

(4) New Orleans after Hurricane Katrina: A First Look

Robert A. Dalrymple, Johns Hopkins University, USA. (rad@jhu.edu)

INTRODUCTION

After the failure of the hurricane protection system and the flooding of the City of New Orleans during Hurricane Katrina, a joint site visit team comprised of engineers and scientists were the first to examine the failed levees and floodwalls. This joint team, comprised of both civilian and U.S. Army Corps of Engineers members, visited a number of sites in the New Orleans area to gather data on possible failure mechanisms.

THE TRIP

Beginning on October 2, 2005, two team of engineers from the American Society of Civil Engineers' Institutes, COPRI and GEO Institute, joined a team from the University of California, Berkeley, and one from the Corps of Engineers, primarily from the Engineering Research and Development Center, to examine the failed levees and floodwalls in and around the City of New Orleans.

At the time, the failure of the hurricane protection system for the city was believed to be overtopping, as the system was designed for approximately a Category 3 (Saffir-Simpson Scale) hurricane, and it was believed, at the time, that the Hurricane Katrina storm surge exceeded the design water levels.

The hurricane protection system in New Orleans is comprised of levees, surrounding the city to protect it from Lake Pontchartrain to the north, Lake Borgne to the east, and the Mississippi

River, which passes through the city, and floodwalls along the drainage canals that deliver water pumped from the city to Lake Pontchartrain. These canals are open to the lake.

At the outset of our inspection, which began with the 17th Street Canal, it was clear that the floodwalls had not overtopped at the canal and another mechanism was responsible. This was also true at the London Avenue Canal. Yet, at other locations in the eastern of the city, overtopping clearly occurred, such as along the Industrial Canal, which connects the Mississippi River to Lake Pontchartrain and the Mississippi River Gulf Outlet, a canal that goes directly from New Orleans to the Gulf of Mexico.

This presentation will show many of the floodwall and levee failures and discuss preliminary findings as to the failure mechanisms. It also will show that levees, at the proper elevation, and constructed well, did withstand the severe storm.

REFERENCE

R.B. Seed, P.G. Nicholson, R.A. Dalrymple, J.A. Battjes, R.G. Bea, G.P. Boutwell, J.D. Bray, B.D. Collins, L.F. Harder, J.R. Headland, M.S. Inamine, R.E. Kayen, R.A. Kuhr, J. M. Pestana, F. Silva-Tulla, R. Storesund, S. Tanaka J. Wartman, T.F. Wol_, R.L. Wooten and T.F. Zimmie, Preliminary Report on the Performance of the New Orleans Levee Systems in Hurricane Katrina on August 29, 2005, UCB/CITRIS-05/01, Nov 17, 2005.

ハリケーンカトリーナ後のニューオーリンズ：最初に目にしたもの

ジョンホプキンス大学教授 Robert A. Dalrymple

はじめに

ハリケーンカトリーナによってハリケーン対策システムが破壊され、ニューオーリンズ市が浸水した後、技術者や研究者からなる合同現地調査隊が初めて、決壊した堤防の調査を実施した。民間人と米国陸軍工兵隊員で構成されたこの調査隊は、ニューオーリンズの周辺のあちこちで、考えられる破壊メカニズムを検討するために必要なデータを収集した。

現地調査

2005 年 10 月 2 日から、米国土木学会の海岸・海洋・港湾・河川委員会 COPRI と地盤工学委員会 GEO-Institute の 2 つの技術者による調査団は、カリフォルニア大学バークレー校による調査隊、米国陸軍工兵隊の工学研究・開発センターを中心とする調査隊に加わり、ニューオーリンズ市とその周辺で決壊した堤防の調査を実施した。

ニューオーリンズのハリケーン対策施設は、サファ・シンブソン・ハリケーン・スケールでほぼカテゴリー3 に位置づけられるハリケーンに対し、設計されたものである。そのため、調査を開始する時点では、この施設が越流で破壊したと信じこんでいた。また、ハリケーンカトリーナによって設計潮位を超える高潮が発生したとも信じこんでいた。

ニューオーリンズのハリケーン対策施設には、北に位置するポンチャートレン湖、東に位置するボーン湖、そして市街地を貫くミシシッピ川から、市街地を守るために市街地をとり囲むように築かれた堤防がある。また、市街地からポンチャート

