

## (5) FAILURE OF THE NEW ORLEANS LEVEES – GEOTECHNICAL ISSUES

Peter G. Nicholson, Ph.D., P.E., University of Hawaii at Manoa, peter193@aol.com

### INTRODUCTION

Hurricane Katrina was a major storm for the Gulf of Mexico and the Gulf Coast states of the U.S. However, it was not unprecedented nor was it the maximum storm which could strike the area. In fact, in a number of locations where failures occurred, design levels were in excess of the maximum storm surge created by Katrina.

It was expected and predicted that the high winds and anticipated storm surge would cause some damage and flooding as the storm made landfall and pushed inland. What was not fully appreciated was the consequences of a widespread failure of the Southeast Louisiana flood control system including New Orleans and surrounding areas.

### INITIAL FIELD ASSESSMENT

The American Society of Civil Engineers (ASCE) organized an independent team of experts to travel to New Orleans to conduct early reconnaissance of the affected area and establish ties with the U.S. Army Corps of Engineers' (USACE) investigative team. The team from ASCE's Geo-Institute was joined by members of the Coasts, Oceans, Ports and Rivers Institute (COPRI) and a National Science Foundation-sponsored team, predominantly from the University of California at Berkeley. The initial objective of all of the teams was to collect data and make observations to be used to assess the performance of the flood control levees in an attempt to determine why certain sections of the levee system failed while others did not.

What was found in the field was very different than what was expected given what was reported in the media. Rather than a few breaches through the city's floodwalls caused by overtopping, the teams found literally dozens of breaches throughout the many miles of levee system. From a geotechnical perspective, it was very interesting that many of the levee problems

involved significant soil-related issues. A number of different failure mechanisms were observed, including overtopping scour erosion, seepage and piping, and soil foundation failures.

The preliminary findings of the field assessment were presented to the US Senate Committee on Homeland Security and Governmental Affairs in November 2005 with a simultaneous release of a joint report by the ASCE and NSF teams.

### TECHNICAL INVESTIGATIONS

Over the past several months a number of investigations have been undertaken to assess the technical details of the levee failures and to establish the current condition of the entire hurricane/flood control system. The largest of these investigations, the Interagency Performance Evaluation Taskforce (IPET) was organized by the U.S. Army Corps of Engineers (USACE), and combined the efforts of a wide range of experts from government, industry and academia. Additional independent investigations were conducted by the NSF/UC Berkeley team and Team Louisiana, sponsored by the State of Louisiana and spearheaded by members from Louisiana State University's Hurricane Center.

While each of these investigations had various goals and objectives, all have concluded that a number of the failures and subsequent resulting damage should have been preventable given the state of engineering knowledge. A number of systemic flaws have been identified and many lessons have been learned from this disaster, which will assist in improving the practices of critical hurricane protection for New Orleans and other developed regions around the world.

Technical reviews of these investigations are now being undertaken to validate the findings and then present to the general public.

## ニューオーリンズの堤防の破壊 - 地盤的な問題

ハワイ大学教授 Peter G. Nicholson

### はじめに

ハリケーンカトリーナは、メキシコ湾や米国メキシコ湾沿岸の各州を代表するハリケーンであった。しかしながら、このハリケーンの強さは予想せぬものではなく、この地域を襲った最強のハリケーンでもない。実際、被災地の多くでは、設計潮位がカトリーナによる最大高潮偏差よりも高かったのである。

「ハリケーンが上陸して内陸に進むと、強い風が吹いて高潮が発生し、それが破壊や浸水を引き起こすであろう」ということは予期されていたし、予測もされていた。あまり喜ばしくないことに、ニューオーリンズとその周辺を含む南東ルイジアナ洪水防止システムが広範囲で機能しなかったことが問題になった。

### 初期の現地調査

米国土木学会 ASCE では、被災地の踏査と米国陸軍工兵隊 USACE の調査隊との連携を目的として、ニューオーリンズへ向かう、自主的な専門家チームを素早く組織した。ASCE の地盤工学会の調査隊には、カリフォルニア大学バークレー校を中心に、海岸・海洋・港湾・河川委員会 COPRI のメンバーや全米科学財団 NSF が後援する調査隊も合流した。何れの調査隊でも、洪水防止堤防の性能の照査に用いるデータの収集や観測を行うことを当初の目的としていた。そこには、「堤防が決壊したところとしなかったところがあるのは何故か」を突き止める意図があった。

現地に着いて分かったことは、メディアで報道され、思っていた状況とは、まるで違うということであった。調査隊が目当たりにしたものは、市街地の堤防が数カ所で越流によって決壊したことよりはむしろ、何マイルも続く堤防が本当に数十もの地点で決壊していたことである。地盤工学

の視点に立つと、この堤防の問題点の多くが土質に関係したものであり、非常に興味深かった。越流による洗掘、浸透とパイピング、土質基礎の破壊を含む、様々な破壊メカニズムが見られたのである。

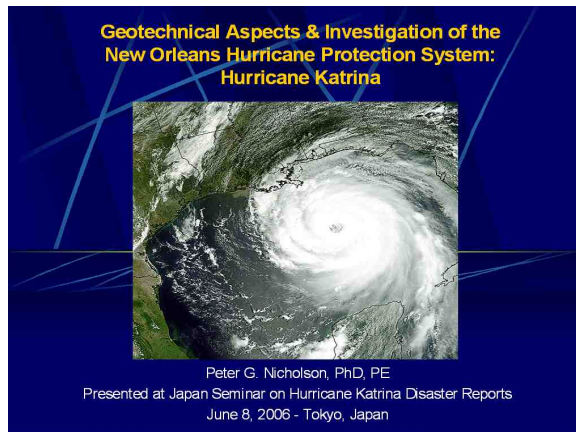
現地調査ですぐに判明したことは、2005 年 11 月の上院国家安全保障・政府問題委員会に報告され、それと同時に ASCE と NSF の調査隊による共同報告書としても発行されている。

