

表-1 セメントコンクリートの発達年表

セメント	コンクリート	鉄筋コンクリート	プレストレストコンクリート
<p>B. C. 3600 エジプト ピラミッドに石灰と石膏によるモルタルが用いられた。</p> <p>B. C. 700 ギリシャ ギリシャのテラ島で発掘された鉢は石灰・海砂・火山灰の調合モルタル製品である。</p> <p>B. C. 150 Marcus Porcius Cato 著書“De rerustica”の中でモルタル調合は生石灰：砂=1：2 が最良としている。</p> <p>A. D. 10 Marcus Vitruvius Pollio 著書“De Architectura”の中で壁体用モルタルの調合、プツオラナ（活性ケイ酸質混和材）について述べている。</p>			
<p>1737 Bernard de Belidor 著書“Architecture hydrauliques”で碎石・砂利を用いるコンクリートを示し、ローロン港に用いた。</p> <p>1756 John Smeaton 粘土質石灰石を焼いて水硬性石灰を作り、Eddystone 灯台に用いた。</p> <p>1796 James Parker 石灰質粘土を強焼・粉碎した Roman cement を発明。</p>			
<p>1824 Joseph Aspdin 石灰石と粘土を混合して焼成し、Portland cement と名付けて特許をえた。</p> <p>1844 L. C. Johnson J. Aspdin の方法を改良し、石灰石と粘土の混合物をガラス化が起こる温度まで加熱して焼成し、良質の水硬性セメントを作った。</p>		<p>1816 フランスにて Roman cement を用いたコンクリート橋が作られた。この頃よりコンクリート構造物が作られるようになった。</p> <p>1850 J. L. Lambot コンクリートに鉄網を入れた厚さ 3.6 cm の側壁をもつ小船を作り、1855年のパリ博覧会に出品した。</p> <p>1854 Wilkinson 平鉄でコンクリート床の下縁を補強した。</p> <p>1855 Thaddeus Hyatt 鉄筋コンクリートの曲げ材、耐火性に関する研究をした。</p>	

セメント	コンクリート	鉄筋コンクリート	プレストレストコンクリート
<p>1862 E. Langen スラグの潜在性の水硬性を発見し、鉄ポルトランドセメントひいては高炉セメントのもとを作った。</p>		<p>1861 Francois Coignet 鉄棒を十文字に用いた導水路、はり、アーチなどを作った。</p> <p>1861 Joseph Monier バリの植木師であるが、セメントモルタルの植木鉢を鉄網で補強することを発明し、この工法を水槽に応用することに成功した。後、改良を加え、格子形に鉄筋を配置する Monier 式を考案、1867年に特許をえた（この Monier 式で床版を作った）。</p> <p>1868 G. A. Wayess Monier 式を使って実物実験を実施した。また鉄筋とコンクリートとの間の付着についても実験した。</p> <p>1875 W. E. Ward ポートチェスターにアメリカ最初の鉄筋コンクリートの建物を作った。</p> <p>1877 Hyatt, Kirkaldy 鉄筋コンクリートばりの実験研究の結果を発表。</p> <p>1878 Hyatt 異形鉄筋の特許を取れる。</p>	
<p>1872 (明治5) 東京深川でポルトランドセメント製造開始。</p>		<p>1887 M. Könen 圧縮力をコンクリートで、引張力を鉄筋に負担させる設計方法を発表した。</p> <p>1887 J. Baushinger Monier 式の版を1887年10月に作り1892年に調査し、鉄筋がさびないことを確認した。</p>	<p>1886 P. H. Jackson 床版として用いるため、石材とコンクリートアーチとの間に配置した鋼材を緊張する方法によって特許をえた。</p> <p>1888 C. E. W. Doehring スラブに荷重を加える前に、引張応力度をあたえた金属材料によって補強されたコンクリート部材に関する特許をえた。</p>
<p>1886 J. F. de Navarro セメントの焼成のために回転窯を使用し始めた。</p>	<p>1880 Dr. W. Michaelis 圧力容器を利用する lime-sand brick の製法特許をえた（高圧蒸気養生の始まり）。</p> <p>1885 Tietjens 割目にセメントペースト圧入する工法すなわち注入工法で特許をえた。</p> <p>1889 E. Hofmann 気泡コンクリートの特許をえた。</p> <p>1890 Rene Ferêt コンクリート配合法を理論的に提唱した。すなわちモルタル強度はモルタル中のセメント・水・空気の絶対容積によって表わされるとした。</p> <p>1900頃 Melan Newmann コンクリートの材料学的研究が始められた。</p>	<p>1890 Francois Hennebique せん断力に対する補強を研究し、折り曲げ鉄筋・スターラップを提唱。</p> <p>1890 横浜港岸壁のケーソン</p> <p>1892 Melan Melan 式の特許をえて、アーチに用いた。</p>	
<p>1908 J. Bied アルミナセメントを発明した。</p>	<p>1907 Fuller, Thompson 最適粒度の骨材を用いたとき高強度のコンクリートがえられると主張した。</p>	<p>1903 日本最初のコンクリート橋（神戸）3.65 m</p> <p>1903 広井勇が「鉄筋コンクリート」の訳名を紹介</p> <p>1905 National Fire Protection Association (アメリカ) 鉄筋コンクリートはりの耐火試験を実施した。</p>	<p>1907 M. Koenen, J. G. F. Lundt プレストレストコンクリートはりの試験で普通の軟鋼ボールドでプレストレスを与えた。</p> <p>1908 C. R. Steiner コンクリートの乾燥収縮、ク</p>

セメント	コンクリート	鉄筋コンクリート	プレストレストコンクリート
1912~1913 オーストリア 早強ポルトランドセメントが 開発された。 1914~1919 (第一次世界大戦)	1913 アメリカのバルチモアで 中央混合所でコンクリートをつくり ダンプトラックで運搬する方法が開発 された (レデミクストコンクリートの始 まり)。 1917 Taylor, Thomson 「コンクリートの強度はその密度の関 数である」という最大密度説を提唱。 1918 S. J. Hayde 人工軽量骨材 (膨張けつ岩) を初めて 用いた。 1918 L. N. Edwards 骨材表面積にもとづく配給法を示した。 1919 Duff A. Abrams 論文 "Design of Concrete Mixtuve" を 発表し、ホセメント比説を提唱した。ま た、粗粒率を定義し、配合設計に導入 した。	1909 大河戸宗治が外国の示方書 を範として鉄筋コンクリート設計 施工示方書案をつかった。 1914 鉄道院で「鉄筋コンクリ ート橋梁設計心得」定める。	リープなどが進行した後、ふたたび ストレスを導入することを提唱した。
1923 (関東大震災)	1921 A. N. Talbot コンクリート強度はコンクリート 中の空隙によって支配されるとし、 セメント空隙比説を提唱した。 1926 頃アメリカ トラックミキサが考案された。 1929 スウェーデン オートクレーブ養生で気泡コン クリートが作られた。	1920 W. H. Hume コンクリートを遠心力で締め固 める方法を考察し、鉄筋コン クリート管を作った。 1928 土木学会コンクリート調査会 大河戸宗治委員長	1923 F. V. Emperger 高強度鋼を用いてプレストレス を与えたが実用にはいたら なかった。 1925 R. H. Dill 高張力棒鋼を用い、ナットで 定着する方法を考案した。 1928 E. Freyssinet 高張力鋼と高圧縮強度コン クリートを用いて成功した。こ れによってプレストレストコ ンクリートは実用化されるよ うになった。 1928 E. Hoyer Freyssinet が PC 鋼線とコ ンクリートの付着によって プレストレスを与えるプレ テンションングの方法につ いて発表しているが、これを 最初に应用したのが E. Hoyer である。 1928 Dishinger PC 鋼線とコンクリートの付 着のない方式で実用化に成 功した。 1934 Schorer ストラットと特殊なプレ テンションング法を開発 した。 1939 E. Freyssinet 定着用コーンと PC 鋼線を緊
	1930 スウェーデン、ドイツ アルミニウムを用いて発泡 コンクリートが作られ、 Autocraved Light Weight Conerete が発明された。ま た、気泡コンクリートについ	1931 土木学会鉄筋コンクリート標 準示方書制定	

セメント	コンクリート	鉄筋コンクリート	プレストレストコンクリート
1941~1945 (第二次世界大戦)	<p>ての研究が始まった。</p> <p>1932 I. Lyse セメント水比説を提唱した。Abrams の水セメント比説では指数関数となるが、セメント水比説では強度との関係が一次式で示される。</p> <p>1935 アメリカポルトランドセメント協会 コンクリート中に相当量の空気泡を含む場合には凍結融解作用に対して高抵抗性を示すことを知り、空気連行ポルトランドセメント (air-entraining Portland cement) が製造されるにいたった。</p> <p>1943 赤松常雄 引張強度試験として圧裂強度試験を提唱し、その考え方は世界中で採用されるようになった。</p>		<p>張するための特殊ジャッキを考案した。これによって経済的プレストレスが可能になり、プレストレストコンクリートが広範囲に用いられるようになった。</p>
	<p>1954 A. C. I. Abrams の水セメント比説を基本とし、経験的要素を盛り込んだ配合法を提案し、これに Talbot, Richart の研究成果をとり入れ、粗骨材量を配合の基本とする配合選定法を規定した。</p> <p>1960 ポリマーを結合材とするプラスチックコンクリートが開発された。</p>	<p>1950 異形鉄筋の再開発</p>	<p>1940 G. Magnel 鋼製のくさびで定着する Magnel 方式を考案した。</p> <p>1945 M. Birtenmair, A. Brandestini, M. R. Ros, R. Vogt PC 鋼線の先端に直径の 1.5 ~ 1.8 倍の頭付けをしたものを用いてプレストレスングする工法 (B. B. R. V. 工法) を開発した。</p> <p>1948 F. Leonhardt アンカーブロックの外周を回って PC 鋼材を配置し、大形ジャッキでプレストレスを与える工法。Baun Leonhardt 工法を開発した。</p> <p>1949 Raymend Pile Co. ポストテンションの PC ぐい、Cylinder Pile を開発した。</p> <p>1955 土木学会プレストレストコンクリート設計施工指針</p>
		<p>1960 高張力異形鉄筋開発</p>	

スパン中央付近に縦方向のひびわれを生じた。ただちに緊張を解放して調べたところ、スパン中央下部に大きい空洞が発見された。

② カルフォルニア州オークランドで、プレキャストコンクリート版を継手金具の溶接により組み立てて作った高さ 10m、直径 16m の水槽に水を入れたところ、約 85% まで入れたとき突然崩壊し、1500 m³ の水が住宅街を流下。

③ カイロで、2階建てであった鉄筋コンクリートの建

物を1階ずつ継ぎたしていき、5階建てとしたところ突然崩壊、31人死亡。

④ アメリカオレゴン州で、鉄道操車場の高さ 18m におよぶ大きな鉄筋コンクリート擁壁が、長さ 90m にわたって崩壊。

⑤ イギリスで、高さ 112m の薄いコンクリートシェル製クーリングタワーが 33.5 m/sec の強風で3基が倒壊し、3基にひびわれがはいる。2基は無事。

⑥ 33m のつり径間を有するポストテンション方式ゲ

ルバーゲたの張り出し部で、床版中に配置された曲下げPCケーブル緊張時の鉛直方向分力によって下面に割裂事故を起こした。

- ⑦ フラットスラブの柱の周囲で鉄筋を不連続としたため、押抜きせん断で床が破壊した。
- ⑧ I形のポストテンション多主げた形式の橋りょうで、各主げた間のスラブ場所打ちコンクリート幅が普通より広がったので、PC鋼線による横締めと挿筋を行なった。このためメタルフォームの上突縁のみを平角材を3段に重ね、これをメタルフォームのスチフナーおよび上側のアングルとボルトで連結したが、コンクリート打設時に生じる側圧によって平角材に回転変形を生じ腹部上部が広がり、横締め用定着コーンが一部破壊した。
- ⑨ 5径間連続鉄筋コンクリート穴あき床版橋(各スパン14.4~17.5m)の中央径間中央部から両側に向かってコンクリート打設を開始し、約4時間後第2、第4径間の中央あたりまで達したとき、第4径間の支保工が破壊し、床版コンクリートが崩落。
- ⑩ PCけたにおいて仮設中の支点が設計支点よりもいちじるしく内側にはいったため、けた上部に曲げひびわれ、けた端部にケーブルに沿ったひびわれを生じた。
- ⑪ アメリカで直径30m、深さ75mのロケットテストセルの屋根コンクリート打設のため、6つの三角トラス状支保工を用いたが、コンクリート打設中崩落し90tのコンクリートが落下。
- ⑫ 底部幅50cmの部材に28mm鉄筋7本および6本を2段に配置し、しかも2段目の2本がずれたためコンクリートが全然回らない部分を生じた。
- ⑬ カナダ地下鉄のマツシブな屋根版をつくる工事で、支保工の斜材を欠いたためコンクリート打設中崩落。
- ⑭ 橋座において、支持部から縁部までの距離不足、補強不足、地震時その他の水平力に対するせん断抵抗不足などが原因となって、変状破壊を生じた例は多い。
- ⑮ ニューヨーク市リンカーンセンターの音楽学校で、床コンクリートを打ち込み中0.5m³積運搬車が床の上を進んでいたとき、約180m²の型わくが鉄筋材木とともに崩壊、7人負傷。
- ⑯ 2径間連続のRCラーメンカルバートで、設計土かぶり以下の土を盛って仮使用していたところ、真中の柱部分が突然折損し、続いて頂版も落下破壊を起こし、下を通行中のミキサカーの後部車体をつぶした。
- ⑰ アメリカのデラウェア河で吊橋部分架設中、片側定

着部分のコンクリート型わくが崩壊し打ち込み直後の約230m³のコンクリートが落下し2名死亡、数名負傷。

- ⑱ カナダのオタワ市北部で、ポストテンション方式の箱形断面げたからなるヘロン道路橋を場所打ちコンクリートで施工中、10mスパンの片持ばり部分を端部から3mのところまで打ち込んだとき型わくごと崩壊、8名死亡、57名負傷。
- ⑲ I形のポストテンションげたで、けた架設を完了し、横げたのコンクリート打設にかかる直前、フランジの片側に多くのひびわれを発見した。
- ⑳ カナダのオタワ市で、12階の建物の4階の床コンクリートを打設した次の日に崩壊、1名死亡、5名負傷。
- ㉑ 3径間連続PC箱げた橋(各スパン33m)の底版および腹版のコンクリートを30日以上前に打ち込んだ後、側径間の床版コンクリートをその径間の中央部から始めて約60t打ち込んだとき、支保工が破壊し、コンクリートげたが崩落。
- ㉒ バリの近くで、長さ63mの水路用PCけたのケーブル14本中13本目を緊張中、けた崩壊落下、4名負傷。
- ㉓ アメリカでアーチコンクリート橋のコンクリートを打設中、支保工下部のくいが不安定であったため崩落。
- ㉔ 型わくの施工が不良であったため、支承部にコンクリート中のモルタルがもれて可動支承の作用がなくなり、橋脚頂部にひびわれがはいった。
- ㉕ ポストテンション方式のPC橋で、PCグラウトの施工を忘失したり施工不良であったため、けた下縁や腹部に水がにじみ出たり、つららを生じたり、ひびわれを生じた例が見受けられる。
- ㉖ アメリカで直径30mあまりのスラッジ消化用PCタンクが、PC鋼線のさびのため崩壊。
- ㉗ ラーメン隅角部で鉄筋を継ぎ、かつ薄い無筋部分を残していたため高さ約5.4m、スパン約20mのラーメンが崩壊。
- ㉘ スパン30mのI形断面を有するPCけたを、換込み式エクステンションガーダによってけたを架設位置真上まで引き出し、降下作業を行なうためワイヤでつり換え作業を実施中左右のバランスが崩れ、主げたに傾きを生じたので傾斜を修正しようとしたが、傾斜は急激に進行し、スパン中央の上突縁から腹部にかけて大きいひびわれを生じた。
- ㉙ RCくいの打ち込み中に生ずるひびわれ、継手部の施工不良についての報告例は多い。

