

なる部材と水面下の構成部のための特別な手順を含むようにした。

1989年10月17日、マグニチュード7.1のロムプリータ地震は、推定60億ドルの損害と43名の死者をサンフランシスコオークランド・ベイエリアにもたらした(Housner, 1990)。1990年、大統領命令12699号は、連邦政府資金によるプロジェクトに対して、耐震設計の規定を命じた。

1988年のウィリアムズバーグ橋閉鎖(本書事例3)はニューヨーク市の橋梁マネジメントの取り組みと融合した。1994年に起きたソウルの聖水大橋事故の後、韓国の橋梁検査は1996年に法律により定められた。

失敗の と その ててもいいこと

3.1節 理解と/もしくは回避

アリストテレス(1.2節)は、科学を経験により失敗を回避することと認め、アート??? 芸術???を失敗の原因を理解することと認めているように思われる。以来、このことは彼が学習一般について予言したことを一巡りしてきた—現代科学は理論的になり、アート??? 芸術???は即興的になる、ということである。にもかかわらず、アリストテレスの、経験は「…理論よりずっと成功」し得るという結論は、原因が完全には理解されていないかもしれない失敗を避けるさける鍵として依然存在する。Leonardo da Vinci レオナルド・ダ・ビンチ(1935)は彼のノートにこう書いている。「経験が悪いのではない。間違っているのは我々の解釈なのだ。」

「Falling Down Is Part of Growing Up (失敗することは成長することの一部である。)」という書名の下に、Petroski(1992年、2章)は、創造的で経験的な過程における不可避な一部分として失敗を提示している。その過程は試行錯誤により進むのである。科学研究者は存在する真実を発見するがゆえに、ニュートンがそうしたように仮説を立てることを拒否することができるが、技術者は新しいものを創造するので、それができない、と著者は論じている。Karnakis(1997)によると、失敗原因の分析は、計り知れないリスクを経験的に排除すると共に、時にはこの排除から独立して、進化してきた。

リスクに対する嫌悪は、De Finetti(1974, 3.2節)の主題である。彼の例は、主に経済から導かれているが、不確定な損失の可能性を減らすことと引き換えに、不確定な利得を限定することに、強い選好性を示している。政治の領域では、合衆国独立宣言(1776年7月4日)は以下のように述べた。「確かに分別に従えば、長く根を下ろしてきた政府を一時の原因によって軽々に変えるべきでないということになるだろう。事実、あらゆる経験の示すところによれば、人類は害悪が忍びうるものである限り、慣れ親しんだ形を廃することによって非を正そうとするよりは、堪え忍ぼうとする傾向がある。」??? 既往文献の引用友清理士 著『アメリカ独立戦争(上)』(620円;学研M文庫) 友清理士 著『アメリカ独立戦争(下)』(620円;学研M文庫) ???

「壊れていないものを修理するな」とも言い換えられるが、この原理はしばしば社会的

ロマンティック

?
Economics
↑
economy
HIL?

開発のみならず、設計やマネジメントをも導いている。その保守主義は既にある理論と受け入れられている慣行を保ち続ける。一方で、ものごとはいずれ疲弊し、その時工学は優れた代替案を準備しておくことが期待され、対してマネジメントは円滑な移行に責任をもつのである。ゆえに、変革は、全ての関連した情報に接することがなくとも、機械であれなんであれ、古い運用中の構造物から新しいものへの移行による便益を最大化するように、工学設計されマネジメントされなければならない。

Sibly and Walker (1997) と Petroski (1993) は、イングランドのディー橋 (1847)、スコットランドのテイ橋 (1879)、ケベック橋 (1907)、タコマ・ナローズ橋 (1940) の事故に周期的な傾向があることに気づいた。そうした周期は、熟慮の上に成功した (部分的には経験的な) 設計に始まり、モデルの妥当性を超えて実践を拡張しすぎることにより絶頂に達する。チェスターのディー橋の事故 (Petroski, 1994) は「成功シンドローム」の一例、本質的には自己満足の失敗、として挙げられている。この種の構造物事故は、既知の習慣的作業を妥当性の範囲を超えて適用することに起因する。

数世紀におよぶ橋の供用への、理論と経験、もしくは設計とマネジメントの相対的な貢献は定量化できるものではないし、比較もできない。にもかかわらず、建設物の事故を引き起こした理論的な見落としについて、たいてい工学がその責をとがめられる。事故の過程のマネジメントミスは、経験不足のためとされるのが常である。工学のモノとプロセスの洗練が進むことにより、理論的に厳重な検査下におかれ、実際には避けられるべき、~~nonperformance~~ 保有性能不足 ~~???~~; ~~malfun~~ 機能不全 ~~???~~; 局所的、部分的、そして破局的事故といった区別がなされるようになった。