### 専門的な調査

この数ヶ月間に、堤防の決壊を専門的に詳細を評価し、ハリケーン/洪水防止システム全体の現状を確かめるために、多くの調査が開始されている。その中で最大のものは関係機関合同性能照査タスクフォース IPET によるものであり、この組織は米国陸軍工兵隊 USACE によって組織され、産学官の様々な分野の専門家を結集させたものである。その一方で、NSF/カリフォルニア大学バークレー校の調査隊やルイジアナ調査隊によっても補足的な現地調査が行われているが、これらはルイジアナ州が後援し、ルイジアナ州立大学ハリケーンセンターの先導によって行われているものである。

これらの調査は、それぞれ色々な目標と目的をもって行われたが、「工学的な知識があれば、おびただしい数の被害やそれによる二次的な被害は防げたはず」と結論づけている。多くの弱点が明らかにされ、この災害から多くの教訓が得られた。ニューオーリンズや世界の他の発達した地域には際どいハリケーン対策を行っているところもあるが、この対策を見直す上で役立つだろう。

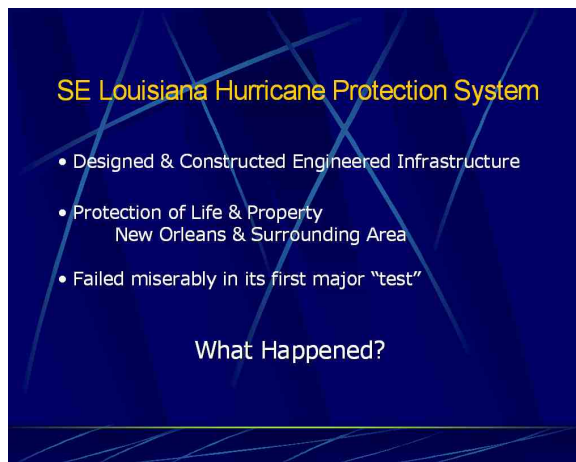
以上の調査の結果に対する技術的評価は現在行われており、それが終われば一般にも公開されるだろう。



ご紹介ありがとうございます。そして、私の方からも、このようなセミナーに招聘して下さったことを、心から御礼申し上げます。

私は、先にご発表のあったダーリンブル先生とともに、現地調査隊の一員を務めましたし、ここ数カ月にわたり、アメリカ土木学会のチームの一員として研究を続けてきました。ある意味、継続的な形で、カトリーナというハリケーンによる被害について研究を進めてまいりました。

ご説明があったかと思いますが、私は地盤工学的な観点から色々と説明を進めていきたいと思っています。今までの構造物の設計、施工において何が問題だったのか、あるいは、ハリケーン防災システムにどのような欠陥があったのか、ということについて、お話をしていきたいと思っています。

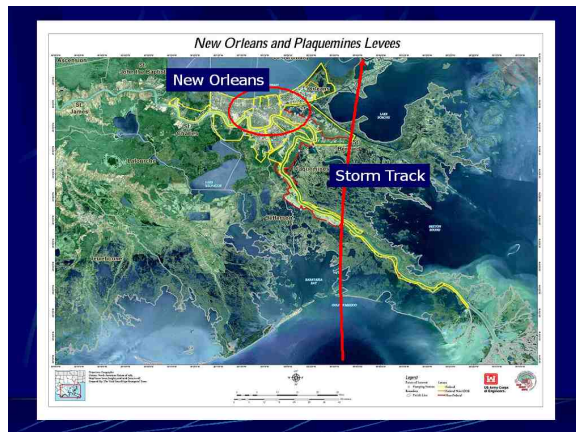


南東ルイジアナのハリケーン防災システムは、人工構造物として、設計、施工されたわけであり、ニューオーリンズ、それからその周辺地域の人命と財産を保護するためのシステムであったわけですが、ハリケーンカトリーナという最初に遭遇した試験で不合格になってしまったわけであります。

不合格になったのは何故でしょうか。このシステムは、橋梁等の一般的な土木構造物と同じような方法で設計されたわけではありません。100年にわたって、建設が進められてきたものであります。

1908年の建設当時は人力で行われました。土で造られた堤防は、既存の堤防の上にさらに盛り上げる方法で、上手くいった時も失敗した時もあったわけです。

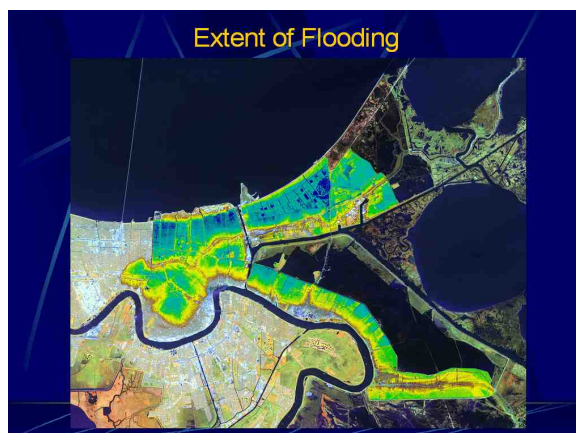
シートパイルをその上に打ち込んだという時もありました。特に1965年には洪水があったわけですが、それ以降の建設はまだ竣工しておりません。つまり、40年経った今でも1965年の洪水を機に始められた対策は完成していないという状況なわけであります。