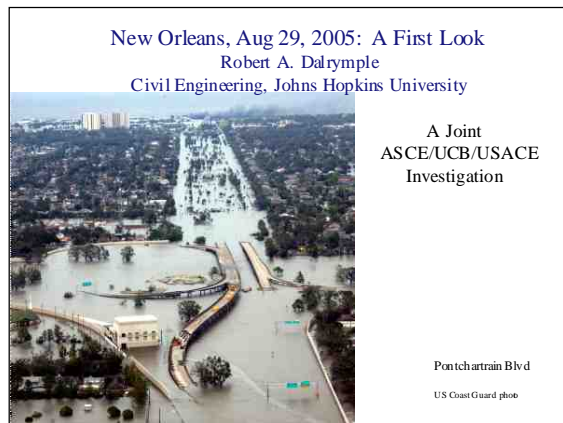
レン湖へポンプで排水する運河に沿っても堤防がある。これらの運河はポンチャートレン湖に開いた状態になっている。

我々の調査は 17 番街運河から始めたが、そこでまず分かったことは、「この運河では堤防の越流は生じておらず、他に何らかの破壊メカニズムがあるはずだ」ということである。ロンドン通り運河も同じであった。しかし、ニューオーリンズ市の東部に位置する別の地点では、明らかに堤防の越流が生じていた。ミシシッピ川、ポンチャートレン湖、Mississippi River Gulf Outlet（ニューオーリンズからメキシコ湾へ直接出るために掘削された運河）につながる工業運河がその例である。

今回の講演では、多くの堤防の破壊状況を紹介するとともに、破壊メカニズムに関して明らかになったことについて議論する。また、十分な高さでしっかりと築造された堤防は、このハリケーンでも破壊に至らなかったことを示したい。

参考文献

R.B. Seed, P.G. Nicholson, R.A. Dalrymple, J.A. Battjes, R.G. Bea, G.P. Boutwell, J.D. Bray, B.D. Collins, L.F. Harder, J.R. Headland, M.S. Inamine, R.E. Kayen, R.A. Kuhr, J. M. Pestana, F. Silva-Tulla, R. Storesund, S. Tanaka, J. Wartman, T.F. Wol_, R.L. Wooten and T.F. Zimmie, Preliminary Report on the Performance of the New Orleans Levee Systems in Hurricane Katrina on August 29, 2005, UCB/CITRIS-05/01, Nov 17, 2005.



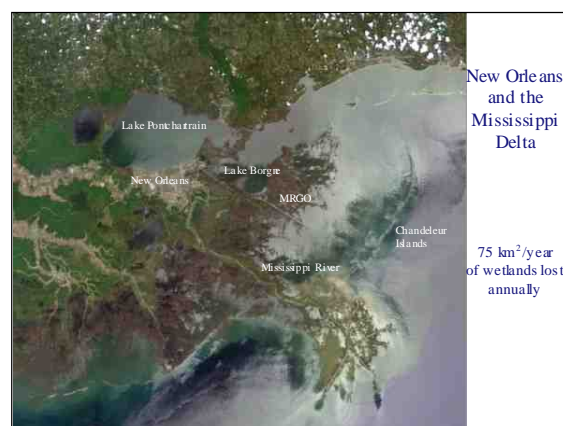
ご紹介ありがとうございました。また、日本に来ることができて、うれしく思います。私どもをご招待していただいた本セミナーの組織委員会の皆さんに御礼申し上げたいと思います。

それでは私から、調査隊がニューオーリンズに入って技術者として初めて調査した時の状況について、ご報告申し上げます。

ご存知のように、この災害の直後にニューオーリンズに技術者が入って、そこでどれくらいの被害が発生しているかを自ら確認しなくてはならないことになったわけです。そこで調査隊が編成されたわけです。この調査隊には二つの組織が関わっております。米国土木学会からは私とニコルソン先生、それから工兵隊のメンバーも加わっております。また、カリフォルニア大学バークレー校からも加わり、四つの編成隊となっております。このように、民間と軍の技術者が共同して堤防の決壊の原因を調べることになったわけです。