コンクリート構造物の破壊（2）

（2）コンクリート示方書の意義

コンクリートの構造物は、設計が適切で、よく管理された施工によって完成される限り、耐久性があり、十分長年月の使用に耐えることは経験的に知られている。筆者は、たまたま機会があって、大正3～5年(1914～16)に相ついで建設された日本鉱業株式会社の鉄筋コンクリート製の大煙突を調査したが、60年の風雪に耐えて、主要な部分のコンクリートはいまなお健全であることがわかっている。もっとも同所の佐賀関大煙突は1968年の宇和島沖地震で頂部が10mほど切損した。

さて、初めに述べたように、よく管理された施工によるならば、とただし書きをつけたのは理由がある。というのも、コンクリート構造物の事故において最も多いのは、たいていの場合、建設の途中か、完成直後に起こっているのだから、事故の原因を比較的是っきりと指摘できることが多い。たとえば、厳寒時にコンクリートの打ち込みを行なったコンクリートが、強度の伸びが悪く、型わくを撤去して荷重を加えた時期に崩壊した事例などは、寒中コンクリートの施工における無知によるものである。そして、このような失敗の経験を積み重ねたものがコンクリート示方書に集約されている。したがって、コンクリート示方書の個々の内容には、そのよってきた根拠があって、多くの失敗の経験の積み重ね、莫大な実験による知識が隠されている。

コンクリートの性質を左右する要因にはいくつかある。強度を考えてみても、材料の組み合わせ次第で性質が変わる。コンクリートの基本的な性質と、材料の選び方を定性的に分類すると、表-2のように、ざっと110

* 名古屋大学工学部助教授

とおりの組み合わせができる。この表をどう見るかという点、たとえば、コンクリートの強さは表を横に見て、セメント、粗骨材を増やすことが強度を増す(+)が、水量、細骨材は少なく使用するのがよい(-)というように見る。細骨材の使用を増すとどう性質が変わるか表を縦に見る。ワーカビリティはよくなるが、硬化したコンクリートの性質には好ましくない性質が並ぶ。

この表の個々の内容には、それぞれ定量的な実験の裏づけがある。それがいかに莫大な量に達するかは想像していただく。そこで、コンクリートの扱いをできるだけ標準化し、不必要に神経質な注意をはらわなくてもよいようにコントロールする。これが示様とか標準を必要とする背景になっている。

コンクリート工学は、およそ土木工学の中でも、最も実践的な技術を巧みに集積したものだといえるし、その評価はほとんど吉田徳次郎の功績に負うといえてよい。というのは、コンクリートは材料の選択から始まって配合、練り混ぜ、打ち込み、養生および設計・管理一切にバランスの取れた判断を必要とするから、順を追っていねいに解説を加えた指導書が必要になる。これに関して、吉田徳次郎の著書は、コンクリートの数ある書物の中でもバイブルに相当する。この評価は、大学人よりもむしろ幅広い現場の技術者によって支持されていることに特徴がある。

その著書は非常にいねいで、説明が行き届いている。用語も平易で、ハイカラぶった表現をさけているが、しっかりとした原則を貫いている。例をあげると、「まだ固まらないコンクリート」とか、「帯(おび)鉄筋」という言葉の使い方は、くどいように見えるが、現場の技術者に説明を必要としない。ちなみに、建築のほうでは同じ用語を、「フレッシュコンクリート」「タイ」とハイカラに名づけている。また、アメリカに学んだにもかかわらず、これをまったく日本流に消化してしまっ

表-2 各素材の混入量の増加によって生ずるコンクリートの性質

		セメント Cement	細骨材 Fine Aggrg	粗骨材 Coarse Aggrg	水 Water	空気量 Air	練り混ぜ Mixing	材令 Age	試法 Testing Methods
まだ固くならないコンクリート Fresh Concrete	コンシステンシー Consistency	-	-	+	+	+	+		スランブ試験 Slump スランブ試験をはじめ レモルジング、貫入試験その他 振動試験、落下試験 締め固め係数試験 表面水量測定 空気量試験 目視判断
	プラスティシティー Plasticity	+	+	-	-	+	+		
	ワーカビリティ Workability	+	+	-	+	+	+		
	材料の分離 Segregation	-	-	+	+	-	-		
	コンクリート塊の締まり具合 Wet Consolidation	-	+	-	+	-	-		
	ブリーディング Bleeding	-	-	+	+	-	-		
	空気量の混入量 Entrained Air	-	+	-	+	/	+		
	フィニッシュャビリティ Finishability	+	+	-	+-	+	+		
硬化したコンクリート Hardened Concrete	耐久性 Durability	+	-	+	-	+	+	-	圧縮試験 圧縮試験 凍結融解試験
	強さ Strength	+	-	+	-	-	+	+	
	弾性常数 Elastic Modulus	+	-	+	-	-	+	+	
	凍結融解 Freeze Resistance	+	-	+	-	+	+	-	
	すり減り抵抗性 Wear Resistance	+	-	+	-	+	+	+	
	化学変化の抵抗性 Chemical Resistance	+	-	+	-	+	+	+	
	防水性 Water Proofing	+	-	+	-	/	+	+	
	乾燥収縮 Dry Shrinkage	+	-	-	-	+	-	-	
	密度 Density	+	-	+	-	-	+	/	

Ref. Dunham : "The Theory and Practice of Reinforced Concrete" p. 45.

ている。

アメリカではフィードボンド法であるが、日本の基準にはメートル法に直しているし、応力記号も σ , τ を採用したのである。ちなみに、建築基準のほうでは許容応力記号にアメリカと同じ f を採用している。

皮肉なことに、いまアメリカではフィードボンド法からメートル法に切り替える作業が進んでいるが、改正された形は、日本の現行の習慣とほとんど似た形になってきている。

吉田の著作は、世間一般の評価が高いけれども、ある程度の経験を積んだ研究者にとってみれば、いささか泥くさく見えるようである。批判の第1の理由は、彼の著作に理論的な展開がないし、数学にしても代数計算以上に高級なものが使われていないから、学問に値しない、と極論する人すらいる。しかし、技術は経験の蓄積の上に進歩するから、経験を具体的に（つまり数量的、工学的に）集めることは技術を広め、それを伝えるのに役に立つ。

これに反して、日本古来の伝統技術である木造建築、たとえば寺院建築の知識の習得を取ってみても、具体的な指導体系にまとめられていなくて、結果的には技術者の不足によって消滅する危険を持っている。現在、コンクリートが幅広く使われていること背景には、経験で得られた知識を門外不出のように閉鎖的なものとせず、示方書の形で広く、一般に公開していることに注目しなければならない。

技術的な知識を第三者に教示することは、何か技術そのものを盗まれるような感をいだくものであるが、実はそうではない。それを公開することにより、多くの人々がそれをより改良することに工夫をこらし、その結果が再び元の知識をさらに進めるのに役に立つ、コンクリート工学はコンクリート示方書と密接につながった形で進歩

発達している。そして、このような技術の環境を作ることは従来日本の習慣にはなかったことである。

コンクリートに限る話ではないが、外国の技術を導入して習得してきた時代には、技術を普及させる意味もあって、非常にいいねいな、実務に適した指導書が作られる。これは大部分が外国語の参考書を参照していることが多い。ところが、ある程度の教育が普及すると、まるでお料理のテキストのような、くどい説明を低級なものだと思ってくる。大学で教育する内容にふさわしいものは、職人がやるよりも、もっと高度の研究にあるべきだと考えたりする。その結果は実務を遊離した、また実務にそぐわないことが高度の研究であると錯覚してくる。

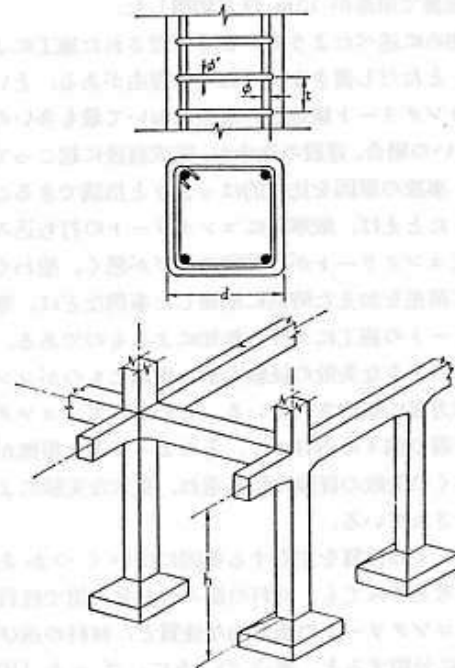


図-3

表-3 チェックリストの形にまとめた例

柱の設計細目 (帯鉄筋柱)	
1.	最小横寸法 d は 20 cm 以上.
2.	軸方向鉄筋の直径 ϕ は 12 mm 以上.
3.	軸方向鉄筋の数は 4 本以上.
4.	軸方向鉄筋の純間隔は 4 cm 以上, 粗骨材の最大寸法の 4/3 倍以上, および鉄筋直径の 1.5 倍以上.
5.	軸方向鉄筋の断面積は, 所要コンクリート断面積の 0.8 以上, 6% 以下.
6.	帯鉄筋の直径は $\phi/6$ mm 以上.
7.	帯鉄筋の間隔は柱の最小横寸法 d 以下, 軸方向鉄筋直径の 12 倍以下, 帯鉄筋直径の 48 倍以下.
8.	かぶりは鉄筋の直径以上, および一般的標準として, 重要度に応じて, 2.0, 3.0, および 4.0 cm とする.
9.	柱の有効高さ h は, 柱の両端の固定度に応じて定める. 柱の端部が横方向に支持されていれば, 軸線長を取る. 片持ちばり状に一端が自由である柱は軸線長の 2 倍を取る.
10.	短柱は $h/d \leq 15$. このときの最大許容軸方向荷重は $P = \frac{1}{3}(0.85 \sigma_{ck} A_c + \sigma_{sy} A_s)$
11.	長柱は $15 < h/d \leq 40$. このときは上式に α を乗ずる. $\alpha = 1.45 - 0.03 \left(\frac{h}{d} \right)$
12.	軸方向鉄筋の継手は溶接継手とする. 溶接継手以外の場合には, 本数の 1/2 ずつとする.
13.	その他 曲げを同時に受ける柱は弾性計算による. 断面の主軸回りの曲げに対して引張り応力が, 圧縮応力の 1/4 以下, および 2 軸曲げでは同じく 0.35 以下であれば, 曲げの影響を省略し得る. 荷重に対して断面が十分大きければ任意.

コンクリートの示方書は, 本来の目的は現場の職人が読んで納得できる内容のものが望ましい. 複雑な式や, コンピュータで計算しなければ使えない内容のものは基本的に誤っている. 最近, 示方書が次第に難解になってきているが, それと同時に示方書読みのコンクリート知らずの技術者がふえてきている. 現場の技術者が切実に望んでいることは, 現場の職人に納得してもらっていない絵入りや図解の説明書であることは知られていない. このような指導をすることに対して, 実はもっと真剣に取り組むべきであるし, これは遠回りのようであるが, 安全対策に最も役立つと考えられる.

表-3 は, 筆者が学生のコンクリート講義用に作製した虎の巻であって, いわば設計判定のチェックリストとして使用しているものである. このリストを参照しながら設計させると, まあま実用になる断面を学生でもできることは確かである. (つづく)

(3) 地震とコンクリート構造物

コンクリート構造物が崩壊するような事故は、現在までのところ、後述するマルパセのアーチダムの崩壊事故を除けば、大部分が地震によるものであり、それゆえ多くの技術者が耐震設計に注目しているのである。コンクリート構造物をどのように設計するのが最善であるか、という設計技法に関する研究も少なくないが、設計方法を誤った事故よりも、むしろコンクリートそのものの扱い方に誤りがあることによる事故のほうが圧倒的に多いのである。

コンクリート構造物に限らないが、コンクリート構造物の場合は、とりわけ実物による確認が重要である。どのように理論を駆使した設計であっても、実物が設計荷重を作用させたときに、なにかの不都合が出れば落第である。しかし、耐震設計に関する限り、設計荷重を作用させる試験はほとんど不可能に近い。したがって、あらゆる従来を経験を生かして、耐震性を研究するのであるが、関東大震災以来、地震によって多くの構造物が破壊されている。

とりわけ、コンクリート建築の場合には、地震のたびに象徴的な建築物の破壊が見られている。福井地震のときの福井デパート、十勝沖地震のときの函館大学校舎の崩壊、サンフェルナンド地震のときの在郷軍人病院の崩壊などである。とりわけ、函館大学校舎の崩壊事故は、改正されたばかりの新建築基準法によって、最新の耐震計算方法を採用した直後であったこともあって、建築技術者に強烈な衝撃を与えた。また同じく、サンフェルナンド地震の場合においても、耐震設計を採用していたにもかかわらず、コンクリートの柱がもろくも崩壊したことの衝撃は大きかった。

耐震設計方法がこの間まったく進歩しなかったわけで

★ 名古屋大学工学部助教授

はない。武藤清博士をはじめとして、耐震性能の向上にはコンクリート構造物においても筋違えや耐震壁を設けることが効果的であるという研究が進められてきたし、これは現実に役に立ってきている。

しかしながら、高さの高くなるコンクリート建築の場合、地震力を静的な水平力に換算して作用させると、下層の階には大きな力がかかり過ぎる。丈夫に過ぎる樫の木が大風で倒れても、風にそよぐ葦は健全である例のように、思い切った発想の転換が霞ヶ関ビルに端を発した超高層建築の思想である。しかし、注意しなければならないのは、霞ヶ関ビルをはじめとした超高層建築は、主体が鉄骨なのであって、コンクリート構造物とは根本的に異質な構造物であり、この思想を無批判にコンクリート構造物の設計に応用するのは誤っている。

函館大学校舎の崩壊は、上述の思想の谷間に起こったものなのである。つまり、設計上は風にそよぐ葦であるべき構造物が、実に非常に脆い骨組であったために、仮定が完全に狂ってしまったのである。コンクリート構造物であっても、鋼構造のように大きな変形能（ダクティリティー）が可能であれば、仮に局部的な破壊が起きても、崩壊という致命的な惨事にはならなくてすむ。そこで、コンクリートの部材の設計において、どのようにすれば脆い破壊をしないですむかの研究が必要と考えられるのであるが、皮肉なことに、何のことはないこの注意は、とっくの昔にコンクリートの示方書に載っているのである（表-3 チェックリスト参照）。

筆者自身が実際の地震被害の実態を調査できたのは新潟地震であるが、そのさい、橋りょうのコンクリート橋脚をはじめとして、非常に寸法の大きい柱状の部材が、いとも簡単にせん断破壊されているのを見てきた。その多くは、柱の軸方向に十分過ぎるほどの軸方向鉄筋が使われているにもかかわらず、帯鉄筋や肋筋に相当するものが驚くほど貧弱であった。サンフェルナンド地震のさ

いの病院建築の場合においても、事態はまったく同じである。

このような設計の柱がなにゆえ施工されたかの背景はいくらか複雑であるが、結論からいえば、コンクリートの柱はかくあるべきだというコンクリート構造物の原則に忠実でなく、理論に忠実であったのである。理論に忠実である場合には、柱における帯鉄筋や肋筋はほとんど必要としないからである。

函館大学校舎の崩壊の直後に、この建物を建設した責任者が次のような話をしたのを新聞で読んだことがある。いくらか記憶違いがあるかもしれないが、要するに「われわれは、建築基準法に指定された耐震設計方法に忠実に従った。今回の地震の震度は設計震度を上回ったのであって、設計に誤りはない」というものであった。実に明快な割り切りようであって、法的な責任の立場から見れば正しい判断になる。しかしながら、設計の技術者から見ると、一部の部材の破壊が全体の崩壊につながることの恐ろしさを改めて認識させ、安全というものに対する根本的な問いかけを与えたのである。