OK

OK

3.2 節 破局的な事故

破局的な事故は、市民の注目を引き、法の制定を促し、専門家の実践を形成する。こうした事故は詳細に渡り学習され、長く続く教訓を与える。Farrar, Lieven, and Bement (Inman ら., 2005, 1 章) は、「土木工学の分野においては、連続的な劣化よりは大規模で離散的な事象によって大きく影響を受けることにより、事後調査が進む。」と述べている。

破局的な事故は、Taly (1998) や Barker and Puckett (1997) のような設計の教科書において導入の章で議論されている。Feld (1968) や Ross (1984) は施工事故について触れているが、両著者とも構造物の一生の全ての段階についても分析している。Ryall (2001, 416 頁) は、過去 30 年間の、原因と規模の点で注目すべき 22 の橋梁事故をリストアップしている。主要な原因のなかでも、設計、施工、維持管理、衝突、洗掘が挙げられる。ロンドンのミレニアム歩道橋 (図 3.1) がリストの中でも目立つ。これは損傷を受けてないにもかかわらず、閉鎖され台無しとなったからである (Dallard ら, 2001)。これは、Feld (1968, 2 頁) により定義されたように、「設計の予期との不適合」である。この場合、一般大衆のより大きな期待でさらに深刻となった。「保有性能不足 ~~???~~」は構造物の著名性によって

増幅される。パリのソルフェリーノ歩道橋（図 3.2）も同様に開通の遅れが人目を引いた。構造物の健全性ではなく、使用性のみに影響があったのだが、これらの失敗は関係した管理者には破局的なことだったかもしれない。

土木構造物における破局的な事故は型にはまるものではなく、のちに神話的な様相をもつようになる。関連する詳細は誇張されるか、装飾、さもなければ歪曲される。部分的な事故や事故寸前はいくらでもあるが、見過ごしたり誤解したりしやすい。

ふたつ

3.3 節 部分的な事故、事故寸前、過剰設計

Levy and Salvadori (1992) により潜在的に致命的であると認識される間違いは、時折「安全に」現存している構造物にはっきりと見られる。ポイント・プレザント橋の崩落の後に、ウエストバージニア州セントメアリーでオハイオ川を渡る同様の構造物が、変状もないのに即座に供用を止められた (Taly, 1998)。工学の観点からすると、その構造物は、破局的ではないものの、既に失敗していたのだ。

「過剰設計」は設計とマネジメント双方の失敗と考えられる。なぜなら、それはコスト+ぬい? 的に効率が良くない (例えば、無駄が多い) からである。しかしながら、ある基準に照らして過剰であるものは、別の基準に従うとよくあることかもしれない。5章に示されているように、余裕度、安全性、信頼性といった用語は、現実に対して異なる解析モデル、つまり、多様な目的から生じており、異なって定義されているかもしれない。過剰設計は仮想的な構造物では、排除するのに簡単な対象であるが、実際に永続する構造物のいかなる仮想的な事故をも回避するものとは認められていない。さらに、過剰設計の排除は、全くありえそうもない「過剰な維持管理」によっていつも正当化されるのである。

? 問題はないのか

can't
fiscal
for safety

構造物の余裕度の役割は、部分的もしくは局所的な事故の際に、一意的に立証される。荷重再分配のため、事故は限定的か部分的にとどまる。設計が期待していたものであれば、それらはもはや事故とはみなされなくなる。例として、鋼における塑性ヒンジの形成、コンクリートにおける延性挙動がある。構造物の使用限界は、全体的よりは部分的な事故の下で最も正確に立証される。適切に調査されたなら、部分的な事故により、全体的な崩壊や事故を防いだ構造物の長所もしくは特性を知ることが出来る。

// 安全に

図 3.3 の筋交いは 1989 年のロマプリータ地震で降伏し、図 3.4 に示されているより強い筋交いに置き換えられた。けれども、降伏した筋交いは地震の際に十分に性能を発揮したのだ。

図 3.3 筋交い、1989 年サンフランシスコでのロマプリータ地震の際の降伏。

ウィリアムズバーグ橋 (事例 3) では、腐食によりメインケーブルの推定余裕度が 4.2 倍から 3.6 倍に減っていたが、集中的な改修後でもその維持ができた。よって、19 世紀後半