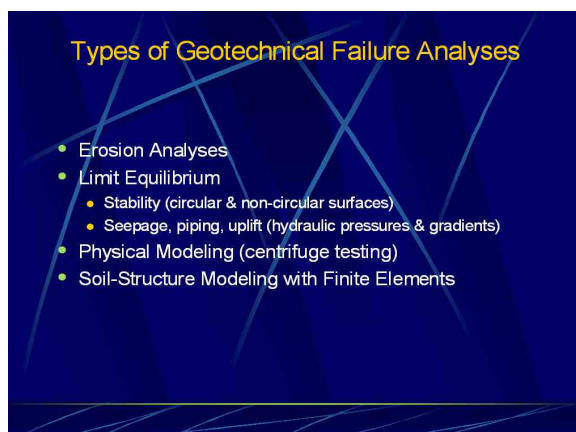
この図はカトリーナの進路を示しています。カトリーナが来襲する前から、若干の洪水はあるだろう、越流も起こるのではないか、と思われていました。



しかし、何故これだけ大きな被害になったと言いますと、決壊の箇所があまりにも多かったためであります。決壊によって、これだけ広い地域が浸水しました。

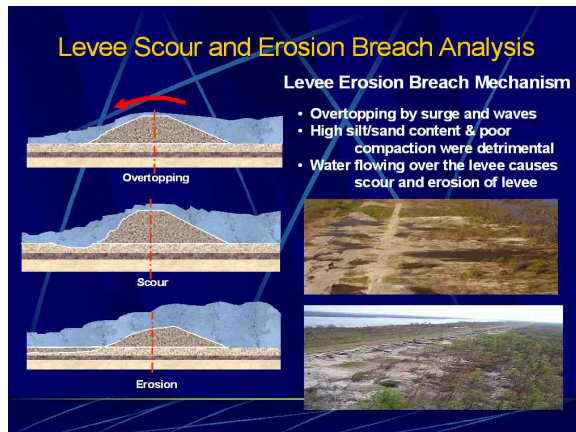


これは航空写真に浸水の範囲を示したものであります。今さっきも写真をご覧になったと思いますが、浸水のお大半は堤防の決壊によるものであります。

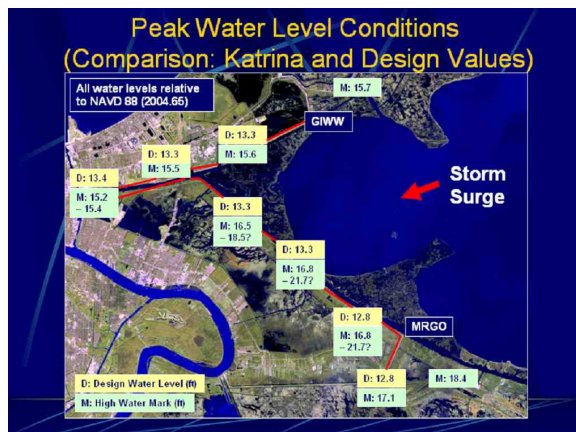


被災現場の調査の後に、IPET としては、堤防がどのような地盤工学的な欠陥によって決壊したのかについて、研究を進めました。例えば、侵食の程度、円形滑りに対する安定性、砂であればどれぐらいの透水性であったかについて、縮尺 1/50 で遠心載荷試験などを行って物理的なモデリングをし、有限要素法で数値解析をしたわけでありす。





ではまず、堤防の洗掘について見ていきたいと思いますが、堤防を上回るような高潮が発生し、越流が生じて、その堤防の裏法面ではこのように洗掘が生じたわけです。そして、完全に洗い流されて、消えてしまった堤防もありました。



エッジ先生の写真でもご覧になったかと思いますが、高潮は東の方からやって来ました。また、これが堤防の設計に用いた潮位です。これに対してカトリナの際の潮位が記されているわけですが、この潮位の方がはるかに高いことが分かります。2 m も差のある所もあったわけです。このように、高潮がほとんど全ての堤防を乗り越えて陸地に流れ込んだのです。



同じような写真を既にご覧になっていると思います。この写真は MRGO の南岸の状況です。



それから、さらにこのような状況も見られました。この部分はサンドコアです。この堤防は水締めめの堤防であったわけです。ポンプで水締めをしてもあまり締め固まっておらず、土の密度は低かったのです。

Overtopped Embankment - MRGO South Bank  
(Sand Core w/ sheetpile)



そして、このようなサンドコアの堤防も、ハリケーンカトリーナという試験に対して、それほど良い成績ではありませんでした。前にもお見せした通り、これは盛土による堤防であったわけです。

GIVWW / MRGO Levee - Compacted fill  
(overtopping damage but no failure!)