(4) コンクリートの耐久性と安全

よいコンクリートであるという評価は、その構造物に適した設計のもとに、よく管理された施工とともに、総合的に判断して経済的になるコンクリートに与えられるのであって、強度の高いことが必ずしもよいコンクリートであるとはいえない。常識的な感覚から判断すると、強度の大きいコンクリートを施工できれば、部材の断面の節約につながり、結果的に経済性を発揮できる。これは一面では正しいが、常には正しくない。

一般に、よい設計をしたいと研究すると、コンクリート部材であっても力学的に不明朗な応力分布をしないように計算で断面を決定する。理論と実際とがよく一致するのはよい反面、コンクリートには確実に応力が作用し、長期間の使用の間にくり返し応力による疲労の影響が蓄積され、破壊が目立つことが多くなる。つまり、耐久性に劣るのである。この種の破壊の例としては道路橋における鉄筋コンクリート床板が問題になったのはよく知られている。

現在では、橋の設計者は多分に専門分化され、鋼橋の設計者とコンクリートの設計者とは互いに独立している。鋼橋の設計者は一般論としてコンクリート部分の設計が下手であり、かたやコンクリート技術者は鋼構造の扱いに不得手である。同じ条件で道路橋のコンクリート床板を設計させると、鋼橋の技術者は理論に走り、概してスラブ厚の薄いものを設計したがる。また、鉄筋の使い方にしても、計算された断面以上には使いたがらない。数年前、道路橋の床板の最小厚さの制限を引き上げたさいには、多くの鋼橋の設計者には、すこぶる評判の

悪いものであった。

弾性的に設計されているコンクリート部材の耐久性に関する研究は比較的新しい課題になっているが、設計技法に、これを反映させるには、かなり高度の判断を必要とする。というのは、理論的にも、また実験的にも、完成直後の構造物で見れば十分な安全性が確かめられていても、完成後の時日の経過とともに不都合が現われるため、この原因が設計時の判断の誤りに帰因するとは考え難いからである。

現行の設計習慣では、コンクリートの安全を主として応力で検討しているが、疲労を支配するのはむしろひずみの大きさである。そして、ひずみを抑える設計上の知恵は、多くの場合たわみの制限とか、部材の剛性が小さくならないように最小寸法を定める形で与えている。最近のようにコンクリートの許容応力を高めに使用し、構造物の寸法が大きくなってたわみややすさが増すと、従来無視してもよかった影響が支配的になることがある。たとえばコンクリートのクリープの影響はプレストレストコンクリート構造物が多く使われだして、初めて設計上の重要な因子になってきたのであって、これを軽視したり、また考えもしなかったために、コンクリート橋の縦断こう配が狂ってしまった悲喜劇は少なくない。

コンクリートの耐久性を支配する要因として、古くてなおかつ新しい課題がクリープと疲労である。そのどちらにも、コンクリート中の水分が大いに関係があることがわかってきた。筆者の研究室の田君が大学院生として研究した簡単な実験によると、水で内部が飽和されているコンクリートは、クリープが伸びない代わりに強度が平均して数パーセント下回るし、くり返し荷重による強度も空中に置かれたものより低下することがわかってきた。防水が不完全であったり、年中湿気を多く受ける所で、くり返し荷重を受けるような部分のコンクリートの破壊を、筆者は最近注意して探している。

参考資料とその解説

コンクリート構造物の破壊について具体的事例をあげながら解説を加えようと、当初は筆者も計画したのであるが、これについてはよい参考資料があるので、それを見ていただきたい。

1. JACOB FELD "LESSONS FROM FAILURES OF CONCRETE STRUCTURES", ACI MONOGRAPH No. 1, 1965.
2. JACOB FELD "CONSTRUCTION FAILURE" 邦訳「建設事故の記録」彰国社, 1972.
3. 樋口芳朗, 村田二郎, 小林春夫「コンクリート工学 (I) 施工」彰国社, 昭44, わかり易い土木講座 10

コンクリート工事における失敗を見ると、いわゆる人間的ミスによるものを除くと、その事故当時のコンク

リート技術レベルを反映する。したがって、現行の示方書に忠実であれば避け得た事故を除いていくと、コンクリート構造物の破壊としての解説は、地震によるものと疲労によるものとし、よい例をあげられなかった。いささか散漫な説明になったことをお許し願いたい。

土と水とに関連する災害や事故

はじめに

中国の昔の思想では、宇宙を構成する5つの元素は木・火・土・金・水であるとされていた。構造物を構成する材料の中で、土、つまり広く考えれば石材、岩石を含めて、天然自然の材料は昔から大規模な構造物の建設に使われ、現在にまで多く遺跡として残されている。自然のたたずまいは、それがあまりにも身近にあるから、構造物そのものと考えたことはないが、考えようによっては、長い期間をかけて造形された大規模な土木工事とも見ることができる。箱根の芦の湖、日光の中禅寺湖などは、自然の作ったダムによる湖であるのはその例としてあげることができよう。

自然の作る造形は、非常に長い時間の要素の産物であるから、人間の生活サイクルに比べればけた違いに長い時間がかかっている。いいかえれば、人間の生活サイクルに比べれば、自然の造形する構造物は安定していて、安全であると考えてよい。しかし、50年、100年という長い時間的要素を考えると、一見安定な自然の造形物も、必ずしも社会生活を営む上で安全な構造物でないことがある。この破壊現象を自然災害と呼んでいる。

一般に、人間が自然の造形に手を加える場合には、ほとんど土に関連するものである。そして災害の大部分は多かれ少なかれ水の作用がからんでくる。土を扱う難しさは、これが単に構造材料として特異な性質を持つだけでなく、地球という規模で地下深くまで繋がったものとしても考えなくてはならぬからである。そこで、土と水とに関連したいくつかの事故について、土質工学的な見方でなく、破壊と安全の立場から、筆者の見解をこの節で述べてみたいと思う。

まず、そのまえに、非常に宿命論的な話から始めることにしよう。日本列島というのは、早い話が岩石と土壌で作られている。これは雨によって供給された水が、河川となって浸蝕して海に流されていく。雨水は蒸溜水であるが、河川の水にはナトリウムやマグネシウムなどのイオンが含まれている。これは何を意味するのか。名古屋大学の北野康教授の推論はこうである。岩石中の斜長石が風化されて粘土になる化学計算をもとに計算してみると、1年間に日本列島全体で風化される斜長石の量は、少なくとも見積っても $17.2 \times 10^6 \text{ t}$ 。この他に $9.7 \times 10^6 \text{ t}$

の石灰石、 $2.2 \times 10^6 \text{ t}$ の黒雲母が風化されるという。これらは間接的であるにし、地すべりや山くずれの種になるわけで、日本列島全体で考えれば、これだけの量の土に関する自然災害はすでに宿命的な最小値だというのである。

話はまだあって、海に溶け込んだ成分は海底に沈殿していく。この場合の堆積厚さの増加は、陸に近い海で土砂の堆積を考えず、全世界の降雨を考えると、世界的に考えた大洋の沈殿物の厚さ増加と等しい、というのである。この話を聞いて、将来の日本列島は砂と粘土だらけになりそうに思ったが、少なくとも、何世紀にわたって永持ちする土構造物は自然の風化作用を無視して設計することはできないといえよう。非常に強固な岩盤に建設されたダムであっても、数十年、数百年という長い期間を考えると、次第に風化し、安全性が低下していく、という感覚は、まだわれわれの経験しないものである。

(1) 地すべり

「地すべりについて」という簡潔な名文を学士会報 No. 726 (1975.1) に村井勇氏が載せている。その中から多くの部分を引用させていただいて、地すべりのことを説明していきたい。まず、同じような用語として、地すべりのほかに、崖くずれ、山くずれ、などの言葉がある。用語とその現象の定義には専門によってかなりのくい違いがあるが、大雑把な分類をいえば、地すべりは土地の塊がすべって移動する、比較的規模の大きい現象をいっている。山の斜面や崖のような、比較的急な傾斜のところで、移動落下が急激に起こり、移動した物質がもみくちゃになるようなものを山くずれ、崖くずれとして区別するようである。

土質工学でいう斜面の円弧すべりは、この定義でいえば地すべりの小規模のものであり、土の切り取りや、のり面の表面に生ずる崩落は、いわば崖くずれ、山くずれに相当している。

地すべりの典型的なものは、土地の塊が比較的ゆっくりとすべり、その移動する塊が、はっきりとしたすべり面を持っていることで、このすべり面には地すべり粘土が見られる。このタイプの地すべりは、日本では主に第3紀層の分布する地帯に多く、風化した花崗岩質の山塊に地下水の水脈が走っていることが多い。名古屋市周辺の愛知県、岐阜県の山間部にはこのような場所が比較的多く、山や丘陵のたたずまいを眺めて見ると、地すべりで造成されたと考えてよい地形を多く見ることができる。

構造物の建設、それも道路や鉄道の建設工事で最もしまつの悪い場所は、このような地すべり地帯である。むろん、このような場所を避けられればよいが、そうはいってられないことが多くある。建設工事が地すべりの

引き金になった事例は比較的多い。よくあるものは、地すべりで移動する土地の塊の先端部分を切り取ったり、地下水の水脈を乱したりすることで力の釣合いが破れ、動き出すことである。移動の速度は緩慢であるが、じわじわと押し寄せる土地の塊の圧力は不気味な恐ろしさを持っている。

i) ピオント・ダム of 地すべり

地すべりとして史上最大の被害を出したのは、1963年、イタリアのピオント・ダムで発生したものである。このダムは1960年に世界第2位のアーチダムとしてアルプスの山中に作られたが、貯水池が満水になるとまもなく大地すべりが発生した。左岸の長さ1.8km、幅1.6kmにわたる大地がすべって湖中になだれ落ちた。その総量は2億4000万 m^3 以上であった。これだけの大塊が30秒ないし60秒の間に600mの高さから落下し、その衝撃のため、ダムの水は、ダムを越え、高さ100mの水の壁となって下流を襲った。6分後には約2km下流のロンガローネの部落を全滅させ、死者2000人以上、全壊家屋約600戸という大惨事をひきおこしたが、ダムそのものはまったく無傷であった。

このダムを建設している間に、岩盤の調査が行なわれ、峡谷の側壁には大きなひずみが残っていて、岩石の崩壊が起こりやすいことはわかっていた。もともと、このアルプスの峡谷はいまから1万8000年前に氷河がとけ、その重みが開放されたために岩石中に、地表に平行な割れ目が無数にできていた。ダムが満水になると、この割れ目に水がしみ込み、岩盤の強度が弱まり、ゆっくりとした地すべりが発生し始めたのである。はじめ、その運動は1週間に25ないし30cmの早さであったものが、しだいに速度を増し、そして突発的な大地すべりを発生したものである。

地すべり地帯は地形に特徴があるから、航空写真による解析であらかじめ危険地帯を指示することができる。また、すべりの速度もゆっくりとしていて、人命に被害が出ることは少ない。しかし、台風、豪雨、地震、出水などが地すべりの引き金になったものは、移動の速度が早く、また必ずしも、地すべりが予見されている場所に限らないことがある。そして、これが、大きい災害を及ぼす。ピオント・ダムの峡谷におきた地すべりは、もし数千年という長い時間を考えれば、いつかは発生する浸蝕作用の一種であるかも知れないが、人為的な構造物が変化を促進させたと考えられなくもない。

地殻運動に伴う断層や破砕帯は、やはり地すべり地帯として知られていることが多い。このように、地球の長い歴史の輪廻の中での土地の変化は、いわば宿命のようなものであるが、約500年から1000年という単位で時間を考えると、一度大きな地すべりや山くずれが発生して安定になった場所は、一種の免疫ができて安定な地形

を形づくる、ということも知られている。地震は地下深い所で発生する地すべりと考えられなくもないが、地震と地下水とが密接な関連を持っていることもよく知られている。

アメリカで、工場排水の処分のため、地中深く井戸を掘り、排水を圧送して処理を始めたところ、いままで観測されることがない地震が頻発した例がある。逆に、日本では松代群発地震の際に、地下水が断層を通して勢いよく湧き上がり、地表で地すべりを引き起こしている。いずれの場合でも、数百年ないし1000年という時間の単位で考えれば、一応安定な地形であっても、人為的、自然的どちらの原因であっても、地下水が変形を促進することが知られている。したがって、大規模な建設工事にあたっては、地球の歴史という規模で考えていた環境の保全を考える時代になってきたと考えるべきであろう。

ii) マルバセ・ダムの崩壊

ダムの崩壊として最も悲劇的な事故は、南フランスのマルバセ・ダムの崩壊であろう。このダムは、当時高名なアーチダムの権威であった André Coyne 氏の設計になるもので、ダムの高さ66.5m、堤頂長さ260m、アーチ式のダムで、厚さは基礎部分6.91m、堤頂でわずか1.5mであった。建設は1954年であるが、1959年12月2日の夜半、左岸の基礎部分の岩盤がダムの満水状態の水圧に耐えきれず破壊し、ダムの本体は無残に破壊されてしまった。満水の水は10km下流のフレジュスの町を襲い、死者、行方不明500人以上という大惨事を引き起こした。

実は、この事故の年代は世界的にアーチダムの建設ブームにあって、日本でも黒四ダムの建設が脚光を帯びていた時代でもあるし、アーチダムの安全生について一応の目途がついていたこともあって、ダムの建設者や研究者に与えた衝撃は想像を絶するものであった。先のCoyne氏は約2年前に来日したことがあり、日本での講演会を筆者も聴きに行った。手渡されたパンフレットには「繰り返すようですが、アーチダムは絶対に安全であります」と書かれていた。しかし、一部の構造力学の研究者たちは、計算上のアーチダムの力学で安全性が保証されるためには、境界条件、つまり岩盤が理論に忠実で強固である場合に限る、という説を主張して絶対の安全性はあり得ないことを指摘していた。

アーチダムにとって、アーチの反力を支える岩盤が弱いことは致命的である。そして岩盤が弱くなるのは、種種の原因があるにせよ水の浸透が直接、間接に大きな作用を及ぼす。この事故を一つの契機として、ダムの建設を始めとした巨大な土木構造物の計画においては、人工の構造物の力学特性だけでなく、岩盤を含めた全体の力学特性を検討する時代に移ってきている。なお、Coyne氏

は、マルバセ・ダムの崩壊事故後、比較的早い時期に亡くなった。

(2) 崖くずれ、山くずれ

砂や砂利を積み上げてできる山の傾斜には安定のある最大角度、つまり安息角があることはよく知られている。丘陵や山岳地帯では、その土地ごとに平均した安息角が存在し、その角度以上になる所は概して山くずれ、崖くずれの発生しやすい場所になっている。安息角が急になる要因には人為的なものもあるが、自然災害的には河川の浸蝕によって起こる。豪雨などで水分が増加し、相対的に摩擦角が減少したときに山くずれ、崖くずれが発生する。

この定性的な性質は、かなりめんどろな調査と統計的な計算によって定量的に証明されている。この研究は、昭和47年7月、ほぼ日本全域に及ぶいくつかの地域が局地性の豪雨に襲われ、各所に大きな災害を生じたことに関連して行なわれた名大、西畑勇夫教授などの災害研究で得られたものである。

同様な災害として雪崩がある。深層なだれのような大規模のものは、むしろ地すべりと似ているところがあるが、表層なだれは現象的に崖くずれや山くずれと同質のものである。

山くずれ、崖くずれは豪雨のときに発生しやすく、また、多くの人命が失われる災害になる。昭和32年、熊本市や諫早市で梅雨前線に伴った集中豪雨で146名、昭和46年、台風19号による豪雨でシラス台地を中心にした山くずれ、崖くずれで55名、同年の台風25号によっても房総半島で56名、昭和47年7月豪雨では全国で