理解しにくい

に典型的で 20 世紀後半には見られないケーブルの過剰設計により、橋梁管理者は供用中に維持管理を行うという選択肢が得られた。このことや他の同様な事象により、吊橋のケーブル一般についての安全性を調査するよう、NCHRP Project10-57 は促された。

1981 年のブルックリン橋のステイ破断は、歩行者 1 名の命取りとなったが、構造物全体には進展しなかった。垂直吊ケーブルと対角ステイの全体システムが腐食進行にみまわれ、事故を起こす寸前だった。しかし、吊ケーブルは多自由度の冗長性を持っていた (図 3.5)。吊ケーブルの間隔は 8ft (2.4m) であり、補剛トラスも十分あり、対角ステイも剛性を与えていた。J. Roebling (Reiner, 1977, 16 頁) は、もしこれら三つの主要システムの一つが壊れても、橋は「たわんでも崩壊はしない」と述べていた。

図 3.4 図 3.3 のものを置き換えた筋交い。

その設計理念は事故を回避するのみならず、交通供用下でのステイと吊ケーブルの全交換を可能にした。

同時期の斜張橋と吊橋の設計は、個別のステイと吊ケーブルの破断を考慮している。2004 年に第 1 ボスボラス橋で、吊ケーブルが破断したが、通行止めにはならなかった。タンカールヴィル橋では、メインケーブルのストランドが 1 本破断した後も、通行は維持された。

Roebling の設計を通して、強度余裕に注意が払われていたことは明らかである。図 3.6 はブルックリン橋アプローチ部のトラス支間を示している。構造物の年齢を考えると (1883 年開通)、荷重等級においては、使用材料が終局強度 10ksi (69MPa) の鉄であることを仮定しなければならない。この仮定だと、下弦トラスには過剰応力が発生していることになる。さらに、アイバーのピン接合部は、純せん断よりもむしろ曲げの兆候を示していた。図にあるように、トラスはアーチにより支持されなければならなかったが、交通は閉鎖されなかった。継続的なモニタリングにより、技術的な決定からプロジェクトの完了までの 3 年間の間、いかなる損傷も見出されなかった。

図 3.5 ブルックリン橋の吊ケーブルとステイのハイブリッド・システム。

図 3.6 ブルックリン橋のアプローチ部、フランクリン・スクエアのトラスとアーチ支持。

図 3.7 吊橋の補剛トラスの下弦材破壊。

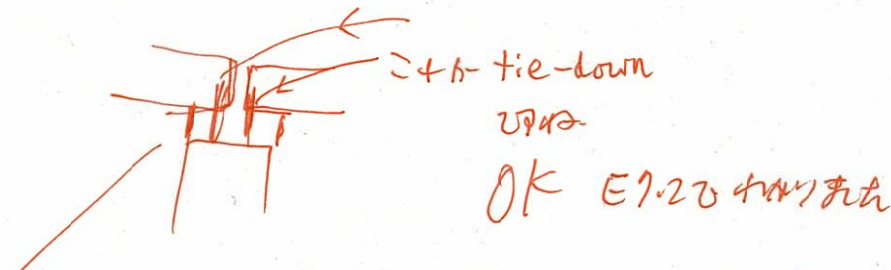
材料のサンプル試験は、規定値を大幅に上回る強度を示した。ひずみゲージによるモニタリングは、活荷重による応力が、主部材で想定されているよりもはるかに小さく生じていることを示した。

図 3.7 は、吊橋の補剛トラスの下弦材を示している。構造物には影響がなかった。

図 3.8 は、柱基部での破損を示している。冗長性がない構造物であれば、この状況の結果、崩壊し得た。

冗長性と十分な強度余裕，幾何的な許容値により，全体への影響はないものの，事例 7 にあるように，支承や他の荷重伝達・解放装置は，しばしば破損するか，期待に満たない性能を示すことがある。

図 3.8 腐食による柱基部断絶。



事例 7 結合部の機能不全

A. タイ・ダウン

図 E7.1 に示されているタイ・ダウンは，一見，ピン・ハンガー組立部（14 章）やせん断解放の結合部???（下の B 節）を連想させる。しかし，それに想定された機能は全く異なる。

ちよっとわかりませんが，Yaneu の書きかたか？

図 E7.1 に示された橋桁は，桁端部のタイ・ダウンにおいて最低 50kips (22.5tons) の引張に対して設計された。この力は活荷重に抵抗して働き，中央支間の曲げモーメントを減らし，図に見られるとおりの桁高を減らすことを可能にしている。発生モーメント図を図 E7.2a に示す。

?