ただし、この堤防については水締めではなく、良質な砂などを用いて締め固めたものであったため、決壊しておりません。

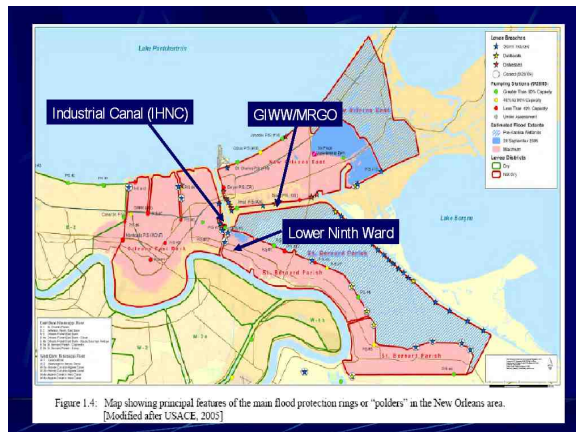
## Findings and Lessons Learned

### Levee Scour and Erosion:

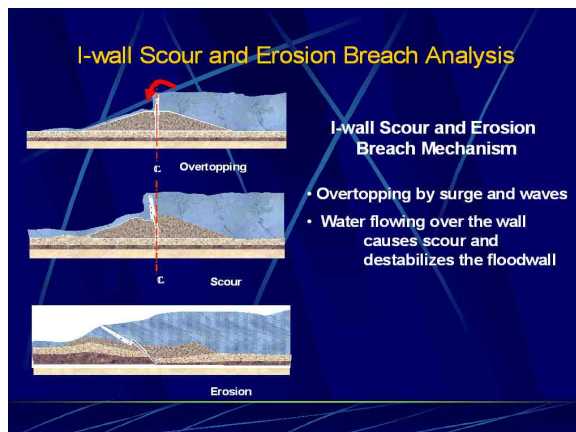
- **Failure Mechanisms:**
  - Overtopping from surge and waves
  - Hydraulically filled levees (uncompacted) performed poorly
  - Levees with high content of silts and sands performed poorly
- **Lessons Learned:**
  - Need to assess the erodibility of the emplace levee materials
  - Avoid silts and sands and hydraulic fills for levee construction
  - Increase the compaction effort for levee materials
  - Provide overtopping protection

それでは、洗掘について分析した結果をご紹介します。お伝えしたいことが二つございます。これは現場で撮ったもので、透水性の高いところから低いところを記しています。材料が砂であると透水性は高く、粘土であると透水性は低くなり、さらに締め固めがどれだけ行われているかによっても、堤防の強さは左右されます。水締めに比べて、砂や粘土を用いて締め固めをすると頑丈な堤防ができるわけであります。

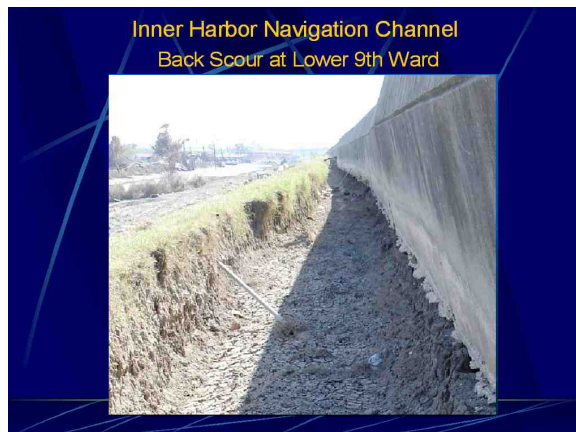
その結果として分かったことは、特に盛土の堤防に高潮や高波で越流が生じた場合に、水締めの堤防はあまりいい成績を収めていないということです。ところが、シルトや砂の堤防でも成績は悪かったわけです。カトリーナで得られた教訓は、材料によって透水性が違ふということです。なるべくシルトや砂、水締めの堤防を避け、圧密性の高い材料を用いて、ローラーなどでしっかりと締め固めることが必要なわけであります。



ここに示す範囲で浸水が起きました．水締めめの堤防でも，それ以外の堤防でも決壊したのです．色々なパターンの決壊が起きました．



この図は堤防の上にI形壁のある場合の破壊過程を示したものです．これもまた，高潮と高波によって越流が生じ，I形壁が倒れてしまったのです．I形壁の裏側は洗掘され，支持力を失って倒れました．



この写真がその証拠であります．このI型壁が傾いているのが分かります．



ここが元々の地盤の高さでした．洗掘によってこの壁を支持できなくなり，傾いたということです．



GIWW / MRGO, North Bank (New Orleans East):  
Overtopped Floodwall (Massive Backscour)



こちらも洗掘で I 型壁が傾いた現場です .

Inner Harbor Navigation Channel  
Lower 9th Ward



最後に , 最悪のケースをお見せしましょう . 堤防が完全になくなってしまっています . これは第 9 区の南の方で起きたもので , I 型壁の裏が洗掘され , 法面が削られました .

### Findings and Lessons Learned

#### I-Wall Scour and Erosion:

- **Failure Mechanisms:**
  - Overtopping from surge and waves
  - Scour/erosion of the protective side levee embankment adjacent to the wall
- **Lessons Learned:**
  - Provide an erosion-resistant surface on the levee adjacent to the wall on the protective side

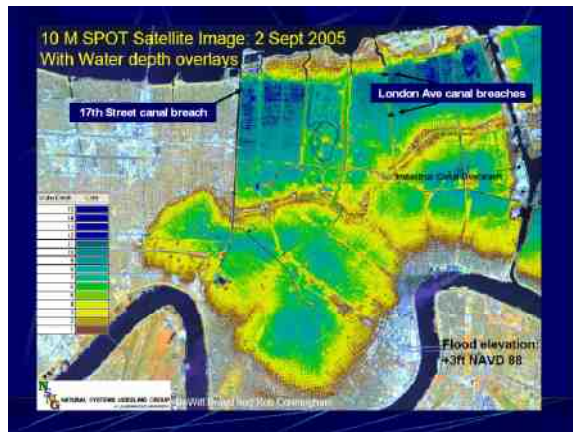
これらのことから得られた教訓は , 堤防の法面の保護が必要だということであります . 越流による洗掘に耐えられる堤防にしなければなりません .

Peak Water Level Conditions  
(Comparison: Katrina and Design Values)



この図は堤防の設計に用いた水位とカトリナが来たときの水位を比較したものです . ご覧のように , ポンチャートレン湖に面した堤防では越流はありませんでした . 実測値が全て設計値を下回っているのが分かります . 高潮は堤防を下回るレベルであったわけであります .