239名の死者が出た。皮肉なことに、昭和47年、川崎市が生田で行なわれた崖くずれの実験で、報道関係者を含め15名の犠牲者も出している。同じ年、香港でも集中豪雨で死者が90名以上も出ている。

そもそも、日本のように人口の密な地域では、新しい造成地が、いままであまり人の住まなかった丘陵地を切り開いて作られ、崩壊しやすい人工的な崖が各所に作られ、しかもその防災対策が貧弱であることにも災害の原因がある。しかし、昭和47年7月豪雨による愛知県の山間部では、古い旧家が軒なみ被害を受けた。これは、この地方の農家が山裾に背中をつけるように家を建てる習慣があったことが、結果的に崖くずれの直撃を受ける悲劇になったのである。

山くずれ、崖くずれなどは、浸蝕作用の一つとしてごく普通に起こる自然現象であるから、人間が大自然と調和を保って生活している間は大きな災害とはならない。道路や鉄道の建設では自然の崖や人工の崖を避けるわけにはいかないことが多い。飛騨川のバス事故は、たまたま停車していたバスを崖くずれの土石流が直撃した悲劇であって、亡くなった方の不運には同情を禁じ得ない。

自然を相手の建設工事では、大自然の浸蝕作用や変動に逆らって工事を進めることは、仮に10年ぐらゐの短い期間では成功することがあっても、長い眼で見ると、いつかは自然の破壊力に屈してしまう。社会活動の要請が開発を必要とすることを否定するつもりはないが、自然災害の防止や万一発生したときの救済は、建設工事の過失の追及で解決するのではなく、ずっと大局的な認識に立つ必要がある。

(3) 土工事における事故

地すべり、山くずれ、崖くずれなどのように、自然災害として分類されるものを除くと、建設工事において発生する事故の半数近くは土工事に関連している。それも、陽のあたる第一線の作業現場ではなく、穴掘りをやっていて土がくずれた、という類のもので、死者は出かせぎの労働者に集中する。構造物そのものが破壊したような事故は、いわば物損であるから現象が派手であるわりに問題は少ない。しかし、生き埋め事故は非常に深刻な問題であって、多くの建設工事はこの対策に神経を集中させる。ところが、この種の事故は、下請け工事や小規模の工事などに多いこともあって、建設災害全体の件数から見ると、いつでも上位にはいる。

多少の土をかぶったくらいで死亡事故になるとは、素人考えで想像もできないが、土や砂の比重は少なくとも人間の倍はあり、崩落する土砂の直撃と共に土に埋まると胸が締めつけられ、呼吸ができなくなって窒息する。骨材プラントで、蟻地獄のように吸い込まれ死亡する事故、日本ではほとんど例がないが、流砂にのまれて死亡する事故も、また、雪崩に埋まって死亡する事故も、窒息が原因になることが多い。

トンネル工事や、鉱山の坑道、井戸の掘削、埋設管のための穴掘り、などの作業は常に危険を伴っている。この危険の予測は経験的というよりは、むしろ本能的なものと考えてもよい。本人自身の自覚はないが、閉所恐怖症という心理学的な病気がある。狭い空間に押し込まれると心理的に不安感に襲われ、感覚が狂い重病になると精神分裂のようになって半狂乱になってしまう。その逆に、狭い洞穴の中で平静に行動できる人もある。トンネル工事のベテランと呼ばれる人は、見方を変えれば普通人にない能力を持った専門家と考えるべきであろう。

* 名古屋大学工学部助教授

同様のことは高い場所の作業を得意とするトビ職にもあてはまる。

危険と隣り合わせになっている建設工事において、いち早く危険を感じて適切な処置ができるには、鋭敏な一種の動物的感覚ともいえる神経が役立つことが多い。建設工事の現場は、世間一般の常識から見ると非常に荒唐しくて、粗暴な人間の集団であると誤解されている面があるが実はそうでもない。熟練した労働者であれば、一見非常に危険な作業に見えても自分の身の安全に関して実に慎重で繊細である。危ないと感じた場合には、たとえ監督者が命令しても受けつけない頑固さを示す例はいくつもある。

建設工事の事故で死亡されたり、怪我をされたかたには気の毒であるが、事故の原因があきらかに本人の不注意によるものといえる事例は非常に多い。熟練した労働者はある種の信心深さを持っているもので、運とか、つきとかを気にする。いっぽう、名誉欲とか出世欲のような派手さを好む人は成功の喜びを味わいたい欲望のために危険を犯す。

建設現場の安全を確保するには、作業環境を良くすることが大切である。経験のある職人が経験的、感覚的にとらえた危険からの回避行動をなるべく具体的な形で資料に積み上げることが技術者の使命であるが、これはなるべく英雄的行動や特攻精神を必要としない対策を実行するのと結果的には同じことになる。最近では日本全体が次第に都市化し、考え方が自然離れ、機械崇拜になりやすい。安全対策に予算をつけるだけでは自然相手の工事の安全には役立たない。自然に親しみ、自然を良く知ることが地球上に住むわれわれに最も必要なことであろう。

(4) 地盤沈下や不等沈下

地面に穴を掘って、ふたたびそれを埋めもどすと、ど

のように突き固めても土が余る。河川が運んだ土砂の堆積で作られる沖積地も、程度の差はあるが、収縮の可能性を持っているし、人工の埋め立て地ではなおさら大きい。これが一般に地盤沈下をもたらす。水を含んだものは、水が抜けると収縮する。いわゆる乾燥収縮というもので、コンクリートでも起こる。

現在大きな社会問題になっている地盤沈下は大部分が地下水の汲み上げに伴う地下水位の低下で圧密沈下を生じたものである。しかしながら、この沈下の主役はほとんど地表から数 10m の部分であって、それより深い場所ではその上に堆積した土の重量ですでにあらかた収縮がすすんでいることが多い。

地盤沈下は、地下水の汲み上げだけが原因であると早合点してはいけない。たまたま地盤沈下が社会問題になるところは海に近いこともあって、沈下が海面と比較して大問題になるからであるが、たとえば長野県の内陸部でも起きている。火山と、それに伴う温泉の水脈が要するに悪さをするわけで、道路はすぐに舗装が傷むし、建物の基礎は年中修理する必要がある。精度を必要とする工場の建設が不可能な場所がある。つまり、広く考えれば、地球物理学的な地殻運動によるものも地盤沈下に関係がある。

不等沈下の現象が世界的に有名な構造物はイタリアのピサの斜塔である。構造物が不等沈下をする事故は比較的多く、大きなものとして姫路城、身近かなものは普通の住宅にも見られる。地震が原因で生じたもので有名なものは、新潟地震の時の 4 階建鉄筋コンクリートアパートが流砂の現象によって傾いた。

不等沈下が社会問題になった 1 つのきっかけは、昭和 49 年末に起こった水島の石油タンクからの油流出事故と、その後調査された各地の石油コンビナートの石油タンク群に発見された不等沈下であろう。世間一般の不等沈下に対する受け取りかたには、不等沈下そのものが構造物の破壊を意味するほどに危険であると速断しやすいが、第 4 章の最初に説明した破壊の定義に従えばあらかじめ不等沈下量を見越してある変形は破壊と考えない。また、仮に不等沈下が許容量を越え、地盤が破壊したと定義されても、構造物の崩壊を起こさなければ安全対策は成功したと考える。

問題になるところは、あらかじめ地盤沈下や不等沈下量が見積られていたかどうか、ということ、そして、そのことが起こった後にどうするかが計画されていたかにある。筆者は新潟地震の震害調査のさいに、多くの石油タンクを見て回ったことがある。これらは、大なり小なり沈下や傾斜を起こしていた。そこで得られた教訓の 1 つは、配管してあるパイプ類が、取り付けの個所で U 字形や Z 字形のような、相対変形を許容できるフレキシブル構造がパイプの流出事故を未然に防いでいることであ

った。

石油タンクの基礎がどのようなものであるかを簡単に説明すると、早い話が角力の土依のようなものの上に、ドラム罐の化物が、ただ乗ったようなもので、橋りょうの橋台のように大きなコンクリートの基礎は作られていない。これは何も悪い構造ではない。関東大震災の時、鎌倉の長谷の大仏は転倒しなかったが、台座の上で滑ったためにあの重量構造物が大きな加速度を受けながら事なきを得たことがわかっている。

大きな石油タンクに油が満たされているときの重量は何万 t にも達する。仮に水平震度 0.1 を採用したとしても、これだけの水平力に耐える基礎を作るとなると、その規模は長大橋りょうの基礎に匹敵する。話は少し変わるが、鉄道の軌道と路盤の構成にも似たようなところがある。機関車の重量は非常に大きいものであるが、レール、枕木、道床それに路盤の組み合わせがあれだけの重量を支持している。沈下は年中起こるから継続的な保線作業を不可欠としている。もし鉄道車両の重量をコンクリートのスラブで直接受け持つ設計を行なうと非常に大きい断面が必要になる。

道路の舗装もそうである。名神、東名の高速道路が作られる以前では、アスファルト舗装はコンコート舗装に劣ると思われていた。つまり、強度的にアスファルトは信頼性がなく、不等沈下による道路の損傷が起きやすいと考えられていた。しかしコンクリート舗装は、強度を考えれば少なくとも 30 cm 以上の厚さを必要とすることになる。有名な事故には、昭和 30 年頃に箱根を越える国道 1 号線のコンクリート舗装がある。完成して 1 年も経たないうちに、コンクリートの舗装は目地を区切りにして 2 つ折り、4 つ折り、8 つ折りのように割れがはいり、見るも無残に破壊されていった。

現在ではすでに常識となっている路盤構成とアスファルト舗装の道路は、コンクリートの舗装にくらべると相当に弾力性に富み、圧密沈下も少なくないが実用の面で耐久性がある。

構造物の設計を、地上に現われている部分だけで安全性を論議することは正しくない。基礎が完全でなければ大きい重量を支えることができないが、もし沖積層が非常に厚く、強固な岩盤が非常に深ければ、仮に部分的に強固な基礎を作ったとしても、たとえば、コンニャクの上に積木を乗せるのと大して変わりはない。大きな構造物を建設する場合には、その建設場所の地盤に適した適正な構造物の規模が考えられそうである。この考え方に参考となりそうに思える 2、3 の測定結果を筆者は得ている。

その一例は、東名高速道路橋の浜名湖大橋の振動測定の結果である。浜名湖大橋は連続鋼箱げた橋であるが、4 径間のもの 2 径間のもの 2 つの橋から

成っている。橋脚上で測定される振動は、鋼げた自身の曲げ振動を受振するが、同時に軟弱な地盤の影響で、周期の長い振動をもひろう。長周期の振動は、地盤の卓越周期成分であるが、興味のあることに4径間の連続橋のものが周期が長く解析される。

もう1つの例は、利根川下流の小見川橋であって、この場所は厚い沖積地の真中である。橋脚基礎は、わかりやすくいえば、岩盤に基礎は達しておらず、いわば沖積層に中づりになっている。この場合の長周期振動も約3

秒のものが見つかっている。

重量の大きい構造物は、地盤全体を引くくめて考えないと力学的に正しい説明が得られない。構造物の耐震性状の研究のさいに、地盤の作用をバネに置き換えて理論式に代入する考えもあり、また、地震波が構造物にはいり、また逆に構造物から地盤に波が反射するという仮定も考えられているが、巨大な構造物が地盤の卓越周期を変えることもある、というヒントが研究の結果得られている。

(つづく)

疲労と脆性破壊

(1) 脆性(ぜいせい)の考え方

物の強さと、こわれやすさとは別の性質と考えるのがよい。強さというときには、静かに力を加えて破壊させることを考えているが、脆性、つまり「もろさ」という概念は、衝撃的な力に対する抵抗性の少ないことを意味している。ガラスとゴムとが、その両極端の代表的な材料である。もろい、ということの力学的な指標は、破壊するまで、どれだけの強度があるか、ではなくて、どれだけのエネルギーを吸収できるかで判断しなければならない。この点については、破壊の定義を論じたところで簡単に述べておいた。

伸びや変形の少ない材料では、結果的にエネルギーの吸収が少ないから、伸びの少ない材料がもろい材料ということになる。構造物の設計においては、あらかじめ使用する材料の強度や、破壊までの伸びの大きさを無意識のうちに勘定の中にいれている。なぜコンクリートの許容応力を決めるときに、鋼材よりも大きい安全率にしなければならないか、と問われたとしても、なんとなく従来の習慣がそうだから、と答えるしまつである。

近代的な構造物の歴史はまだ1世紀にも満たないが、大部分の構造物は支障なく役立っている。しかし、平均的な材料の性質に比べて、相対的にもろくなった材料が現われると、そこから構造物の破壊が生じる。原因としてあげられるものが2つある。第1は、材料そのものが他の材料に比べて、もろい材料になっていたこと、および2番目は使用しているうちに、材料が次第にもろくなったことである。そして、前者に帰因するものの代表的なものが鋼材の低温脆性であり、後者には疲労の影響が

・名古屋大学工学部助教授

大きい。

(2) ハッセルト橋の崩壊

低温脆性による破壊として最も注目すべき事故はベルギーのアルパート運河に架けられたハッセルト道路橋の崩壊(1938)である。この橋は当時の最先端の技術を駆使した、全溶接のフィーレンデル橋であった。このハッセルト橋のほかにも、アルパート運河には約50橋のこの種のフィーレンデル橋が架設されていたが、ハッセルト橋を含めて、いくつかの橋が1938年から50年にかけて、いずれも厳冬期にきれつを発生する事故が起きた。なかでもヘレントルス・オーロン鉄道橋に至っては、大音響が続いて3回起り、その中の1つのきれつは2.1mの長さで2.5cmも口を開けたが、橋は落橋せず、5時間後に1台の機関車が通行したという。

ハッセルト橋が有名なのは、破壊が派手で、また事故調査が多いせいもある。破壊当日の気温は -20° 、たまたま通行中の電車と数人の歩行者がいた。大音響が発生してきれつがはじり、約6分後に落橋した。破壊は最初、横げた1つが落下し、ついで下弦材に大きなきれつが口を開け、上弦材に全荷重が作用するとともに、アーチ作用でアバットを押し広げ、落橋したという。

1938年代は第2次世界大戦の直前であったこともあって、あまり詳細なレポートはない。事故調査にさいして当時は低温脆性についての認識がなく、事故原因として考えられる最大の要因を溶接による残留応力と応力集中、ならびに溶接部の疲労強度の低下に帰している。

(3) その他の著名な脆性破壊

鋼構造物の脆性破壊の事例にはいくつかあるが、参考のために表-1を見ていただく。特筆すべきものとして、アメリカが第2次世界大戦中に、大量に建造した溶接船に発生した破壊である。この事故に関するアメリカ海軍