二つ目のハリケーン、すなわちハリケーンリタがその後に来襲しました。そのため、ハリケーンによる被害が同じ地域、被災地で繰り返されたのであります。

二つ目のハリケーン、すなわちハリケーンリタがその後に来襲しました。そのため、ハリケーンによる被害が同じ地域、被災地で繰り返されたのであります。

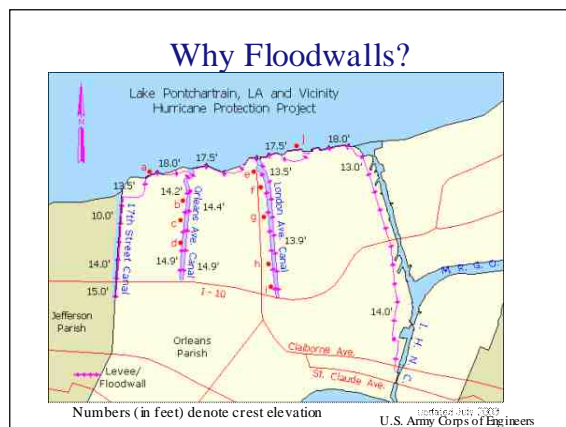


それではまず、皆さんにニューオーリンズがどこにあるかをお見せしたいと思います。エッジさんからお話がありましたが、ミシシッピ川がここにあつて、ニューオーリンズはここにあります。それから、ここがポンチャートレン湖であります。こちらがニューオーリンズの東側になり、ニューオーリンズの南側には川が流れています。つまり、ニューオーリンズは三方を水に囲まれているのです。ここでさらに重要なことは、ミシシッピ川に

は、何千マイルも続く堤防が治水のために築造されているということです。この築造によって、確かに氾濫を防ぐ効果はあったわけですが、川の水が湿原の方へ流れて行かなくなったために、湿原がどんどん失われてしまっています。その侵食の速さをここに示しています。何と毎年75平方キロメートルの湿原が失われてしまっているのです。これは、ミシシッピ川を流下する泥が供給されなくなってしまったからであり、堤防による悪影響ということになります。これだけの湿原が毎年失われるという環境の変化があったのです。

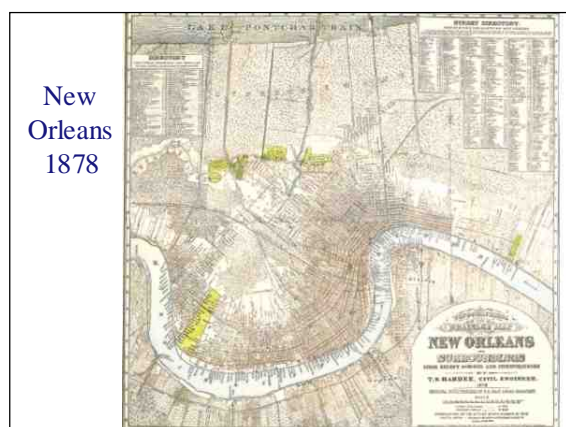


この図に示すように、ミシシッピ川はニューオーリンズの街を、横断するように流れています。ニューオーリンズの周辺には 3 つの運河があり、これらは街を貫いています。この図の右側が東、下側が南です。ミシシッピ川の堤防には決壊がなく、越流ありませんでした。ニューオーリンズの市街地の浸水は、東側と北側にある運河の堤防の決壊が主な原因であったわけです。



次に、運河の排水についてですが、この 3 つの運河は住宅街を貫いております。17 番街運河の堤防は決壊しましたが、その隣のオーリンズ通り運河の堤防は決壊しませんでした。さらにその隣のロンドン通り運河の堤防には決壊がありました。こちらが工業運河でありまして、ポンチャートレ湖からミシシッピ川、メキシコ湾につながっています。メキシコ湾につながっている水路はガルファウトレットと呼ばれ、MRGO の略称で知られています。

ています。



こちらは昔のニューオーリンズの地図です。1878 年の地図であり、ミシシッピ川がこの図のように流れ、その川沿いにはフレンチクォーターがあります。この部分が旧市街でありまして、1878 年当時も排水しなくてはならなかったところです。したがって、運河が造られ、ポンプ場もここに造られております。このポンプ場で汲み出された水は運河を通じて湖に送り出されていたわけです。そして、今や、この湿原の部分も埋め立てられ、