しかし、決壊が3カ所、17番街運河、オーリンズ通り運河、ロンドン通り運河で生じたわけであります。



17番街運河のスライドは既にご覧になっているかと思いますが、ここで決壊しております。これはハリケーンの翌日に撮影されたものですが、まだ洪水が続いております。

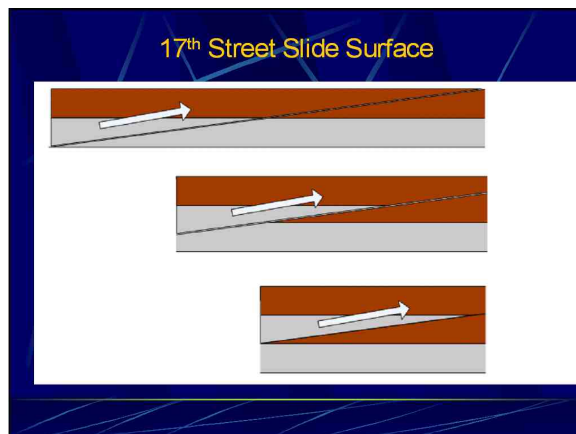
堤防の法線が直線ではなく、ずれていることが分かります。50 m 以上も横にずれています。



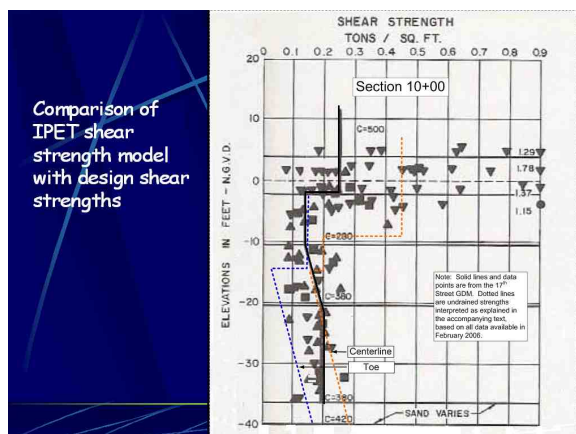
この堤防は締め固めした土で造られたものですが、PEATと呼ばれる極めて軟弱な地盤の上に乗っているために、堤防が滑ってしまったわけです。



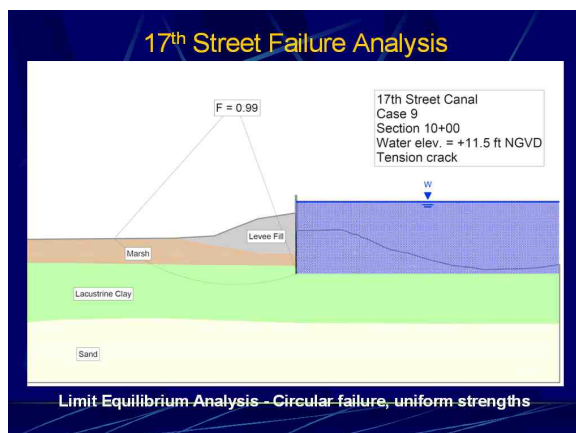
さらに、地盤の発掘調査も行って、堤防や基礎地盤がどれくらいずれたのかを調べました。真ん中にあるのが粘土の層で、その上下にPEATの層があります。



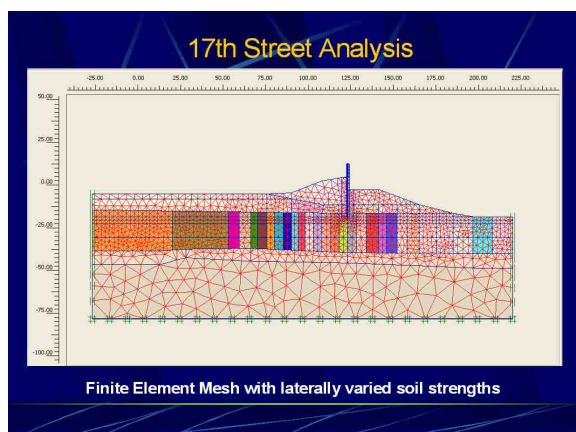
このような成層のできかたを分析した結果をこの図に示します。粘土が徐々にピートの真ん中に入り込み、一番上の層がピート、真ん中が粘土、そして、またピートという成層になったということが明らかになりました。そして、どうしてこのような地盤の破壊、あるいは堤防の決壊があったのかと言いますと、設計に問題があったからであります。



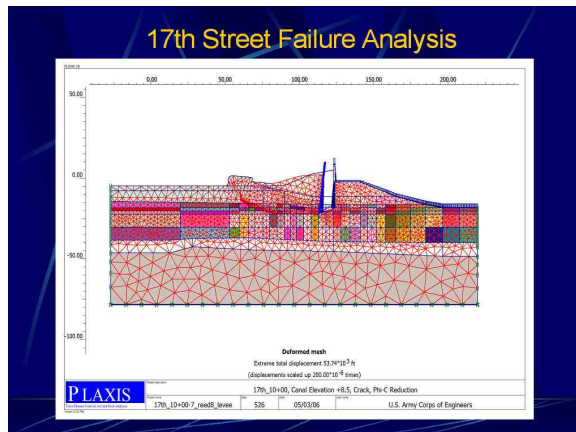
これは現地で得られた土質のデータです。黒い線は剪断応力を示しており、安定解析をする際に使われるものです。堤防の地盤の強さは一様ではなく、真ん中に比べて両端では強度が十分ではありません。これが大きな問題でした。



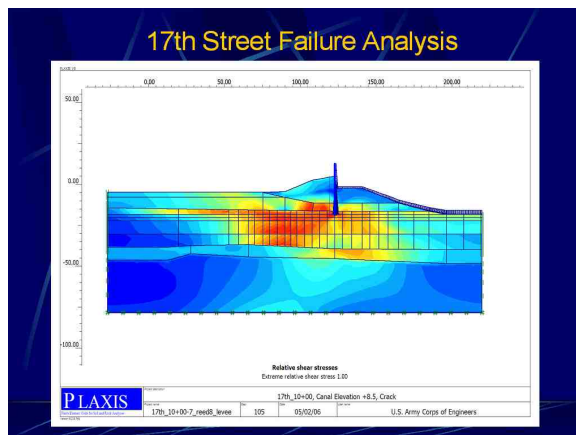
さらに、この決壊地点について地盤の安定計算をすると、このような円弧滑りが起きるという結果になりました。これが堤防の決壊の原因であります。