表-1 著名な脆性破壊事故 (Boyd) による

年	構造物の形式および場所	リベットあるいは溶接	破壊の主要原因、あるいは関心が持たれる主要点
1866	配水塔 (ニューヨーク)	R	文献にみられる最初の例。錬鉄の使用が可能となり始めた頃に、鋼板を使用したことが原因である。
1889	ガス貯蔵用のシーリングタンク (ニューヨーク)	R	リベット線に沿わない部分の板の破断
1919	陸みつ貯蔵タンク (ボストン、マサチューセツ)	R	過大な応力が破壊を起こした。
1934	オイルタンク (アメリカ)	W	突然の寒気による底部と側面との間の温度差
1938-50	フィレンディールタイプのトラス橋 (ベルギー)	W	不完全な溶接、残留応力、切欠脆性、鋼材を含めた種々の原因
1942	オイルタンク (フォーリーハンツ)	W	溶接の補修部分から起きた破壊
1942-46	アメリカで建造された商船	W	鋼材の切欠脆性
1943	オイルタンク (アメリカ)	R	溶接された当て板の切欠効果
1943	球形の圧力容器 (イギリス)	W	脆性のセミキルド鋼の降伏点付近における応力集中と残留応力
1944	圧力容器 (クリーブランド、オハイオ)	W	多数の原因、非常に低温 (-161°C)、おそらく鋼材が不適当であった。
1945	-110°C で使用されるメタンカラム (アメリカ)、高圧ガスパイプライン (アメリカ)	W	溶接欠陥および炭素鋼板の切欠、側面の入口部分の応力集中、わん曲部に沿った非常に長いクラック
1949-63	アメリカ以外で建造された商船	R, W	鋼材の切欠脆性
1948-58	タービン発電機	W	ドリル孔から起きたクラックを含んだ種々の原因
1949	デュプレシス橋のプレートガーダー (ケベック)	W	溶接に適さない低品質のリムド鋼
1949	パワージェベルのブーム (アメリカ)	W	ブームの内側のダイヤフラムの付近から起きた横方向のバット溶接に沿ったクラック
1949	パワージェベルのディッパー (アメリカ)	W	
1950	ペンストック (アイダホ)	W	補修溶接の不十分なビードの切欠効果
1951	煙突 (シカゴ)	W	低温時の脆性挙動、円周応力を増大させた加熱ライニングの継手
1952	オイルタンク (ヨーロッパ)	W	ハンマリングおよびチップング部分から離れた裂け目において起きたクラックが、ひずみ硬化および残留応力によって進展させられた。
1954	タンカー "ワールドコンコード"	—	接合された切欠脆性板において連続的に起きた破断
1962	キング橋、プレートガーダのウェブ (メルボルン)	W	鋼材の溶接の規準が部分的に理解されず、試験が正しく行われなかった。
1962	圧力容器 (フランス)	W	鋼材の切欠脆性、熱処理の誤り
1963	大形ボイラー、サイズウェルの原子炉	W	静水圧試験のさいに支えているチェックを動かしたために発生した応力の再配分によって起きた破壊
1965	厚肉の円柱形圧力容器	W	静水圧試験のさいに、側板をホーリングに接合するサブマージドアーク溶接の HAZ の既存クラックから起きた破断
1965	穴あけ機械 "Sea Gem" (北部)	W	鋼板から切り離されたタイバークラックから起きた破断

の調査報告 (1947) は、その後の鋼構造物全般の溶接・設計に大きな影響をもたらした。

戦時中に建造された 4 694 隻の溶接船の約 5 分の 1 がなんらかの欠陥を示したのであるから、大変な数である。破壊の中でも派手なものは、船体が 2 つの部分に切断されたように折れ、その切口は、ガラスの破断の様相を示すものであった。詳しいことは省略するが、調査の結果わかったことは、溶接部分も含め、鋼材自身に問題のあることが明らかになった。その性質は、鋼材といえども、鉛ん棒のような性質があって、寒くなると硬く、かつ、もろくなる、という性質である。衝撃試験の結果、鋼材の温度を変えていくと、ある温度を境に、それ以下で急に材料の性質がもろくなる場所がある。その温度が 10°C 前後の材料では、仮に南洋の海では安心であっても、北大西洋の寒冷地を航行するとすると、鋼鉄船がガラスの船と同等になるのである。

アメリカ海軍のこの研究報告は、従来の構造物の破壊事例研究とは少し趣が異なっている。第 1 は、構造物の破壊には、その事例ごとに特別な環境や不運が重なった、いわば特異な面を持つが、この船の事故は、圧倒的

に数が多いことである。このことは、多くの事例を統計的に分析するうえでデータに不足はない。最近、構造物の安全性を統計的に見て決めようという研究がみられるが、その事例として必ず引き合いに出されるものが、この船の低温脆性の破壊例である。

船に限らず、鋼構造物にはいくつかの脆性破壊例がある。最近、三菱石油水島工場で重油流出が大きな被害を与えたが、この種の事例の最初のもは 1934 年にアメリカで起きている。現在ではあちこちに見受けられる球形ガスタンクの脆性破壊は、高圧ガスの噴出による 2 次的災害が大きく、恐れられているが、1943 年ニューヨークで起きた直径 11.7 m の水素ガスタンクの爆発がある。ほとんど同じときに、オハイオで液化天然ガスの容器が破壊し、この場合には 128 名の死者と約 700 万ドルの損害が出た。

水力発電所の水路に使う鋼管をペンストックというが、このペンストックは静水圧とともに衝撃的な水圧 (ウォーターハンマ) が作用する。ペンストックが脆性破壊をすると大きな被害を生ずるが、この破壊例としては、幸いなことに水圧実験中に破壊した。アメリカ、ア

イダホ州のアンダーソン、ランチ・ダムへのストックは 1950 年建設され、直径 4.57 m、肉厚 33.4 mm~39.8 mm、設計静水圧は水頭にして 99.5 m、これに衝撃水圧 28.7 m を加えて 128 m の水頭で設計されていた。テスト水圧が設計水圧の約 1.2 倍、水頭にして 155 m に達したときにきれつが発生した。

第 2 次大戦後、1950 年代に生じた船舶、圧力容器などの脆性破壊の研究から、その後溶接鋼構造物としての鋼材そのものに衝撃抵抗の大きい材料が要求されるようになってきた。また溶接技術の面においても、溶接による局所的な硬化や衝撃抵抗の低下を生じさせないような研究が進んだ。したがって脆性破壊は、低温脆性も含めて、最近ではほとんど生じないと世間一般では信じられてきた。しかし、安心は禁物である。2 年ほど前に、太平洋で鉱石運搬船がナゾの沈没を起こし、また、水島の重油タンクの破壊においても、破壊は脆性破壊のようすを示している。大きな声ではいえないが、鉄骨工場の中で、溶接の不備によるきれつを発見するのはザラである。幸いなことに、最近の鋼材は、仮にきれつがはいったとしても、それが急速に成長したり、ガラスが割れるように走らないので、大きな事故になる前に未然に処置できる機会が多い。これが、戦後の鋼構造物の進歩の最大の収穫といえよう。

(4) ボイラーの破壊

話はいささか古くなるが、鋼材そのものの進歩と、ボイラーの破壊とは密接な関係がある。産業革命は蒸気機関の発明に出発するが、これを動かすボイラーが、そもそもたいへん危険な装置であった。高圧蒸気を作るボイラーの爆発事故は、蒸気機関を使用する工場をしばしば壊滅させるすさまじい事故を数多く発生したのである。現在ではほとんど電気や石油機関に取って代わったが、安全を論じるときに、ボイラーの破壊事故を避けるわけにはいかない。

ボイラーが非常に危険な代物があったが、現在では高圧ガス容器にこの考えが引きつがれている。われわれにはなじみが薄いが、ボイラー保険、ボイラー圧延鋼材などの名前を見かけることがこの歴史を物語っている。ちなみに、ボイラー用圧延鋼材は、一般構造用圧延鋼材よりも品質において一段まさる規格になっている。

ボイラーではないが、似たような圧力容器の破壊としてかなり多くの事例がある。これはたまたま水圧試験中に起きた事例であるが、1965 年、アメリカのアンモニア工場で使用することを目的とした圧力容器は、内径 6.8 m、長さ 18.8 m の円筒形の高圧容器で、肉厚が 57 mm もあった。水圧テストで脆性破壊をしたのであるが、その破片の 1 つは 2 t もあるものが 46 m も飛ばされていた。原子力発電所には大形の圧力容器が作られる

が、この安全が非常に重要であるのは、いったん破壊が起きると、被害は壊滅的になる点である。

(5) 疲労による脆性破壊

鉄の針金を曲げたり伸ばしたりすると、その部分が熱くなり、数回くり返すと折れる。これが最も典型的な疲労による破壊で、破壊した個所のようすは、同じく典型的な脆性破壊である。程度の差はあるが、金属構造物の疲労による破壊は同じ現象と考えてよい。注意する性質は、金属の疲労には一種の疲労の蓄積があって、生体のような回復機能はない。一度曲がった針金を元に戻しても、最初の強度は保証されない。疲労の進んだ材料は、鋼材でいえば、溶かして作り直さねば元の性質には戻らない。これに対して、土や砂利、砂などは、変形によって新しい状態に移ることが破壊につながっても、疲労という考えを持ち込みがたい。

金属材料においては、全体が平均して疲労していくのではなく、ある一部分が最初に傷んできて、そこから広がっていく。出発点となる場所は、他の場所に比べて応力が大きくなる場所（応力集中）や、溶接部分などで局所的に材料そのものが硬くもろくなっている場所である。溶接構造物では、その両方を満足することが多いから、設計や施工に注意がはられる。

同じような応力集中は、リベット構造におけるリベット孔の周辺にも起きてよさそうである。現実にその事例は少なくないのであるが、リベット構造を主体としていた時代の鋼材は、材料そのものが伸びのよい軟鋼であったので、部分的に生ずる局部応力も周辺でやわらげられる効果があった。

話は多少戻るが、リベット構造物のリベット孔を配置するとき、応力直角方向の板の断面積はリベットの穴を控除して計算する。このとき、もし千鳥に打たれたリベットがこの断面のすぐ近くにあれば、そのリベットの影響も考慮することになっている。実際に実験してみると、あまり近接して千鳥にボルト穴を開けると、板は穴を千鳥に縫って破断する。ところが、疲労による破断は必ずしもこうならない。リベット孔の配列にはほとんど無関係のように、ある場所を出発点として応力方向に直角にきれつが進んでいく。もちろん、出発点はリベット孔の部分に多いが、常にそうではない。

きれつがはいると有効断面は減少し、応力が増加し、さらにきれつを広げるから、最後には破断する。国鉄在来線の 10 m 前後のリベットけたの疲労試験を行なった結果では、興味のある結果が出ている。約 100 万回のくり返し荷重試験で下フランジにきれつが発生したが、下フランジのアンクルが完全に切断された後でも、約 10 万回のくり返し荷重に耐えた後に破壊した。ここで注意することは、アンクルの部分の切断してから 10 万回耐

えたという事実である。この回数は列車の通過に換算して約1カ月という長さに相当するが、1カ月もあると、たいていの場合、列車の運転士や保線から異常の知らせがはいる。つまり、最悪の事故になる破壊がいままでほとんどなかったという事実を証明することになった。

しかしながら、なんの兆候も発見されないまま、致命的な崩壊に結びつく疲労破壊ほど恐ろしいものはない。この意味で、イギリス海外航空(BOAC)のコメット機の事故は、事故調査とそれに関連した研究の進め方で多くの教訓を与えてくれる。次にそれを示そう。

(6) コメット機の墜落事故

現代のジェット旅客機は普通、高度8000mぐらゐの高空を飛ぶ。その気圧は非常に低いが、乗客は与圧された客室で地上と同程度の気圧で居住している。その圧力差だけ、機体は風船のようにふくらみ、地上に降りると元に戻る。飛行のたびにこれをくり返す。

1954年に起きたコメット機の悲劇はあまりにも有名である。当時はまだ高空を高速で飛ぶジェット旅客機の機体について、知識と経験とが十分でなかったこともあって、2機続けて飛行中に爆発的な空中分解を起こしてしまった。最初は1月10日、地中海でコメット機が行方不明となり、墜落が確認された。原因究明のため全部のコメット機が綿密な検査をするためにロンドンに集められた。しかし、詳しい検査にもかかわらず、これといった異常は残りの機体にも見つからず、残がい調査からも墜落のナゾは解けなかった。2カ月経った3月23日に再び運航が再開されたが、1カ月もたない4月9日、再び地中海上で就航中のコメット機が行方不明になった。

この衝撃はイギリスのみならず全世界的にも大きなものであった。イギリス海軍は全力を挙げて機体を探し出し、それを引き上げ、原因究明に取り組んだ。機体を調べていた調査員が、機体の最前部の操縦席の窓わくに、金属疲労によるものとみられるき裂の跡を発見した。

これから話が専門的になる。この疲労の事実を調べるため、コメットの機体がすっぽりはいる巨大な水槽を作り、1万mの高空と同じ圧力状態を再現させるとともに、飛行状態と同じになるような荷重や振動を加える装置を作って実物試験をした。結果は半年後に明らかになった。最初に述べたようにくり返し荷重により、与圧された機体の窓の部分の構造が疲労によってき裂がはいり、空中爆発につながったことが明らかになった。

話はもう少し筆者の研究とつながる。第1に、このコメット機の疲労試験の規模そのものの大きさよりも、この試験に投入された実験設備に注意したいのである。まず、振動荷重を作用させるのに、動電形の加振機が有効に使用されたことである。また、応力測定に抵抗線ひずみゲージが使用されたことは無論だが、大量の測定の自

動処理をすでにこの時点で行なっていた。航空機産業という技術の最先端をゆく優遇を受けていたとはいえ、日本の大学の研究室の設備は、20年たった現在、やっと同じ設備らしきものをそろえようという状態が悲しい。

(7) コンクリート構造物と疲労

いままでの話は金属構造物に重点を置いて疲労や脆性を考えていた。しかし、コンクリート構造物は最初からその性質が鋼材料に比べてもろいから、設計の主要な注意点は、いかにすればき裂の発生を少なくすることができるかに主要な努力がそそがれてきた。コンクリートの応力が低目に抑えられていることもあるが、応力集中を避ける構造、たとえば断面の急変を避けるハンチなどは理にかなっている。

コンクリート構造物の疲労に関しては、従来あまり注意されていなかった。その理由は、原因のいかんにかかわらず、き裂がはいったということ、強度の不足とか乾燥収縮で片づける傾向があった。しかし、コンクリート構造物といえども、大きな荷重に対して相当の弾性変形が生じるような場合、具体的には橋りょうの鉄筋コンクリート床版やPC橋りょうでは、くり返し荷重による疲労の影響が無視できなくなってきた。たとえば、道路橋の鉄筋コンクリート床版は、通過交通量の増加に比例して傷むし、コンクリート舗装もその例にもれない。日本においては、PC構造物の歴史がまだ浅いこともあって、疲労と考えられる事故の報告は知らないが、将来注意深く観察する必要があるであろう。

コンクリート構造物は、概して大きくなり返し荷重にさらされるよりは、気温の変化や気象作用という長い周期の影響を受ける。この抵抗性を一般には耐久性と呼ぶが、温度変化に伴う伸縮と、それによる応力やひずみの変化は無視できないことがある。たとえば、一般に鉄筋コンクリートの建物では、橋りょう構造物で考えるほどに温度による変形を深く考えていない。いわゆる公団住宅形、またの名前をダブルハーモニカ形の横に長い建物では、夏の日照と冬の低温との差は屋上で相当の大きさになる。その結果、最上階や南面の柱やはりに必ずき裂が発生している。極端な場合、細長い構造物のほぼ中央付近に最も応力を集中し、体裁のよくないき裂が走ることが少なくない。

夏冬、夜昼の温度変化のような影響は、長周期の疲労作用と呼ばれるものである。橋りょうには同時に水道管やケーブル埋設の管路をめぐらせていることが多いが、電話線の断線事故が、以前、橋の取り付けの個所で頻発した例がある。橋が温度によって伸縮変化をすることが結果的に電線を破断したのである。現在では橋の取り付け部分ではマンホールを設け、伸縮量に対処するようになっている。(つづく)

振動の問題

(1) 振動と安定問題

人間に限らず、犬や猫でも動物は振動に対して本能的な恐怖を抱く。素朴な信仰では大地は、いかなる場合にも不動で、したがってコペルニクスの地動説は許しがたい反社会的な思想であった。現代においても、地球が自転し、ウエグナーの大陸移動説や地殻変動が知識として知られていても、日常生活に関する限り大地は不動のものと考えてよい。すなわち、物体が振動することは、理由のいかんに関らず、特殊な、また異常な現象と考えられている。