このケースにおいて脆弱な点は，比較的大雑把な詳細のピン結合の剛なタイ・ダウンと伸縮継手下部に位置するロッカー支承???が供用条件下で必要な引張を支えられる，との仮定にあった。このことが非現実的であったことは，下記のように規定荷重の 50kips (22.5tons) の下でタイ・ダウンの弾性伸びを計算することで証明できる。

式

もしくは 式

引張力が低下したと
作用の引張力が低下
tie-down の capacity が低い
と 55? 桁高の低下

図 E7.1 タイ・ダウンと桁。

ここで， $E =$

$A =$: 断面積

$L =$: 長さ

目視検査（図 E7.3）では，タイ・ダウンの引張の低下を検知することは出来なかっただろう。

50 年にわたる破片の蓄積，腐食，熱の影響は，計算で得られた Δe_l を減少させるのみならず，逆向きにしてしまった。幾つかのタイ・ダウンには緩みが生じ，他のものには圧縮により座屈が生じた。よって，図 E7.2a に示されるように，中央支間の正曲げモーメントが増大した。タイ・ダウン（図 E7.1）を切断し再溶接することにより引張に戻そうとする試みは効果がなかった。

図 E7.2 タイ・ダウンの考えられる影響。

図 E7.3 タイ・ダウンの現地検査. S. Teaw 撮影.

タイ・ダウンの完全破壊は、桁の強度余裕により埋め合わされた。この橋は、最初に変状が観察されてからも、10年以上供用された。最終的な改修では、もともとの桁を残し、最大支間に新たな桁を増設した。タイ・ダウンは図 E7.4 に示されているように、引張調整が可能なように、補強された。Rocker bearing ロッカー支承 ~~???~~ は Pot bearing ポット支承 ~~???~~ に交換された。

)
ポットに
まく。

図 E7.4 補強されたタイ・ダウン。

B. 横荷重解放のための結合部

図 E7.5 の 11ft (3.35m) の結合部は、90ft (27m) の橋脚の上端で、橋梁上部工との間の横方向変位を許容するようにされていた。70年の期間を経て、結合部は「固まってしまった。」周辺気温の季節変動と日変動により、橋脚(図 E7.6) が横方向に動いたため、上部工の荷重は橋脚4本のうち、2本のみで支持されていた。心配の種は、橋脚を支える石積み(図 E7.7)の健全性であった。改修の間の偏心荷重に対しては十分であることが分かった。2本の橋脚は、固まった結合部が別の構造詳細に変更されるまで、安全に全荷重を支えることができた(図 E7.8)。

図 E7.7 図 E7.6 の橋脚基部における浮き上がり。

改善か?? 24か所ここか
99い

図 E7.8 図 E7.5 の結合部を置き換えたローラー支承

生いと
か
直りは? ?

部分的な事故は、二つの反対の種類の開発を促す。ひとつは、性能を発揮していない構造詳細を排除することであり、もうひとつは構造信頼性、例えば冗長性、を向上することである。多くの場合、両方の選択肢が同時に実行される。事例 7A に示したタイ・ダウンと支承は交換されたが、新しい桁も上部工に増設された。事例 7B の橋脚は、橋が既に10年以上も供用された後に、増設されていた。機能不全になった結合部は結局、現代的なニッケル合金製ローラーに交換され、橋脚は補強された。

部分的な事故は専門家と大衆の注意を十分に引くものの、事故寸前だったものは、事故が起きるまで、容易に見過ごされる。実際に行われていることの多くが、潜在的に危険であり、事故が起こるまでは一般的とされることの例となっている。よって、「危機一髪」や「ニアミス」を詳しく監視することが必要不可欠である。

の何が?

発見?

4.2.3 節で議論された Overextended Sliding 支承 ~~???~~ は時機よく適切な検査により観察された。事故は起こらなかったものの、変状の後、緊急修理と調査、主要な改修が行われた。約10年を経て、建て直された構造物は列車交通に再度供用された。

誤?

建設安全手順では、危機一髪を失敗として考え、調査と適切な措置を必要なものとする。同様の考え方は、解析、設計、施工、維持管理、検査、運用（4.1.3 節）を含む、全ての橋梁マネジメントのプロセスに役立つだろう。

マーフィーの法則（楽観的バージョン）として知られる「失敗の可能性のあるものは失敗する」というよく知られている仮定は、検査に対する注意喚起（第 2 次世界大戦の飛行機検査員をゆえんとする）としての役目を果たすが、結局「傍観的な」予測になってしまふ。Petroski (1992, 28 頁) は、法則を「冗談」として評価した。法則は、法則自身もきっかけがあれば間違い、実際間違えていることを認めることにより、批判を逃れている。論理的に見て、平穩無事に性能を発揮しているということは、なにも悪いことは起こっていないことを証明している。しかし、この結論は間違いだ。1986 年のスペースシャトル・チャレンジャーの審問での反対意見書において、Feynman (1999) はそのような省略されすぎた推論が誤りであることを以下のように証明している (155 頁)。「この危険性がこれまで破局をもたらさなかったという事実は、それが完全に理解されている場合を除いて、次回もならないとの保証には全くならない。ロシアン・ルーレットをしている時に、一発目がはずれであったという事実は、次にとってほとんど安心できることではない。

何となく?