市街地が広がっていったということでもあります。そして、市街地からの排水はカトリーナが来襲した今回も必要であったわけです。



す．住民達が既に避難していたために，最初はそれに気がつかなかったのです．

New Orleans: Some Facts

485,000 people (pre-storm)
 215,000 housing units
 U.S. Census 2000
 Avg. price: \$140,000
 Total: \$ 28 billion in housing alone

27,000 acres flooded: 42 sq. miles (Corps): 80% of city

28.5 billion ft³ of water were removed (NOAA)

洪水の最終的な状況を衛星写真で確認してみると，水がこのような流れていることが分かります．市街部の 80% が浸水したわけです．フレンチクォーターにはあまり水が押し寄せず，浸水しませんでした．ニューオーリンズにはかなり多くの人々が住んでおりました．東京ほどではありませんが，人口は 50 万人に近く，21 万 5,000 軒の家屋があったわけです．一軒あたり 14 万ドルぐらいの資産価値のものでありました．それが押し流されたということです．ハリケーンの後で，285 億立方フィートもの海水が排水されました．

ASCE/UCB/USACE Mission: Levee Failure Data Collection Beginning Oct 2, 2005

Not obvious what data was available

Not clear what the failure mechanisms were for the hurricane protection system

A forensic study

Failure data is ephemeral

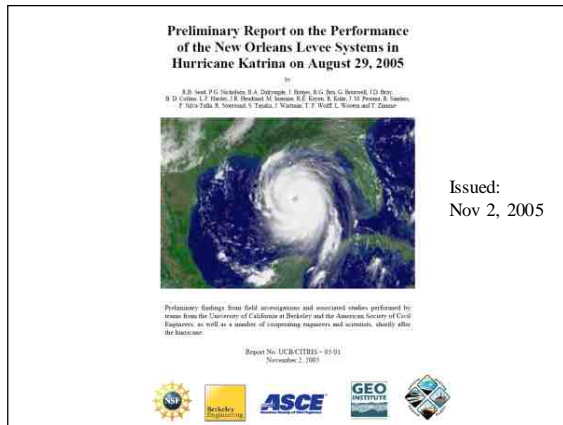
Repairs cover data
 Clues about failures are destroyed with time

私どもの調査隊は，堤防が決壊した原因について，ここに示すようなデータを 2005 年 10 月に収集しました．

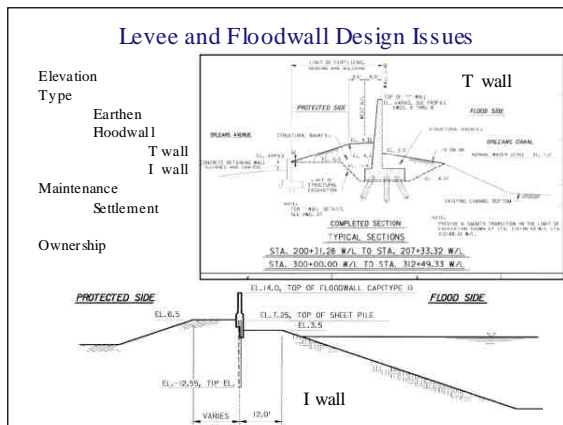
堤防の天端は高潮で生じた水位より高かったのに，何故このような決壊が生じたのでしょうか．カテゴリー 5 のハリケーンに対し，どのような決壊のメカニズムがあったのでしょうか．「堤防はカテゴリー 3 に対して設計していたため，越流が起きたのではないか．」というのが当初の考え方であ

ったわけですが，「必ずしもそうではないのではないか．越流だけが原因ではないのではないか．データを見ながら確認していこう．」ということになりました．

つまり，いわゆる法医学的な観点から，何が起きたのかをしっかりと鑑定していこう，ということになったわけです．この決壊に関するデータは，短時間でなくなってしまいます．気候や天候によって，また，復旧作業を進めていく過程で，何故このような決壊が起きたかを示す証拠は失われてしまいます．ですから，いち早く現地に行くことが重要でありました．証拠が失われる前に確認しなくてははいけなかったわけです．



この調査隊は報告書をまとめました。ニコルソン先生のお名前もこちらにあります。私の名前もあります。田中先生も私どもの調査隊の一員でいらっしゃいました。バッチェス先生にも、オランダの先生として、共同調査隊の一員として参加していただきました。ですから、大勢の技術者が関わったわけです。