振動そのものは概して生理的に好ましくない現象であるから、逆に感覚的には振動に敏感で、安全であるか否かを振動を通して判断していることが多い。石橋をたたくて安全を確認することわざも力学原理に適っている。一般に構造物が安全である時は、荷重が作用すると変形し、荷重を除けば変形が元に戻る。この性質は程度の差こそあれ、構造物が振動する現象の基本的な原理である。変形が元に戻りにくいことは振動数が下がってくると、変形が行きっぱなしになることが破壊につながる。この状態は振動数が0、もしくは振動周期が無限大になったという数学条件で与えられる。振動が標準値よりもゆっくりであれば、危険であると判断して誤りではない。これが石橋をたたき、ということわざの応用である。

橋でもダムでも、およそ土木構造物は静的な荷重を受けるものとして計算され、振動状態を考えて設計されることは少ない。また、振動しやすい構造は剛性が不足していることが多い。いわゆる土木屋さんの設計になるも

・名古屋大学工学部助教授

のは、建築屋、機械屋の設計にくらべると、どうも無骨になる、という笑いはよくある。つまり、それだけ、振動に対する経験が少ない。

世間一般の常識からいうと、大きな橋が振動するということに非常な驚きを示し、「大丈夫なのだろうか」という質問を受けることが多い。これに対する答として、「振動するのは安全の証拠で、振動が止まったら落ちますよ」と話をしている。原理は前に説明したとおりである。

構造物の安定、それも座屈による崩壊は、式の上で座屈条件と、振動の固有振動数が0になる条件とがまったく一致する。この性質を応用して、振動数を計測しながら座屈の試験を行なうことも行なわれる。では、振動を観察しながら工事を進めていき、どの程度の振動数であれば危険と考えたらよいであろうか。この見通しが立てられれば、適切な安全対策に役立てることができる。

この問題は、特に橋りょう架設の中間時期のように、不安定な支持条件になりやすい時、現場で簡単に安全を確認する上で必要になるかも知れない。筆者も末席につらなっている土木学会の架設基準委員会で、振動をどのように採りあげるかの激論が交わされているが、数学的な式の説明を省いて要点を述べると、次のような過程を考えている。

まず振動すること自体は前にも述べたように悪い現象ではない。大切なことはその周期で、周期が長い振動には注意しなければならない。周期が長くなる場合には、一般にタワミが大きくなるから、架設状態で自重によるタワミを計算してみて、そのタワミが25cmないし1mを越えるようなら、なんらかの対策でタワミを抑えるのがよい。数量的に検討してみると、自重によるタワミが25cmで周期が約1秒、1mでは約2秒の値になるのである。

注意しなければならないことは、人間の体感で、振動

しているとわかるが周期約1秒ぐらゐまでで、それより長い周期の振動は現場では感覚的にとらえられない。したがってタワミという最も測定しやすい量で監視するのがよいと考えられるのである。

実のところ、橋りょうの架設工事などで、経験のある技術者は体験的にこれを知っている。しかし、振動は上下方向だけに起こるのではない。1つの盲点は、橋りょうが横方向に相当振動することである。横方向の振動をあたる場合にも、同じように自重を横に作用させてタワミを計算することで先の数値が当てはまる。

筆者は、いままでに多くの橋りょう振動測定を行なってきたが、横方向の水平振動で特に顕著なものは、東名高速道路橋の皆瀬川橋であった。深い谷を越える上路のランガーけたであるが、谷を吹く風に吹かれて、周期1.3秒で振動している。計測している時、最初は間違えたのかと思ったほどである。

一般的に、橋りょうの設計の場合、垂直荷重に対しては念入りに計算するけれども、横方向に関しては簡単に考えやすく、これが盲点となった2、3の失敗を知っている。

まず、第1の例は、支間が20mに満たない2主げたのガーダ橋の架設の時に起こった。この程度の橋では、横構を特に必要としない示方書の規定があったため、主げたの骨組みは要するに目の字の形になっていた。しかし、これがどうにも横方向に不安定で、結局横構をつけて事なきを得た。

もう1つの例は同じく2主げたの合成げた橋で起きている。支間の4等分点に横げたがついているが、横構は支点のパネルにだけつけられ、中間は省略されていた。合成げたの鋼けたの圧縮フランジは、自重によってほとんど許容応力に達するが、コンクリートが硬化するまでの間、上フランジの横方向座目変形を防ぐ注意が必要である。通常、簡単なストラットで上フランジを相互に継いでおけば問題にならない。しかし、この橋は2主げた橋であったことも災いして、ちょうど梯子の棧をいくつもつけたようになって、結果的には何の役にも立たなかった。コンクリート床板の打設がすんで、型わくを外したところ、鋼けたの上フランジが蛇のようにうねっていて大騒動になった。コンクリートが硬化してしまえば問題はなくなるから、後から考えれば、コンクリート打設の時が正に危機一髪の段階にあったことになる。

(2) 振動による疲労

振動そのものは弾性的性質に伴う結果であるから避けられないとしても、振動しやすい、もしくは振動が共振して振幅が増幅されるのは好ましいことではない。その理由は、振動によるくり返し応力が材料の疲労につながるからである。

あらかじめ振動することを見越して、振動による応力増加を設計時に見積ることは、ごく普通に行なわれる。橋りょうにおいては移動荷重に乗ずる衝撃率がこの要素を与えている。どの程度の値を定めるべきかについては多くの議論のあるところであるが、現行の考え方は、タワミの制限と密接な関連があって、大きな橋りょうでは相対的に小さな衝撃率となっている。

ところで、振動による疲労の影響をまったく考えていないのに、結果的に振動の作用が構造物に悪影響を及ぼす例がいくつか知られている。代表的なものはトラスの弦材に生じた、トラス構造物の初期には、理論と実物とを一致させるように、多くのピントラス構造が作られた。しかし、ピン構造そのものが機械的にガタがきやすく、ターンバックルのような細長い引張り材は振動しやすく、交通のたびに騒音を発し、耐久性に劣るために現在ではほとんど使われなくなった。

比較的最近の事例としては、いわゆるニールセンアーチ橋と呼ばれるものつり材に振動疲労が多発した。この形式は、下路のアーチの一種であるが、垂直材や斜材の応力がほとんど引張り応力になることから、長さの長い引張り材として円形のパイプ断面が美観を理由として用いられることが多かった。ところが、このつり材は橋の完成時から、風を受けると振動することが目立った。ある責任者からのまた聞きであるが、橋のペンキを塗っていたペンキ工が、橋の路面に落とすつり材の影が大きく揺れるのを見て、橋が落橋すると感嘆して逃げ出した、という話がある。振動の影響はつり材のガセットに疲労が集中し、橋が落橋寸前にまで追い込まれたことがある。

建物においても、同様の事例は少なくない。アメリカのある空港ビルの屋上に、装飾用のアーチリブを建設したところ、風が吹く度に中央に節点のある振動を生じ、疲労で取りつけが破壊されてしまった。日本では東京オリンピックの建物として有名な日本武道館は、つり屋根構造が災いして振動しやすく、維持補修に問題を残すところとなった。

振動の加振原因として最も多いのが風によるもので、カルマン渦の発生による周期外力である。細長い部材が風に当たるとき、その部材の下流に渦ができる。この渦が周期的に後ろに流されることが、その部材に風と直角方向に周期力を発生する。力そのものは小さいが、この周期力と部材の固有振動数とが共鳴を起こすと振幅が大きくなる。部材断面の形が円形にちかいほどこの影響は大きい。煙突や街路の照明ポスト、電柱などは、風の強い日によく振動を起こす。人工衛星のロケット打ち上げにおいては、ロケット本体が直接風を受けないように、発射用の塔が風上に位置させるような苦心もはらわれている。

さて構造物の部材の設計においては、常識的な設計習慣を守る限り、上述の振動が問題になることは少ない。というのは、部材の設計においては、主要部材、2次部材とともに最大細長化の制限規定があって、応力に余裕があっても、細長い部材を設計させないようになっているからである。先の橋りょうのつり材の疲労は、この観点から眺めれば示方書に沿わない細部構造であったわけである。

構造物の非破壊検査

(1) 直接検査の方法

対象を構造物の力学的安全性に限るとして話を進めれば、安全を確認する最も直接的な方法は、実物による破壊試験が最も望ましい。これは実際問題として新しくつくる構造物では非常に困難である。そこで、古い構造物をとり壊すような機会をとらえて実物試験を行なうことがある。実物の破壊試験は、概して危険を伴うしまた費用も嵩むから、高いレベルでの政治的、技術的な決断を必要とする。日本で行なわれた実物試験では、鉄道橋プレートガーダの載荷試験が昭和24年7月(1949)に行なわれている。おそらく実物試験の記録として最も古いほうであるから特筆してもよい。

フレシネ方式のプレストレストけたの実物載荷試験は、1952年4月、イギリスで行なわれたものが最初である。この当時は、年代的にまだプレストレストけたの経験が浅かった時期でもあるので、その後の設計の進歩向上に非常に有益であったといわれている。

航空機の実物試験として有名なものは、イギリスのコメット機の空中爆発事故(1954)を調査することに関連して行なわれた疲労試験(1955年9月)である。実物の客席がすっぽりと収納される水槽を使って、実際の飛行状態になる圧力差を機体に加え、オイルジャッキなどで飛行中の荷重を翼に作用させる大掛りなものであった。この試験に関連して開発された試験機や計測機器には、現在われわれが研究に応用しているストレインメータの多点記録計や動電形の振動加振機がある。

実物試験は、よく計画された場合にはきわめて効果があるが、どうしても費用が嵩む。したがって、なるべく模形などによる試験を開発する必要があるが、同時に、実物の非破壊検査の方法を研究することが望まれる。

実験方法や計測技術が急速に進歩したのは1950年代であって、この背景には前述のコメット機の事故調査に関連した研究が大いに役立っている。第2次大戦後、巨大ダムの建設が相つしたが、この理論的、技術的裏づけに重要な役割を果たしたものが模形試験による解析であった。いずれにしても日本の技術情報のほとんどすべては

海外の知識の輸入か焼き直しであると思ってよい。

実物を破壊するまで荷重を加えなくとも、実際の構造物で設計荷重もしくはその1.2倍(この値は別に根拠のあるものではないが)を試験的に作用させ、異常がないことを確認して使用する、という習慣を育てるのがよい。海外の橋りょう工事で、完成引渡しの条件に上述の荷重テストをすることが義務づけられた例があると聞いている。普通の工事現場でも、たとえば足場板の安全を確認するため、あり合わせの荷重で試してみればよいし、安全ネットや命綱などは人の重さに見合った重さで試すのが最善である。

作家井上靖の小説「氷壁」は、ナイロンザイルの安全性がからんだ小説で有名であるが、岩角に当たっている箇所が衝撃的な力を受けると簡単に切れる、という実験事実があったことで一時大問題になった。これはザイルの使い方の知識に関連することであるが、試験室で得られる強度や安全が必ずしも実用の段階にすべて当てはまらないという例に出される。

理想化された実験室での研究が現場の状況と異なることによる破壊の例に高張力ボルトのおくれ破壊がある。高張力鋼、それも特に強度の高い材質を使った高張力ボルトの耐荷力は、設備のよい大学の研究室で行なわれた際には非常に良好な結果が得られていたが、実用の段階で破損が相ついだ。

小さな部材、たとえば、大量生産もしくは規格生産されるプレハブの部材などの強度を確認するには、適当な数の抜き取り検査の費用をあらかじめ見積っておくのがよい。仮に、どのように高度の理論で安全が保証されていても実物試験のほうが具体的で信頼がおける。ただし、前に述べたように、実験を無定見に行なうのもよくないし、また実験が危険を伴う場合に注意が必要である。そして、安全であるという判断を下すのは、最終的には経験のある技術者であることも忘れてはならない。筆者を始めとして、現場知識に乏しい大学の先生が、安全についてもっともらしい理論を振り廻すことを鵜のみにしてもらっては困る。このような説はたとえていえば、自動車の運転免許もないくせに自動車の運転方法、という書物を出すようなもの、と考えていただくのがよい。

(2) 間接検査の方法

計画の段階にある構造物、建設途中の構造物もしくは直接の設計荷重を作用させることができない場合、たとえば、地震荷重、風荷重は実用上作用させ難い、このような場合、何かの方法で安全性を確認したい。このための検査方法が広い意味での間接検査であるが、理論的な解析による推論も含まれると考えてよい。しかし普通には材料試験、モデル試験および非破壊検査が重要である。

鉄筋の引張り試験、コンクリートの標準試験などは、

いわば構造物の部分の抜き取り検査に相当するもので、検査の値が規格値にはいつていることで構造物の安全性を間接的に検査することになる。材料よりもやや寸法の大きい柱やはりはどの部材もしくは部分的な構造要素を破壊実験することも間接的な検査である。

モデル試験は、実物と相似の性質があるという裏づけのもとに、実物試験で不可能な状態を試験するのに使用される。これには大別すると、模形などによるものと理論的な数学モデルによるものがある。理論解析は、いわば数学モデルを使う試験と考えられるが、実物との相似性を無視して理論に走り過ぎることも多い。模形を使用する試験にも種々あるが、橋の力学模形による試験、風洞や水槽を使う流体力学的な試験、光弾性材料による試験などが代表的なものである。

模形を使って実験したことが、構造物の建設に着手する前に未然に危険を防げた例に神奈川県の白鳥橋の建設がある。

この橋は本邦最初の曲線橋として架設されたものである。工場で鋼げたの製作が完了し、現地に輸送する段階になっていたが、念のため模形を使って荷重試験をした。筆者の学友、東北大学の倉西君がこの試験をやったのであるが今でもその時の情景が目に浮ぶ。実験した結果が影響線の符号が逆に出るので頭を抱えた。

調べてみると、参考にしたドイツの文献の式が誤っていて、モーメント図とモーメントの影響線とが取り違え

てあった。普通の橋では大事件にならないが、曲線橋ではたいへんである。このままでは、実際の橋は剛性の不足で架設すらできないとわかって急拠フランジに補強の断面を追加した。もちろん、この橋は架設後、実荷重による応力測定で安全が確かめられている。

ダム、長大吊橋、超高層建築のような大きな構造物の建設が可能になった背景には、さきに述べたように模形を使う相似実験の進歩とともに理論解析方法や計算技術の進歩が大いに役立っている。とくにここ 10 年間は電子計算機利用の普及が計算法、解析法を飛躍的に向上させることになった。これは非常に有意義なことであるが、模形を使う実験や測定技術の開発がチグハグになっていて、この方面の研究開発は決定的に遅れをとっている。

数学モデルによる解析がどのように精密であったとしても、その結果はあくまでもモデルについての性質であって、それが実物の性質と必ずしも相似ではない。相似性がどこまで正しいかの裏づけは原則として実物による測定によるが、少なくとも簡単な力学模形に応用したものででも確かめる必要がある。つまり、理論解析の進歩は実際の測定技術の進歩と釣合いがとれていないと困る。

(つづく)

(次号 (3) 構造物の応力測定の手法
(4) 構造物の健康診断—振動測定への応用
をもって完と致します)

構造物の非破壊検査

- (1) 直接検査の方法 } (前号)
(2) 間接検査の方法 }

(3) 構造物の応力測定の手法

実際の構造物が、どのような応力状態になっているかを知りたい希望は、構造物の設計者に限らず、現場の技術者はかなり真剣に考えているものである。応力そのものを直接に計測することはできないので、応力が作用したことによって生じたひずみや変形を計測して間接的に応力を知ることが普通の意味では応力測定と呼ばれている。この際、計測されたひずみや変形から、作用している応力を正しく推定するのに十分な注意が必要であるが、そのことを除けば、応力測定の重要な課題は測定の技術にある。