全

全

1994 年のノースリッジ地震の際、以前に起こった地震を生き延びてきた構造物が顕著な損傷を被った。1989 年のロマプリータ地震の際には、サンフランシスコのダウンタウンにあるエンバカデロ高架高速道路が壊れたが、壊滅的ではなかった。この挙動により、同じ地震におけるオークランドのサイプレス・アベニュー高架橋 (図 3.10) の崩壊には、複数の原因の限界的蓄積があることが証明された (Nims ら, 1989 Housner ら, 1990)。州間高速道路 880 号線のこの高架橋は、上層と下層のフレーム間の不連続性と柱の帯鉄筋量の不足、そして地下にある「Bay mud 湾泥??」の深い層のために壊れたのである。

疑問

事故寸前と過剰設計は工学的な矛盾を明らかにする。設計された構造物から失敗の原因を理解し排除しようと努めるのが解析であるのに対して、知識は不完全であり、不完全な過程の全ての段階に伴う無知のレベルにもかかわらず、構造物は生き残らなければならない、とマネジメントは賢明にも仮定する。

Bay mud とよばれ
疑問

振再考

図 3.9 エンバカデロ高架高速道路，サンフランシスコ，1989 年 10 月 29 日。

モラルハザード

3.4 節 原因

Levy and Salvadori (1992) は、間違いのために「構造物は崩落する」と結論付けた。そうした立場は、「全ての間違いは過失である」(toute erreur est une faute) というデカルト派の判断を反映している。

? 日本は?

レオナルド・ダ・ビンチ (3.1 節) と一貫して共に、Schopenhauer (1942, II-105 頁) は、間違いを「誤った推論をすること、つまり、与えられた影響に対して、それを引き起

はすこしともよいか

こしていないことに帰すること」と定義した。経験という主題に関して、彼は次のように指摘している (II-104 頁)。「おそらく個人的な経験というものは、知識の形をもたずとも、この世界では全てのことが不安定で移ろい易いということを学ぶのと同様に、欠くことのできないものである。」

図 3.10 サイプレス・アベニュー高架橋 (州間高速道路 880 号線), オークランド, 1989 年 10 月 29 日。

事故原因の検視的調査は、プロセスにおける間違いとモノにおける欠陥を再構築し、専門的な経験を広げる。

Thoft-Christensen and Baker (1982, 241 頁) は、構造物事故を、建設プロセスの全ての段階で見られるかもしれない全体の間違いに、関連付けた。建設プロセスとは、構造物ライフサイクルを形成する設計、解析、施工、検査、使用を含む。次の主要な欠陥が特定された。

- ・公的な資格
- ・教育
- ・経験 (もつとも頻繁に)
- ・意思疎通
- ・権限
- ・力量
- ・怠慢と「抜け目のない狡猾な???Sharp」手口段

同じ欠陥が、幾つかの異なる可能な規準に従い、整理されている (242 頁)。

- 間違いの性質 (もしくは発生源)。例えば、設計、解析、施工、検査、使用。
- 失敗の種類：(A) 設計された通りの形態と (B) 設計された通りではない形態。
- 結果
- 責任 (原責任と監督責任)

サブグループ (b) の区別は、三つの主要な不確定性の種類 (付録 5) のうちの二つである、Vagueness あいまいさ???と無知との違いと比較できる。そして、著者らは三番目 (例えば、ランダム性) に焦点を置いている。

Thoft and Baker (1982), Melchers (1987), Schneider (1997) は、解析的な欠陥を求め、一方で Brown (1995), Ratay (2000), Neale (2001) は、検視的分析により、設計、製作、施工、マネジメントに、欠陥を見出している。Neale (2001, 83 頁) は以下の運営上の原因をリストアップしている。

- ・建設の品質の低さ。設計、材料、workmanship 施工技量???への指摘。
- ・不適切な建設の方法。プロセスの途中で加えられた荷重も含む。
- ・競争的環境におけるより効率的な構造物の納品と、おそらく革新的な特徴 (何らかの