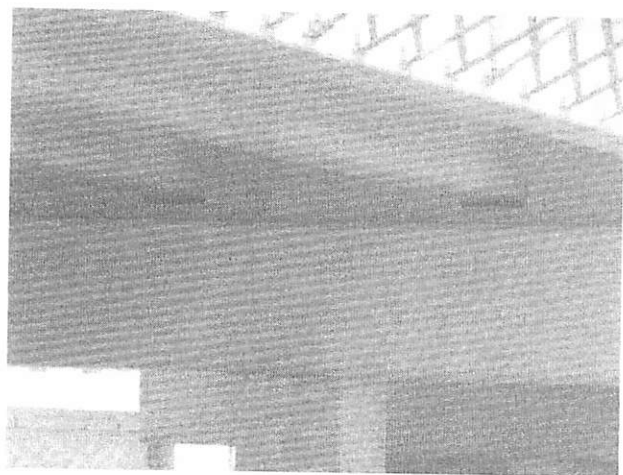


写真-16 橋軸直角方向の桁移動制限装置 (I-10)

横桁として鋼板が使用されているが、写真-16 は RC 構造の端横桁をセットしたものである。

両端の取り付け盛土に近い位置では橋脚高さが低くせざるを得ないため、写真-17 に示すように、波により桁に作用する横力を小さくするため、背の低いスラブ桁を採用し、橋脚の横ばりと一体構造にしている。また、最端部では、写真-18 に示すように、ゴムパッドを用いて桁を支持し、地盤との相対変位を吸収するようにされている。

5. まとめ

2005 年ハリケーンカトリーナにより壊滅的な被害を受けたニューオールリンズ北部に位置するポンチャントレイン湖を横断する I-10 の被害を現地調査した。本調査から明らかになった事項は以下の通りである。

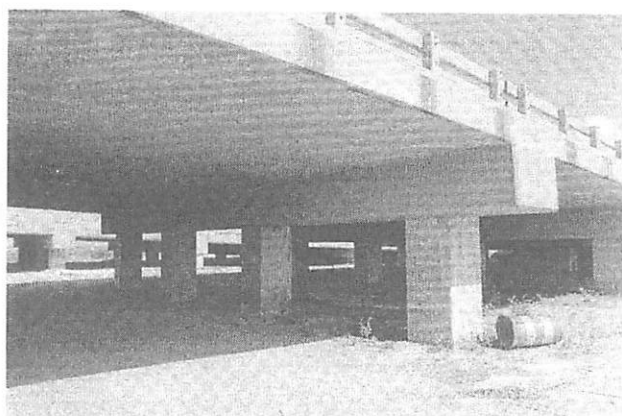


写真-17 端部では背の低いスラブ桁を採用し、横ばりと一体構造としてある

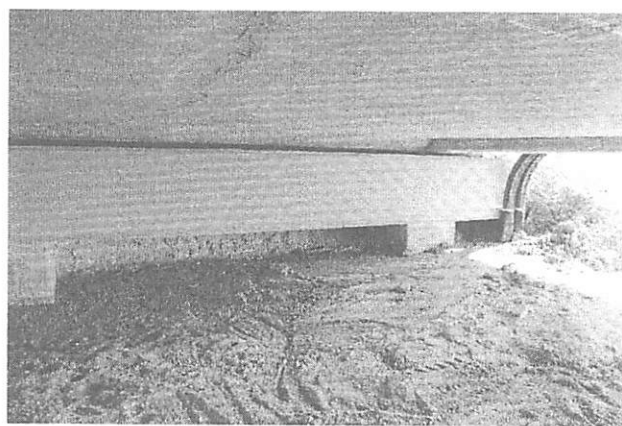


写真-18 端部ではゴムパッドを用いて裏込土との繰短変位を吸収する構造が採用されている

- 1) 高潮により I-10 は壊滅的な被害を受け、旧橋は放棄され、新橋を建設して復旧されている。
- 2) 旧橋は高潮による水流や波力により橋軸方向に移動して落下したり、橋軸方向に移動して落下した。海水面が上昇し、ダイヤフラムで隔壁された PC 桁下空間に閉じ込められた空気による浮力が、桁の落下に直接、間接に影響したと考えられる。
- 3) 桁下空間に閉じ込められた空気による浮力を低減させるため、床版に直径 10cm 程度の穴を橋軸方向に約 10m 間隔で開けた例がある。こうした対策は、ミシシッピ川の洪水による桁流出を防ぐため、昔から実施されてきたと言われている。
- 4) 地震力をほとんど見込んでいないため、支承周りの抵抗力が小さかったことも、高潮による被害を助長したと考えられる。鋼製線支承が使用されていたが、上支承と桁の固定が著しく弱かったと考えられる。ただし、パイルベント橋脚自体の被害は生じていない。
- 5) 復旧のための新橋建設では、(1)桁高さを高くし、

高潮の影響を受けにくいようにしている、(2)桁の橋軸直角方向の移動を拘束するために、PC 桁の下フランジを包み込むように移動制限装置を設けている、(3)桁高さを低くせざるを得ない端部では、高潮による水圧をできるだけ低減するため、背の低いスラブ桁が採用され、さらに、橋脚横桁と固定構造とされている。

謝辞

本研究は（独）科学技術振興機構の J-RAPID の一環として実施したものである。橋梁の現地調査は UJNR 日米耐風耐震構造専門部会の一環として実施

したものであり、調査に際して、全面的にご協力いただいた連邦道路庁 Phip Yen 博士、（独）土木研究所田村敬一氏、また、現地調査に同行していただいた連邦道路庁ルイジアナ地区事務所の Art Aguirre 橋梁技師、ルイジアナ州交通局の Hossein Ghara 主任橋梁技師に厚くお礼申し上げる次第である。また、ミズーリー大学の Genda Chen 教授からは各種の貴重な資料を頂いた。

参考文献

- 1) Chen, G., Witt, E.C., Hoffman, D., Luna, R. and Sevi, A.: Analysis of the Interstate 10 Twin Bridge's collapse during Hurrican Katrina, USGS