測定を専門とする研究者や、それを職業とする会社も多いが、専門的な詳しい議論を抜きにして、測定に対する一般的な注意を述べておきたい。それは原則として、相対的な比較の不可能な測定を計画してはならない、ということである。説明を加えると、理論的もしくは感覚的に、この程度の応力や変形が出るだろう、という予想値があって、実測された値と比較できることが測定に価値を持つ。

相対的に比較が可能であるためには、誰でも簡単に測定できるような合理化、標準化も望ましい。また計測機器の普及も必要である。現在、建設現場でごく普通に使用されている測量機器は非常に精度のよいものの代表である。費用のかかる応力測定を始める前に、たわみの測定を測量機器を使ってやるほうがずっと効果的であることが少なくない。つまり、どこでも使えるという意味で

• 名古屋大学工学部助教授

は、測量機器をもっと見直してよい。

応力測定方法として普通に使われるものは、ケルビンの法則を応用した抵抗線ひずみ計である。電気の抵抗線がひずみを受けると、抵抗値の変化がひずみに比例するという原理を応用したもので、応力測定といえばほとんどこの抵抗線ひずみ計を応用したものを指すようになった。ダムや土圧の測定に使用するカールソンメータもこの応用である。抵抗線ひずみ計は第2次大戦後急速に発達したが、この計器の利点の最大のものは、多くの点数の応力測定が1台の計測器で可能であるため、1測定点あたりのコストが安価につくことにある。

電気的な計測器のほかに、従来から機械的なひずみ計がある。このほうは、いわば精密機械に類するので、1点、つまり1応力測定に1台の装置が必要になり、コストの面から抵抗線ひずみ計の普及には遠く及ばない。しかし、コンタクト形の機械的ひずみ計は、多少の熟練も必要ではあるが、多点のひずみ測定に効果的である。

土木構造物の応力測定には、もっと種々の計測を応用する必要があるが、建設現場で使用する特殊性を考えて、むやみに高度の計測を計画しても失敗する。応力測定とは多少異なるが、最近各方面で問題になっている騒音測定において、騒音計が広く使われているが、この機器の普及の背景を簡単に説明しておきたい。

騒音の表示方法に、何ホンという表現が使われている。騒音測定器の原理は至って簡単なもので、マイクを使って音を集め、これを電気信号に変えてメータで読み取る、というものである。しかし、音を電気信号に変える場合、人間の耳に聞える音の強弱の感覚が周波数によって変るから、これを補正してあり、メータに示す場合の、難しくいえば時定数が規格化されている。標準化、規格化の背景には非常に多くの研究があるが、難しい論議を抜きにして、実用化という点で妥協がある。この標準化によってどのような利点があるかという点、騒音測

定器の規格が揃ったこと、価格も安価になり、多くの測定利用者が手軽に使えること、その結果、豊富なデータが得られること、そして相互比較が可能になったこと、という利点を生んでいる。

もし騒音測定を研究レベルで行なうならば、単独で精度がよくても、客観的で普遍性のあるデータにはなり得ない。公害振動の計測においては、未だ騒音測定のような客観的な尺度に相当する計測技法が定められていない。このことは恐らく建設工事現場でも判断のより所がないことで困っていると思われる。つまり、何でも高度の測定が良いのではなく、平たくいえば、大衆化する測定方法も大切である。

重要な構造物、たとえば、ダムや長大橋りょうではあらかじめ施工中から完成後も引続いて、応力測定や気象その他の観測を計画することがある。このためには、測定機器の保守管理やデータの採取保存について人員や予算を必要とするから、かなり綿密な計画を考えておかないと失敗する。最近の計器の進歩は非常に速いから、数年たつて故障した計器を修理したい時、部品の補充が不可能であったり、製作会社が倒産していたりする危険がある。測定そのものの信頼性を上げるには、なるべく最新の技術を取り入れる必要があるが、これはまだ歴史の試練を受けていない危険がある、という矛盾を抱えているので、この判断は非常に難しい。筆者が調査の機会に恵まれたあるダムの応力測定機器は良く計画された工夫の跡が見られるけれども、測定の基本的な考え方が未熟であった。たとえば、電線を測定点の所まで引き出す線がシールドされていないため、せっかくのデータがどうも怪しいという悲しむべき計画を見たことがある。

(4) 構造物の健康診断 - 振動測定の応用

この講座の最後をまとめるにあたって、構造物が健全であるか否かの、いわば健康診断をどのようにすればよいかの1つの方法について説明しておきたい。構造物を人間に例えた場合、怪我は外から見える事故であるから誰でも異常の判断ができる。しかし、内臓に異常があるのは、内部を開いて見るわけにはいかない。つまり、何かの間接的な方法で検査するしかない。医者が聴診器を耳に当てて、指で叩いて調べるのは基本的な診察であるが、経験のある医者は、患者の外見を判断すると加えて、かなり正しい情報を得ることができる。

構造物の健康診断においても同様の方法が実用できるのではないか。この考え方に立つと、筆者はあらゆる機会に構造物の振動を計測してきた。振動を計ったぐらいで、何がわかるのですか、という質問を受けるが、どうもわかりやすい説明を差し上げるのに困って、いつも医者聴診器の話でお茶を濁してしまう。

人間の耳は非常に高感度の情報処理機能を持ってい

て、電話の声を聞いて誰かをいい当てることもできるし、音源の遠近感や左右上下の位置を知ることもできる。しかし、感覚的には理解できても、定量的に表現できにくいことも多い。音の性質をオシログラムやスペクトルに現わすのはいわば定量化した表現方法である。最近では声紋という表現方法がでてきて、発声の特徴を識別する手法が、犯罪調査に応用されている。

構造物の振動も、測定や解析の手法が開発されれば、いろいろなことがわかるかも知れない。このためには、なるべくたくさんの構造物の振動を計って、それぞれのオシログラムやスペクトルを求める分析とともに、相互に比較したり、場合によっては、もっと高級な分析をして見る必要がある。

着想は上に述べたとおりであるが、具体的な実行となると計測機器や解析処理機器が高額になるので、少ない予算で効率的に行なう方法を悪戦苦闘して工夫している。

振動のデータを高次の処理に回すには、電子計算機の利用を前提にしなければならない。1950年代までは、振動の記録は一度オシログラフに直接描き出され、このグラフにスケールを当てて、波形値を読み取って数値化する、という極めて労力の多い方法を取っていた。誰でも考えるように、このグラフを電氣的に自動読み取りをしたいと計画し、科学研究費などを投入してある大企業に試作をお願いした。成果はみじめなもので、日本の企業の底の浅さを思い知らされることになった。波形読み取りというのは、いま流行のパターン認識の基礎的なものであって、もし、その時から研究を積み重ねていけば、アメリカに遅れを取ることもなかった、いわば先駆的な課題でもあったのである。

たまたま、その頃チ100号事件というニセ千円札事件があった。ご記憶の方も多いと思うが、これに手を焼いた日本銀行が、各企業に、ニセ札発見機ができないものか、と相談を持ちかけたことがあった。多くの企業は、いうなれば全然話相手になろうとしなかった。ところが、ある企業が物好きにも、この研究に食いついた。その結果が何になったと思われますか。駅の改札口にある千円札の両替機、これがニセ札発見器でもあるのです。しかし、原理的なものは波形読み取りと変りはないのである。

最近、地図や図形の読み取りであるデジタイザーというのが測量会社などにはいるようになった。これは何のことではない、波形読み取り機として使用できるものなのである。筆者はこの十数年波形処理に執念を燃やしているが、結果的には何も得られなかった。そこで、波形読み取り機を省略して、振動のデータを直接電気信号で記録するレコーダを考えた。これは多くの研究者の要望があったことも幸いして、カタログ商品が出るようになったが、

それも 1960 年の始め頃から市場に出るようになった。いわゆるデータレコーダである。

しかし、このレコーダがあっても、データの解析には普通の人海戦術しか処理の方法がなく、次の段階として、振動データを記録したデータレコーダから、電子計算機に直接データを送り込む所がネックになってきた。また、これが解決されれば、結果が沢山であるが、今度はその整理が大変なことになり、報告書の自動作製も同時に考えねばならなくなった。そして、これはコンピュータを主軸に考えた非常に機能的なシステムが必要になるのであるが、残念ながら筆者の所では、アイデアだけで物は実現していない。

構造物の健康診断の話がだいぶ脱線したが、要するに振動データを処理することで有意義なデータを得たいと思う計画には、相当のお道具立てが必要であって、将来もっと発展の余地が残っているということである。筆者がいままでに測量した事例の中からでも、興味ある結果が幾つか見つかっている。それを幾つか選んで参考したい。

まず、最も初歩的な分析として、振動のデータを波形に描いて、これを眺める。原始的なようであるが、波形にも百面相があって、人相判断のようなことができる。しかし、筆者が普通に行っている方法は、ある場所の振動の、3方向の成分を並べて観察する。上下方向の振動、それと水平方向の振動を互いに直角方向に記録するのである。橋りょう構造物では3つの主軸方向があるので、その方向に向きを合わせて記録する。

興味のあることに、3つの方向の振動の性質は全部違うことが多いのである。上下方向の振動、つまりたわみ振動であるが、これは構造設計と密接に関連するので、理論計算の推測値と大体において狂ったことはない。しかし、橋軸方向の振動や、橋の横方向の振動は測定しないと何が出てくるかわからないという意味で面白い。

東名高速道路橋の皆瀬川橋は上路のランガーゲたであるが、この橋は谷風を受けて橋軸直角方向に、周期1, 3秒で揺れている。測定の時、計器が故障したか、結線を誤ったか、と錯覚したぐらいである。おまけに、橋は縦断こう配があるせいか、橋軸方向の振動を比較して見ると、こう配の下側の振動の大きさが大きい。つまり下に向かって突っ込むのである。筆者が測定したのは橋の完成後であるが、これらのデータから、この橋は建設作業の時に振動などで大変だったろうと想像したし、また、設計も基本的には対傾構の剛度不足という欠点を持つと考えた。このことは、ごく最近になって、建設の現場経験者に尋ねて得られた話と一致した。振動測定で、これぐらいのことはわかる。

小さな橋で、比較的橋脚の高いものは、コンクリート橋脚に可動支点がついていても橋軸方向に揺れる。しか

し、普通の橋脚では滅多に道路に直角方向には揺れない。ところが、筆者が測定したある橋のアバットは横に揺れるのである。そのアバットの場所は山の中腹の、傾斜の急な溪流を越える場所にあったが、アバットの基礎工事は確かに困難な場所にあった。しかし振動の大きさは度が過ぎていた。恐らく基礎工事が不良であるか、もしくは基礎の岩盤に問題があるにちがいない。大雨の時に山崩れを起こすとすれば、そのアバット付近であろう。というのが筆者の診断であった。

振動の波形を眺めるだけでなく、もう少し高次の処理をするのに、相関分析とスペクトル分析とがある。この解析は統計処理であるので、数値計算をするとなると非常に労力を伴うが、最近は便利な装置も出回るようになったし、電子計算機の利用で、実用の段階にはいつている。難しい論議は抜くが、この解析方法のおかげで、振動測定の方法がずっと容易になったし、また手軽にできるようになってきた。従来、構造物の振動を測定する、となると大変な準備が必要であった。橋では交通止めをしたり、起振機を作用させたりした。大きな構造物では人為的な加振ができないので、地震による起振を辛抱強く待たねばならない。

筆者が行っている振動測定は、測定の依頼者側から見るとずいぶん人を喰ったやり方であって、テープレコーダと振動計を持って行って、現場で30分ぐらidataを記録して、ハイサヨナラである。橋の測定では、交通止めもなにもしない。筆者の大学の学生達に、テレビ塔の振動を測定にやらせたことがある。風体の良くないのが、何か変なものを持ってゴソゴソしていれば、守衛に見つからないほうがどうかしている。守衛に叱られて退散するまでにデータのほうはいただいていた。

測定されたデータは、素人目には使いものにならない。しかし、これを分析すると固有振動周期、減衰率などは簡単に求められる。橋の新旧の程度は判別がつく。多少解析に手間は食うが、地盤の卓越周期も解析で出てくる。いままでに得られたものとしては、東名高速道路浜名湖橋、および利根川下流の小見川町にある小見川橋のように、厚い沖積地上にある橋りょうでは、地盤の卓越周期に約3秒の長い周期性のものが見つかっている。

完成後、あまり日数の立っていないアーチダムを、約半年の間を置いて振動を計ってみたところ、コンクリートのヤング率その間に高くなってきて振動数の上昇が認められた例もある。つまり、その間にコンクリートの強度が増進していると判断することができた。

非常に古い構造物で、測定の目的でさえも近寄れないような鉄筋コンクリート製の高煙突を計測したこともある。煙突の振動を測定するには、ある程度の高さに振動計を備えつける必要があるが、10mの高さですら昇る手掛りはなかった。この場合には基礎の所に振動計をお

いて、電氣的に波形を増幅して記録する手を使い、煙突の振動は風まかせて、小一時間の測定期間は日向ぼっこをしていた。解析してみると幾つかの固有振動数が分離できて、この分では未だ大丈夫だという結論に役立った。

地盤の振動も機会があるごとにデータを取っている。この測定は基礎工事でくい打ちをやっている時が最も良いデータが得られる。地盤の柱状図を参照できると、くい打ちに伴う公害振動の予測が可能になる。いままでに測定したくい打ち時の、くいそのものの振動の性質や、地盤の振動の性質を見ると、くいの支持力が大きくなって、打ち止めをして良いと判断するのに振動の性質を利用する方法も考えられなくもない。その根拠は、たとえば木材に釘を打ち込む時の手ごたえで釘のききめを感覚的にとらえているのを、定量的な計測に置きかえるのと似ている。

構造物の振動を計測しようとするとき、技術的に非常に困難な問題の1つに、非常にゆっくりとした振動を知りたいことがある。人間の感覚では、周期が2秒を越えるゆっくりとした振動をとらえることができにくい。長大つり橋や超高層ビルの振動には、周期の長いものが多くなってきている。周期が非常に長くなると、構造物は不安定になり崩壊したり座屈したりする。橋りょうの架

設段階においては、不安定な支持条件になっていて、假して周期の長い振動が現れやすい。周期が2秒を越えると、揺れているという体感がなくなり、崩壊寸前になっていても気がつかないことがある。したがって、振動、それも長周期の振動を簡単に計測できる装置をモニター機器に使用して、周期が伸びる兆候が現れたら、それなりの対策を立てる、という方法は開発の価値があろう。実は、以前ダムのゲートの崩壊事故を調査したことがあるが、水位を上げて水圧が加わってくる刻々に、もし振動が計測されていれば、崩壊になる前に予知ができたであろうと考えたことが1つのヒントになっている。

最後に、筆者の最近の研究成果の一部として、図-1のグラフを紹介しておきたい。これは構造物の健康診断をして、その結果を声紋のような形にグラフ化したものの一例である。縦軸は時間の経過で、上から下に現象が移っている。横軸はスペクトルになっていて、時間の変移によるスペクトルの変化がグラフ化されている。これは、ある橋りょうの振動解析の一例であるが、1次から5次までの振動が明瞭にわかる。判定の方法については省略するが、健全な構造物であると判定されるものの一例である。

この記事の完結にあたって

筆者の研究の目標は、実在構造物を調査して、その健康状態を何で判断するか、ということにある。この安全の判定は非常に微妙な問題を数多く含み、純粋な学問上の問題だけにとじこめることはできない。このことは、この講座の最初の出だしのように、そもそも安全とは何か、ということから固めて行く必要があった。

実際の構造物の破壊事例は非常に多く、これを並べただけでも教訓になる。しかし、もう一步進めて、安全の達成にどう対処すべきかの研究が必要になる。最初の子定では、個々の事例について教訓を引き出そうと試みたが、話が散漫になってしまった。