これを有限要素法で解析すると、真ん中から端に行くほど弱くなっていることが再現されました。そうすると、堤体のところで水位が上がり、隙間が生じ、決壊の原因になるのです。つまり、中央より端が脆弱であることが、堤防決壊の一つの原因であることが分かります。



この図も応力の状態を示しております。



運河の水位が徐々に上がっていくと、地盤にひび割れが生じますが、これは水圧によって生じたものではありません。



この図は運河の水位と安全率の関係を示したものです。堤防に割れ目があると、このように安全率が急激に低下し、8 フィート以上の水位になると安全率が1 未満になって、決壊の原因になることが分かります。



実験室で行った小縮尺の模型実験の結果は、先ほどの数値計算による結果を裏づけています。ここに隙間生じて、側面が変形するのが見られます。ですから、17 番街運河には、粘性土があって、水位が上がると水圧が堤体と盛土の間の隙間に集中し、この堤体が横にずれたということが分かります。



## Findings and Lessons Learned

### 17th Street Canal Breach

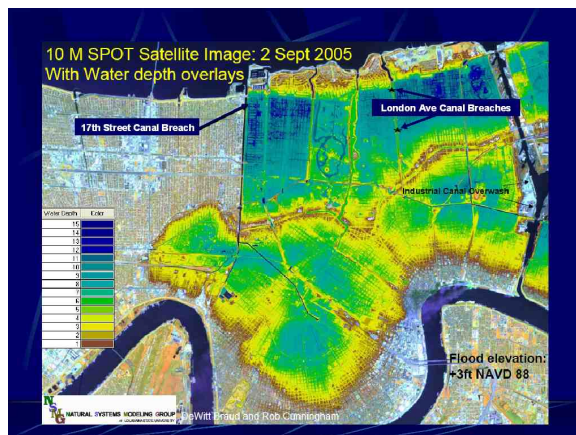
#### • Failure Mechanisms:

- Gap formation between the wall and levee soil adjacent to canal side of the wall
- Variation in shear strength from the levee crest to the toe and beyond not accounted for  
(Note: higher strengths to north & south of breach)

#### • Lessons Learned:

- Assume that a gap will occur on the canal side of wall
- Apply Su/P concept for variability in soil foundation strength
- Increase the levee toe footprint or add stability berms

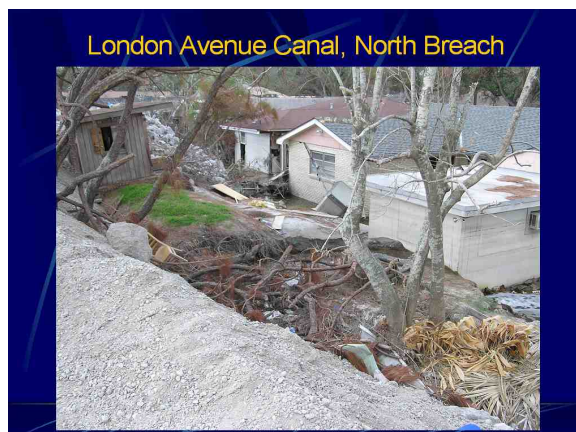
以上のことから、色々なことが分かりました。堤体と盛土の間に隙間のできることが問題なのです。それから、盛土の天端から法尻までの剪断力にばらつきがあることも問題なのです。したがって、このように隙間が生じるということを想定しておかなくてはならないということ、また、基礎地盤の強度のばらつきを是正しなくてはならないということが分かりました。



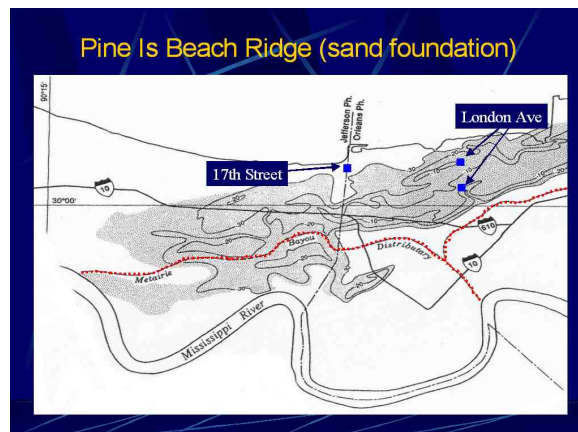
ロンドン通り運河の決壊の原因はまた違ってあります。



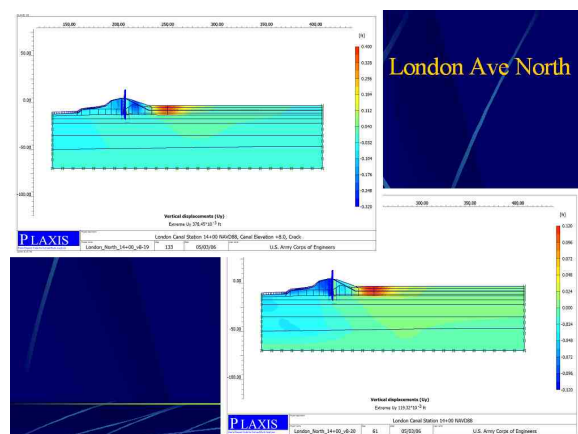
こちらをご覧ください。さきほど申し上げたクラブハウスがここにありますが、明らかに決壊しております。