ここで私どもは様々な形式の堤防を目にしました。アースレビーは、盛土だけでできている堤防です。フラッドウォールはコンクリートの板でできていて、I型壁と呼ばれる縦型のもので、シートパイルか鋼板によって支えられています。小さな堤防でよく使われている構造です。こちらはT型壁で、シートパイルで支持された形式です。



これが、ニューオーリンズの一番西側にある17番街運河のカトリナ直後の様子です。写真の向かって右側では運河の堤防が決壊していないことが分かります。排水機場は停止していました。左側では市街地には浸水が見られます。そのため、工兵隊はシートパイルを打ち込んで、緊急の修復作業をしたわけです。



この写真は空から撮ったものです。本来であれば、堤防がここに一直線上に、この延長線上にあるべきにもかかわらず、大きく左にずれてしまっています。そして、その両側を見て下さい。盛土の部分から堤防がずれてしまっていることが分かります。



さらに下流側へ行ってみますと、堤防に越流した痕跡のないことが分かりました。ここに越流できるはずの洗掘がないのです。てっきり越流があったと思い込んでいたのですが、このように芝が全然ダメージを受けていなかったのです。もし越流が起きていたらどういう状況を引き起こすのか、ということについては後でお見せしたいと思います。



これは 17 番街運河の近くであります。家屋に損傷が見られます。津波によって破壊されたあのシーンとよく似ているのではないのでしょうか。このように側壁に鉄筋が入っているにもかかわらず、強い水の流れて損傷していることが分かります。いかに強く速い水の流れであったことが分かります。



そして、このように木の根が抜けて横倒しの状態になってしまい、粘土の層がむき出しになっていました。



これは、決壊したところを緊急に修復しているところです。本来であれば、フラッドウォールのすぐ近くにあるべき盛土が、こんなにずれてしまっています。ですから、越流による破壊ではなかったと言えるわけです。どういうメカニズムで決壊したのかについては、ピーター・ニコルソン先生のお話を聞いて下さい。今後何年にもわたって研究を続けることが必要になると思います。

London Avenue Breach at Robert E. Lee Street (425')



では、お話を次の運河に進めたいと思います．
東の方に行くと、二つの運河があります．その一つがロンドン通り運河です．本来であれば、この線にあるべきであった堤防が下（西）の方にずれてしまっております．つまり、ここには強い水流があったことが分かります．堤防のすぐ近くに木があったということも分かります．このように運河に沿って植栽があるのは良くないわけです．

London Avenue Canal (North)



こちらをご覧ください．さきほど少し触れたと思うのですが、裏庭の数メートルぐらいのところまで木がずれて来てしまっています．この木は地盤が持ち上げられることによって根が抜けてしまい、さきほどの写真ではまだ青々としていたのに枯れてしまいました．

以上のように、ロンドン通り運河と１７番街運河は、同じような地盤的な破壊が起きたということを示しています．

Opposite Side of Canal:
London Avenue North
Breach
Note: Curve in Levees



Shigenobu Tanaka and
Sinkhole

それから、この写真は、同じ運河を反対側から見たものであります．つまり、本来なら真っすぐなのに、堤防のここ部分がずれてしまっています．しかしながら、決壊には至っておりません．水圧に負けていなかったということです．

田中先生が地盤の吸い出された穴を見ております．排水口のようなものです．それからまた、いわゆる噴砂という、水がぼこぼこと吹き出した跡も見られました．

High Water Line at Lakefront



バッチェス先生が最高水位の跡を見ているところです．ビリーさんが言ったように、観測装置が壊れたり、流失したりしたので、痕跡から最高水位を推定しなければなりませんでした．



この橋をご覧ください．この橋全体にはパラペットがついていましたが，破壊されております．

ロンドン通りで，最高水位の跡が見られましたが，明らかに越流には至っておりませんでした．

二つの運河，西側にある運河については，全く越流は見られませんでした．



この写真はポンチャートレン湖の堤防です．左側がポンチャートレン湖で，右側は住宅街です．

堤防の天端の草ははぎ取られていましたが，盛土はそのまま残ってありました．



ロンドン通りには二つの決壊がありました．堤防が決壊して，大量の水が流れ出した際に，土砂も大量に流れ出しました．このように，車と同じぐらいの高さで，建物の裏に砂が積み上がっていました．