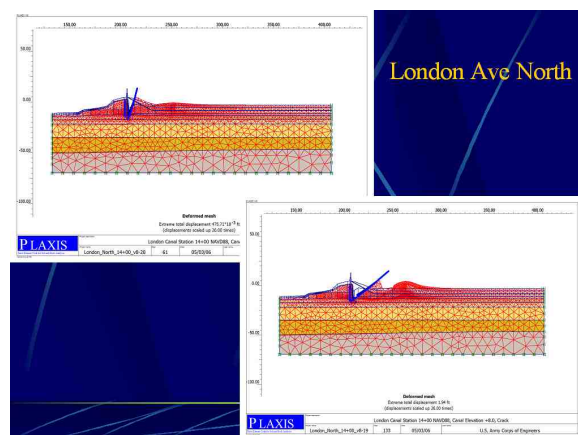
これは、被災直後の状況であります。クラブハウスは元々この家と同じ高さであったのに、このように隆起してしまっていることが分かります。そして、大量の砂があることが分かります。運河の反対に、このような砂はありません。土質的には、これが粘土で、これが弱い部分ということになるわけです。



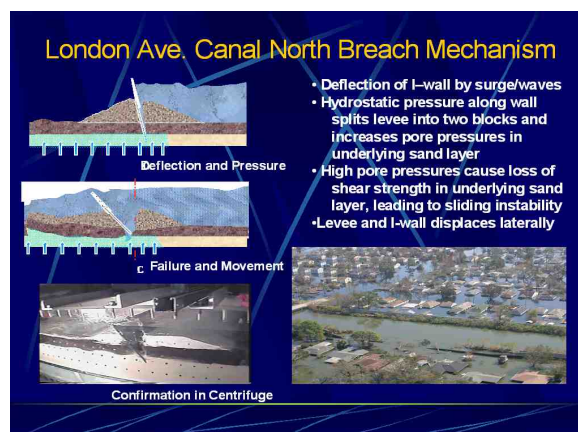
こちらはロンドンブリッジのところですが、その下には砂の基礎地盤があり、パインイズビーチリッジと呼ばれております。そもそも基礎地盤の材料が全然違ったわけです。



そこで、この断面に対して、土質分布を調べ、有限要素法による数値解析を行いました。この図のような応力分布になります。



この図は、堤体が傾き、地盤が横にずれて、堤防が決壊する過程を有限要素法の数値計算モデルで再現した結果です。ここにクラブハウスがあると考えて下さい。少し地盤が隆起しております。



そして、隙間が開いて、この壁が傾いています。ロンドン通り運河の北部にあるノースブリッジのところの決壊は、運河の水が堤防と盛土の間の隙間から砂の基礎地盤に侵入し、これが反対側の盛土を下から上に持ち上げる圧力になり、堤防の決壊に至った、という過程が模型実験によっても確認されました。

ロンドン通り運河の堤防の二つ目の決壊は、別



のメカニズムによるものです。ここでは土嚢を投入して、緊急の締め切りをしようとしたわけですが、大きな穴が開いておりました。

隣接部では、下にあった土質が吹き出したものと考えられます。この現象についてはさらに調査が必要です。これは車が吹き出した砂で埋まっている様子を示したものです。これだけの量の砂がここあるということは、この砂が堤防の決壊に何らかの関係を持っていると考えるべきでしょう。

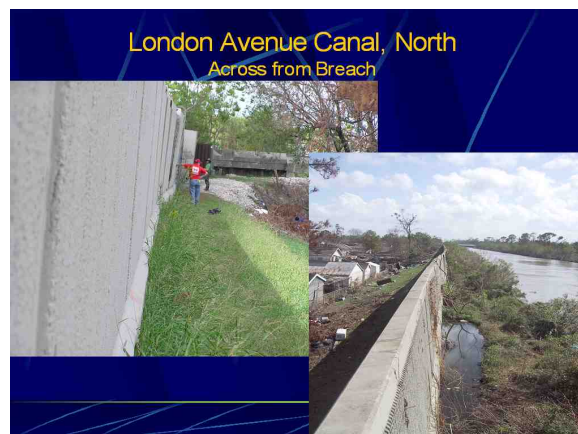
それから、シーページの解析をすると、水がこのように砂層に入り込み、その動水勾配によって急激なパイピングエロージョンが起きたと考えられます。最初のうちは小さな動水勾配だったのですが、間隙水圧が上昇し、エロージョンが起き、さらにそれが進んだ結果、堤防が決壊したのです。これがロンドン通り運河の南部における決壊の原因であります。すなわち、シーページパイピングエロージョンと安定性の低下という二段階によるものであると言えるわけです。

**Findings and Lessons Learned**

**London Avenue Canal Breaches:**

- **Failure Mechanisms:**
  - Gap formation between the wall and levee on canal side
  - Uplift pressures led to instability of the I-walls and levees
  - Severe seepage and piping allowed in sand foundation
- **Lessons Learned:**
  - Assume that the gap will occur and design the walls and levees to ensure that they are stable
  - Control the underseepage

ロンドン通り運河の堤防の決壊では、隙間ができており、圧力の変化を見ていく必要があります。砂層では非常に大きなシーページやパイピングが発生し、地盤の安定性が損なわれたということがあります。そして、大きな圧力が下から上に向かって作用し、安定性が損なわれたというメカニズムも存在しています。この隙間を防ぐように設計することが必要であります。それから、アンダーシーページを防ぐことも必要であります。