さらに東には，工業運河という，ポンチャートレン湖とミシシッピ川をつないでいる運河があります．これに沿って堤防があります．ここにあるのが船からコンテナを積み下ろすヤードです．こちらの方にも堤防はありますが，こちらの方が強度の高い堤防です．



この部分を見てみましょう．これがニューオーリンズで初めて見つけた堤防の越流の跡です．ここで決壊し，マウンドにも侵食がありました．



に調査をしなければなりません．

これも同じ場所の写真です．ここでは決壊は免れたのですが，越流によって背後に溝ができ，シートパイルの基礎が露出しております．堤防の基礎に洗掘対策がほどこされていなかったために，このようになってしまいました．

私どもが調査をしているときに盛土の工事が行われておりました．数日後に行っていれば，恐らくこの溝は盛土で分からなくなっていたであります．ですから，このような場合にはいち早く



ゲートは事故によって破壊され，ハリケーンが来た頃はまだ修復されていなかったというわけです．こんなことがあってはいけません．

それから，自動車などを通すためのゲートがあります．これもゲートが決壊した箇所ですが，実はハリケーンカトリーナ以前に列車の事故でこのゲートが壊れてしまい，カトリーナがやってきた時には壊れたままだったわけです．そこで，土嚢を積んで備えたわけであります．私どもが現地調査をした時には，これはハリケーンリタに備えて積んだものかと思ったわけですが，実はカトリーナが来る前からここは壊れていたわけです．

Industrial Canal (IHNC)

North and South Breach



さて、今度は、9 番地区についてお話しします。ここでも二箇所で破堤がありました。堤防の背後には住宅があります。赤丸で示しているのはバージです。これはハリケーンが通過した後の状況で、住宅地から運河へ水が抜けています。すなわち、運河から住宅地に流れ込むタイミングではなく、その逆のタイミングで撮影されたものであります。

Industrial Canal Overtopping



この写真は一番南の決壊地点の状況ですが、ここにも堤体の裏側に溝ができており、明らかに越流があったと言えます。また、ここにバージがあります。スクールバスの上に乗っていますが、幸いも子供たちは既に避難しておりました。



この航空写真から、応急復旧の跡を見ることができます。グレーの部分が応急復旧した部分で、ここが元々の堤防です。そして、これが引き延ばされたシートパイルです。不思議に思うかも知れませんが、ここには全く住宅がありません。コンクリートの基礎だけが残っております。どうしてでしょうか。実は、堤防が決壊したときに、上屋が全て流されてしまったのです。決壊した区間では水の力が非常に大きかったものですから、シート

トパイルウォールが平らになるくらい伸び切ってしまいました。シートパイルウォールの長さをよくご覧下さい。決壊した区間よりずいぶん長くなっております。元々はここにぴったりとはまるべきものだったのですが、水圧によってこのように伸びてしまっております。

ここに土嚢が見えます。これらの土嚢は応急復旧のために積まれたものです。

Industrial Canal --Hurricane Rita



A.P. photo, 9/24/05

これはハリケーンリタのときの状況です．私どもがニューオーリンズに行くのが遅れたので，応急復旧した箇所が先に決壊してしまいました．先ほどバージの下敷きになっていたバスはこのバスです．こちらの方にもう一つ決壊箇所が見られます．

New Orleans East

<http://www.mvn.usace.army.mil/pao/response/amaps.asp>



U.S. Army Corps of Engineers

Updated July 2003

この図はニューオーリンズの東部の状況を示しています．堤防のあちこちが決壊しています．

MRGO Canal Overtopping

(north side)



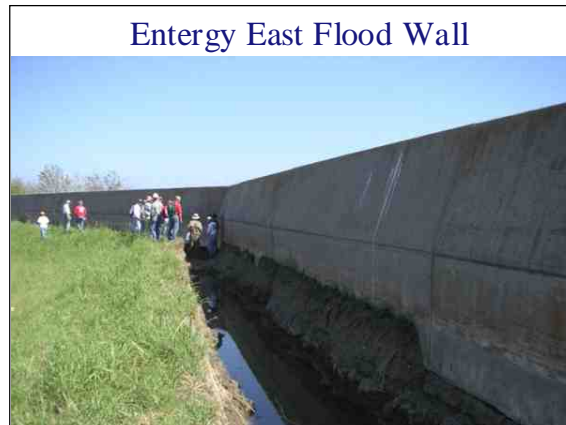
Entergy Levee Overtopping (from their security camera)

ビリー先生から先ほどお見せしましたが，ここには橋が架かっていて，二つの橋脚が見えます．ここには水が流れています．ニューオーリンズに行く前にこの写真を見ておまして，この堤防は恐らく大量の越流によって消失してしまっているのではないかと思いますのでしたのです．

MRGO LEVEE



ところが，実際に行ってみると，この写真のような状況になっておりました．確かに侵食はあったのですが，堤防としてはよくできたもので，ハリケーンに耐えておりました．



Entergy East Flood Wall

ここには越流による大きな溝ができておりました。しかし、基礎となる地盤はしっかりしておりました。



Transitions Problem

ニューオーリンズの問題の一つとして挙げられるのは、堤防がバラバラに造られたことです。時にはコンクリート製の堤防、時にはシートパイル、時には盛土だけであったりするのです。この写真には3種類が全てそろっています。後でコンクリート製のI型壁を乗せることを考えて、シートウォールということもあります。何れにせよ、堤防の高さがまちまちなので、水は低い区間から越流し始め、そこから決壊します。



Obliterated MRGO levee

これはMRGOの堤防です。この堤防は砂でできていたわけですが、大量の越水があって、すっかり削り取られて平らになってしまいました。

First Week Team Members

ASCE COPRI

- Robert A. Dalrymple, JHU
- John R. Headland, Moffatt-Nichol
- Jurjen A. Batjes, T.U. Delft
- Shigenobu Tanaka

ASCE GEO-Institute

- Peter C. Nicholson
- Francisco Silva, Consulting Engineer
- Joseph Wartman, Drexel
- R. Lee Wooten, GEI Consultant

University of California, Berkeley

- Robert G. Bea
- Raymond B. Seed
- Jonathan D. Bray
- Rune Storesund

現地調査チームのメンバーがここに書いてございます。

それでは、ここでピーター・ニコルソン先生にマイクをお渡して、今申し上げました内容についての分析をしていただきます。

【質疑応答】

（質問） 中村（国土技術政策総合研究所）と申します。アメリカに、ニューオーリンズと同様のリスクにさらされている都市は、他にございませんでしょうか。あるいは、ニューオーリンズとは特別な街なののでしょうか。

（回答） ニューオーリンズは特別だと言えらると思います。ただ、他にもリスクのあるところがあります。サクラメント・オブ・バレー、つまりカリフォルニアですね。ここにはかなり大規模な堤防システムがあります。たびたび洪水に見舞われておりますので、場合によっては悲惨なことが発生する可能性があります。また、ハリケーンという点ではメキシコ湾沿岸、そしてアメリカ東海岸でもハリケーンによる高潮被害の結構あるところがあります。ただ、ニューオーリンズほどの被害ではないかも知れません。ニューオーリンズはゼロメートル地帯であるのです。ハリケーンリタが来襲したときには、ヒューストンやガルベストーンでも警戒しました。テキサスのガルベストーンでは、1900 年に大規模なハリケーンによって 6,000 人の死者を出しております。そのため地盤を高くして安全性を高めましたが、リタが襲来した時には大きな被害が出るのではないかと懸念がありました。しかし、地盤を高くしていたおかげで、高潮はありましたが、すぐに排水されました。ところが、ニューオーリンズでは排水されることなく、どんどん浸水していったのです。

（質問） 私（司会者；田島，東京大学）から聞いてよろしいでしょうか。堤防の高さ、特に工業運河の堤防の高さは、ニューオーリンズの西側にある 17 番街運河のものと同様の高さだと思います。しかしながら、様々な解析によると、高潮は東から西へ流れたということです。つまり、高潮は東側の方が西側より高いと思うわけであります。それなのに、なぜ堤防の高さは西側も東側も同じだったのでしょうか。

（回答） 私には分かりません。先生のご指摘はその通りであります。確かに堤防は東の方が高くなっているべきでありましょう。