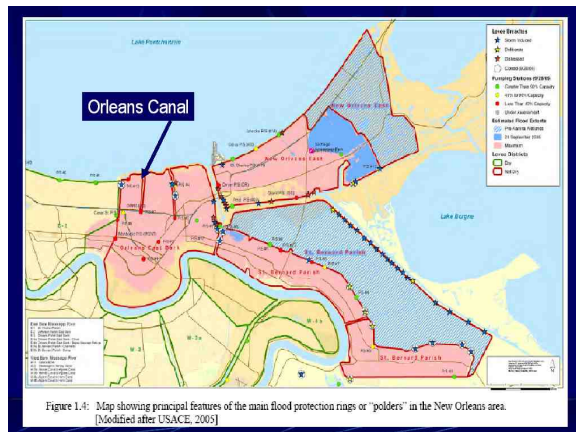


これはちょうど決壊した箇所で、先ほどもお見せしたように、法線が曲がっているのが分かります。盛土には隙間や割れ目が見られます。堤体は5度ぐらい傾いてしまっています。

ここで、何故一方の岸だけが決壊して対岸は決壊しなかったのか、について考えてみましょう。こちらでは応力が作用して既に割れ目ができる状況になっています。つまり、対岸ではすぐに決壊し得る状況になっていたわけです。地盤の安定

性に関して見ていきますと、こちらが決壊した側です。青い点線で示しているのが水位で、この水位まで上がると安定率が1を切ります。この安全率が1を切ると決壊します。一方、対岸では盛土に割れ目はあるけれど、決壊には至っておりません。こちら側が決壊を免れたのは、対岸が先に決壊したからだということが分かります。

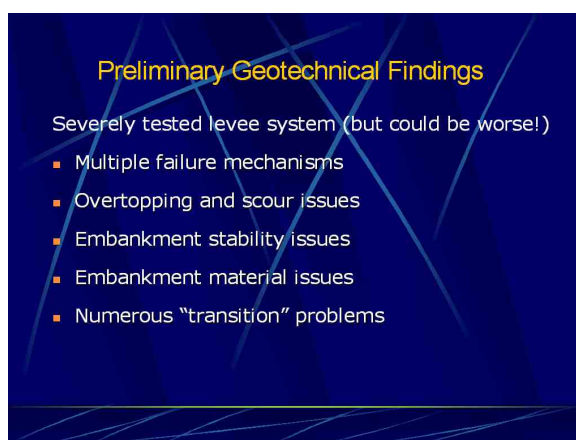




うな理由があって、この運河の堤防は生き残ったということです。

3つ目は、オーリンズ運河についてです。何故この運河は決壊した2つの運河の間に位置するにもかかわらず、大丈夫だったのでしょうか。この堤防の構造を見てみたいと思います。

実は、この運河は決壊した他の2つの運河より後に造られたものなのです。そのため、堤防の構造がしっかりしていたわけです。バームも入っているので安定性は高く、強度も強いのです。堤防の幅がこれだけ確保されているわけです。このよ



どこが決壊し、どこが決壊しなかったのか、ということは非常に良い教訓になると思います。越流がどのように起き、どのように決壊に至ったのか。このような堤防のテストをしたことによって、様々な決壊のメカニズムが絡み合ったものであり、一つの原因で起きたものではないことが分かりました。そして、越流で洗掘が起きていることは、重要な問題であると分かりました。

それだけではありません。堤防の盛土の安定性にも問題があったということです。盛土の土質材料についても、砂質で侵食されやすいものを使うと、天端が削られるという問題になり得るということです。

そしてまた、様々な材料をどの高さまで盛り上げるのかということは、地盤工学的な観点からだけでなく、建設費用も考慮して、総合的に判断していかなければいけないということです。

ご清聴ありがとうございました。

## 【質疑応答】

（質問） 杉本（新日本製鐵）と申します。ご質問させて下さい。将来の対策に関して、特にその中でも堤防の構造について、お伺いしたいと思います。この質問に対する答えの一部は、次の講演者からいただけるのかも知れませんが、どのような技術や工法を使うとこのような堤防の決壊を防ぐことができるのか、災害の対策を講じることができるのか、ということをお聞きしたいと思います。フラッドウォールに関して分かってきたことも色々あるようですが、それ以外にも何か改善点はあるのでしょうか。単に高さを高くするという以外に、構造をどうするのか、材料として何か他のものを使うのかとか、考えていらっしゃいますか。

（回答） その点について私は何もフォローしていません。工兵隊のメルビー先生からこの後に再建計画に関するお話をさせていただくことになっていますので、是非お聞き下さい。それから、この災害では、色々なことを教訓として学びました。例えば、越流をいかに防ぐか、バーミングをどうするか、それから、越流が生じたときに浸水が広がるのを防ぐのにどうしたら良いのか、ということも分かりました。アースエンバンクメントの材料が良くなかったので再考しています。もっと良い材料を使ったり、しっかり圧密したりする工法も考えられています。すなわち、堤防の材料に砂粒分の多いものを使って、大きく頑丈な堤防に改良していくことが考えられています。

（質問） 高橋（港湾空港技術研究所）と申します。私の方からは、地盤工学の技術に関してお伺いしたいと思います。現在持っている地盤工学の技術で、堤防の耐力や破壊のしかたを予測し、防災性能としての性能を評価することは可能なのでしょうか。

（回答） 現在ある技術は、このような堤防の設計がなされてから 20 年の間にかなり進歩してきたものではないかと思います。ただし、残念ながら、その技術の一部には 20 年前から変わっていないものもあります。設計に使われているものも使われていないものもあります。模型実験、数値計算、現地試験など色々な解析方法の結果を突き合わせてみると、これらの結果はかなり似ている、というのが私どもの理解です。つまり、現象の再現性はかなり高く、結果の信頼性も高いということです。ただし、何が起こるかということについて、例えば決壊に関する実際のデータが必ずしもあるわけではありません。全く決壊しなかった区間について、決壊しなかった原因を証明するデータを集めることは容易ではないのです。堤防はかなりの応力を受けましたが、耐え切って決壊に至らなかった区間もあります。このような場合に、他の区間の安定性を予測することは、なかなか困難です。しかしながら、これらの技術は今後さらに改善する余地があり、まだまだ進歩させることができると思います。