この橋の記事に対して、多くの方からお手紙をいただいた。貴重な資料を提供して下さった方もある。末尾になったが、ここに記して感謝の意を表したい。また、土木施工の貴重なページの一部を長い間独占して来たことについて、編集委員会のご好意に感謝したい。(完)

付録 事故災害年表 (労働省産業安全研究所 駒宮功額氏による)

BC	
4650	ピラミッドの崩壊 (エジプト)
1700	ダム建設 (アラビア)
↓	
300	アラビアのダム崩壊
AC	
778	遣唐使船5回のうち2回遭難 (日本)
1000	火球現わる (火薬の原形) (中国)

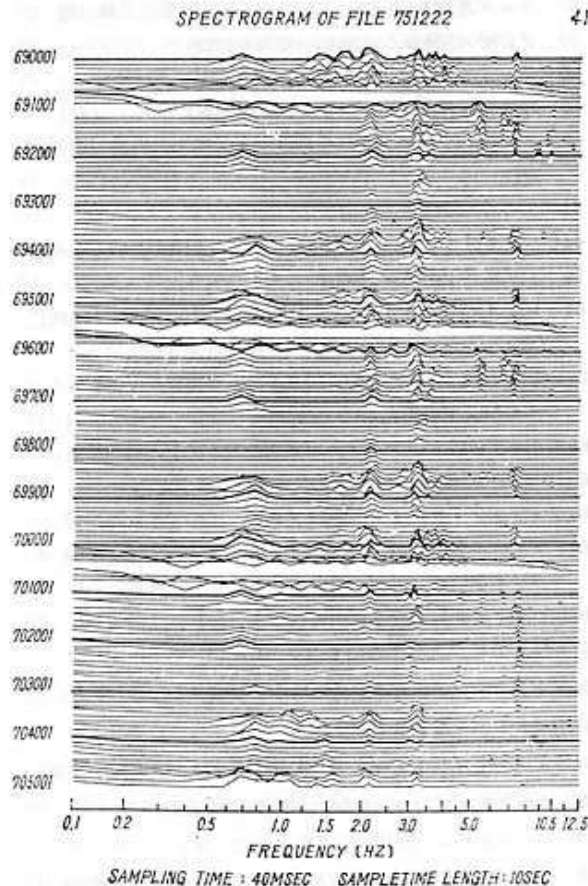


図-1

- 1212 ロンドン大火
- 1500 京都大火
- 1612 炭坑内ガス焼死の記録 (英)
- 27 鉱山で採鉱発破行なわれる (ハンガリー)
- 66 ロンドン大火
- 70 よろけ (珪肺症) の記録
- 73 ブラント, 黄リン発見
- 75 北ウェールズ・モスチン炭坑爆発 (英) 初の学会報告記録か
- 1700 よろけ (珪肺病) の記録 (日本)
- 炭坑 200 フィート以上に掘り下げられファイヤーマンが存在していた
- 30 炭坑二つの堅坑を掘り一方に燃えている石炭籠を下げ熱気流を換気に利用 (英)
- 30 火打ハガネ (Steel mill) 安全な坑内灯火として採用 (英)
- 50 (ごろ) 石炭産業確立 (ヨーロッパ)
- 52 フランクリン避雷針発明
- 53 リッチマン, フランクリンと同じような実験で雷により電撃死 (日), 遺体研究により電撃作用明らかとなる
- 60 ロイド船名録を作り危険度判断資料とする (英)
- 63 炭坑内運搬に馬を利用 (英)
- 65 ニューコメンらのポンプが炭坑で 100 台動いていた (英)
- 69 キュニョの蒸気自動車 (仏)
- 76 ワット初の蒸気機関二基運転 (英)
- 83 ロジェ熱気球で滞空に成功 (仏)
- 85 ベルトレ塩素を漂白に利用 (仏)
- 85 ロバイン大学ガス灯照明 (べ)
- 85 ウォールセンド炭坑爆発, 原因スチルミルと推定 (英)
- 86 酸素欠乏の最初の文献現われる
- 86 ベルトレ KClO₂ 発見, 火薬への応用は失敗 (仏)
- 89 坑内に車輪付トロッコ实用 (英)
- 93 シャップの腕木鉄道信号機
- 99 ルボンの石炭ガス
- 1800 トレビシックの高圧蒸気機関 (英)
- 02 ブェンテス重力ダム崩壊 680 名死亡
- 03 トレビシック蒸気機関グリニッチで爆発 (英)
- 04 トレビシック鉄道用機関車 (英)
- 06 綿紡工場ガス照明開始 (英)
- 07 ヘバーン炭坑内換気
- 07 蒸気船クレルモン (クラモント) 号, ハドソン川を航行 (米)
- 10 ジョーン・ベッドル (英) 坑内換気に隔壁法を案出
- 12 機械破壊運動激化 (英)
- 12 炭坑爆発ひん発 (英)
- 12 スチーブソン蒸気力で石炭を斜坑から搬出 (英)
- 13 炭坑変災予防会サンダーランドに設置 (英)
- 15 ウォールセンド炭坑爆発 102 名死亡
- 38 グレード・ウェスタン号大西洋定期横断運航 (英)
- 39 少年労働禁止, 成人 10 時間労働制 (プロイセン)
- 39 ナズミスの蒸気ハンマー (英)
- 39 1817 年~1839 年ボイラー爆発 13 件, 73 名死亡 (英)
- 40 アレキサンドリヤとナイル河西側を結ぶ運河完成, 15 000 名死亡
- 1840 (ごろ) 炭坑のみ 1 400 名死亡/年
- 40 (ごろ) ハットン・グレゴリ腕木信号機を鉄道に導入
- 42 シャフッペリ炭坑条令 (英)
- 43 ソラのアーチダム (仏), 女子の背中で石炭運搬を中止 (英)
- 43 ブルユネルのテムズ川トンネル開通 (シールド工法) 24 年間開始途中 8 年間工事中止 6 名以上死亡 (英)
- 43 マンチェスター市ベルト事故 962 名死亡/年 (英)
- 45 シェンバイン (スイス) ニトロセルローズ発明 (独) → 1875
- 46 エーテル麻醉法確立 (米) → 1930
- 46 ソブレロ, ニトログリセリン発明 (伊)
- 46 ニトロセルローズ製造研究, 事故多く中止 (仏)
- 47 ニトロセルローズ爆発事故 21 名死亡 → 1854
- 48 1816 年~1848 年米水域での船舶ボイラ 233 基以上爆発, 2 563 名死亡, 2 067 名負傷 (米)
- 53 鉄道事故 103 件 (英)
- 54 ゲスナー灯油を製造 (米)
- 54 ニトロセルローズ製造中止 (英) → 1847 (ロ, 仏も事故ひん発でニトロセルローズの安定化失敗)
- 55 検査と保護のための「ボイラ破裂防止と蒸気の経済的発生及び使用のための協会」発足 (英)
- 57 全ヨーロッパ気象通報に電信を用いる
- 57 オーティスの安全エレベーター (米)
- 58 アーク灯セント・フォ・ブランド灯台 (英)
- 59 スエズ運河着工 → 69
- 59 プンゼン Mg セン光撮影 → 1931 → 1928
- 60 ニューボートのリスカ炭坑 145 名死亡 (英)
- 60 列車通票方式 (タブレット) 採用 (英)
- 62 ノーベル, ストックホルム郊外ヘレネボルグに NG 工場建設
- 64 ノーベル雷汞雷管発明 (ス)
- 64 ヘレネボルグ NG 工場爆発, ノーベル弟を含め 5 名死亡
- 64 トリクロルエチレン発明
- 61 シェフィール市ディル・ダイク貯水池ダム決壊 244 名死亡 (英)
- 65 赤旗法成立 (英) → 1896. HCl ガス放散禁止 (英). ノーベル NG 工場爆発
- 65 サルタナ号ミシシッピー川爆発沈没 3 450 名死亡 (米)
- 65 1859 年~1865 年 322 台ボイラ爆発 544 名死亡
- 66 フェラン・アーチダム完成 (ヨ)
- 66 アーベル NC の安定化に成功, ノーベル珪そう土ダイナマイト発明
- 66 オークス炭坑爆発 361 名死亡
- 66 NG 70 箱が入渠中の船で爆発 70 名死亡 (パナマ)
- 66 サンフランシスコ連達馬車の NG 爆発 15 名死亡 (米)
- 67 バストウール低温殺菌法発見
- 67 ロンダ溪谷のファーンデル炭坑爆発事故 178 名死亡 (英)
- 68 ウェスチングハウス空気ブレーキ発明 (米)
- 69 ペンシルバニア炭坑火災 179 名死亡 (米)
- 69 スエズ運河開通工事 11 年間に 11 万人死亡 (1 日 40 名で総数不明ともいわれている)

- 1869 パークス、セルロイド発明(英)
- 69 ハウセット、セルロイド発明(米)
- 70 消防ポンプ輸入(日)
- 70 (頃) 炭坑爆発防止のため爆発温度の低い火薬の研究が要望される
- 71 シカゴ大火
- 72 国鉄開業日に見物人ひかれる(鉄道事故第1号)(日)
- 72 鉄道信号用閉電路式軌道回路発明(米)
- 73 リンデ圧縮アンモニア冷凍機発明(独)→1931. 73~76年
ニューヨーク州9台の実用ボイラー破壊実験実施される(米)
- 74 工場特別検査法令(仏)
- 75 高島炭坑ガス爆発40名死亡、38名負傷(日)
- 75 ヤビン炭坑爆発186名死亡(仏)
- 75 ティナンジェ 7924m 気球で上昇(酸素欠乏のため3名中彼のみ生き残る)
- 75 ラーゲルンダ列車衝突から色盲発見(ス)、ノーベル膠質ダイナマイト発明(ス)
- 75 ラン炭坑で爆発(炭じん)17名死亡→78
- 77 初の炭坑爆発会議仏で開かれる
- 77 マサチューセッツ州、危険な機械にガードする法令(米)
- 78 鉱山監督官ガロウエー炭じん爆発談を発表(英)(75年の事故調査から)
- 78 ミネアポリス小麦粉爆発18名死亡(米)
- 79 テー河鉄橋風のため崩壊列車転落90名死亡
- 79 設計風圧が定められるようになる(英)
- 79 ハスキン、ハドソン川川底トンネル工事開始(米)
- 79 宮城・関山トンネル工事中火薬爆発13名死亡10名負傷(日)
- 80 (頃) 炭坑内で電気機器使用されはじめる
- 81 パナマ運河着工
- 83 ブルックリン橋完成20名死亡(米)
- 83 タンカーグリュックアウフ号完成
- 84 パージニア州ボカホンタス炭坑炭じん爆発、入坑者全員141名死亡
- 85 ローヴァー安全自転車
- 85 セルロイド写真フィルム、イーストマン社(米)
- 86 E・トムソン電気溶接法発明(米)
- 86 船尾に機関室をもつタンカー建造(英)
- 86 ニューヨーク・ロングアイランド給水塔水圧テスト中脆性破壊(米)
- 87 横浜市消火栓設置(日)
- 88 トーマス・フレッチャー酸素槍(酸素切断)発表(英)
- 88 火災保険創設(会社も消防設備をもっていたが1909年廃止)
- 88 ノーベル・ダブルベース無煙火薬を完成
- 89 ペンシルベニア・ジョンストン・アースダム崩壊4000名死亡(米)
- 90 (頃) 吹米で高気圧治療法行なわれる→1830. 鉄筋ビル完成(米)
- 91 議事堂漏電火災説(電灯→ガス灯へ)(日)
- 92 イエナ強化ガラス(ゲージグラス等小物)工業化成功(独)
- 1893 1891年~93年鉄道員2647名死亡(米)
- 93 エジソン映画発明(米)
- 93 鉄道・自動連結器と空気ブレーキ設置義務(米)
- 93 安全灯(デリー型)を輸入(日)
- 94 タンカー爆発あいつぎスエズ運河航行禁止
- 94 ザール・カンブハウゼン炭坑炭じん爆発181名死亡(独)
- 95 プーシダム崩壊、基礎滑動のため100~400死亡(仏)
- 95 ロンドン、酸素ボンベ爆発多数死亡(英)、鉄道電化(米)
- 96 「赤旗法」廃止→1865(英)、ベクレル放射線発見
- 96 クロード・ヘス溶解アセチレン発明(仏)
- 96 ベルリン、パリ、ニューヘブン液体アセチレン爆発、このため製造禁止
- 96 オスカー・カールソン過塩素爆薬発明
- 97 10HP 飛行船爆発2名死亡
- 97 ディーゼル機関生産(ド)
- 98 液体酸素爆薬シンプロントトンネル工事に使用
- 98 キュリー夫妻ラジウム発見(仏)
- 99 豊国炭坑爆発210名死亡(日)
- 99 サッカルド・サンゴタルトンネルに換気装置(伊)
- 99 アイスター赤リンマッチ発明→1895
- 1900 (頃) 水素ボンベ左ネジ、酸素ボンベ右ネジへ→1895
- 00 ツェベリン飛行船製作(ド)
- 00 マルコニー大西洋横断無線電信着手(伊)
- 01 リカルド酸素、アセチレン吹管発明
- 01 八幡製作所高炉火入れ(日)
- 02 1898~1902年ボイラ爆発1600件1184名死亡(米)
- 02 タンカー火災続出、帆船による輸送も計画されたが失敗
- 02 水の塩素殺菌装置設置(ベ)
- 03 シカゴ、イロコイ劇場火災630名死亡(米)
- 03 ライト兄弟飛行機で滞空に成功(米)
- 04 ニューヨーク、ゼネラルスローカム号(大木造蒸気船)炎上沈没1030名死亡(米)
- 05 マサチューセッツ州靴工場ボイラ爆発火災57名死亡(米)
- 05 安全灯・電灯以外の灯火坑内使用禁止(日)
- 05 水の次亜塩素酸ソーダ殺菌処理(英)
- 06 水のオゾン殺菌装置(仏)
- 06 クーリエー炭じん爆発1099名死亡(仏)
- 06 高嶋炭坑爆発307名死亡(日)
- 07 モノガン炭坑、炭じん爆発359名死亡(米)
- 07 ケベック槍崩壊82名死亡(加)→1917
- 07 豊国炭坑爆発360名死亡(日)
- 07 スエズ運河タンカー航行禁止解除(ベントライン設置)
- 08 ラトボルト炭坑爆発334名死亡(ド)
- 09 イーストリバートンネル工事ケーソン症で20名死亡、369名患者発生
- 09 工場法案提出、反対のため撤回(日)
- 10 消防自動車輸入(日)
- 10 ハルトン炭坑爆発344名死亡(英)
- 11 工場法公布1916.9施行(日)
- 11 ニューヨークシャツ工場(10階建)火災145名の少女死亡(米)
- 11 オースチンダム基礎滑動で崩壊100名死亡(米)

- 1912 タイタニック号沈没 1517 名死亡 715 名救助
- 12 1911 年～12 年 ボイラ爆発 206 件 43 名死亡 136 名負傷 (英)
- 12 1907 年～12 年動力伝導装置による事故 421 名死亡 (英)
- 12 群馬導火線工場爆発 12 名死亡 (日)
- 12 炭坑爆発続発 (英) (日) 夕張 2 件 483 名死亡 (日)
- 13 石原修「女工と結核」発表 (日)
- 13 1912 年に 2 回の爆発を含め本質安全防爆電気回路開発の動機となる
- 13 ガソリン火災年間 1040 名死亡, 3120 名負傷 (米)
- 14 海上人命安全会議 (タイタニック号事故のためドイツウイヘルム二世発案)
- 14 安全被筒ルメール提案 (ベ)
- 14 方城炭坑 687 名死亡・新夕張炭坑爆発 453 名死亡
- 15 資源技術試験所九州支所安全灯試験場設立, 石炭坑爆発取締規則公布 (日)
- 15 トリクロロエチレン中毒報告される (ド)
- 15 宇和島ナイル号引上げ潜水夫 25 名中 21 名死亡, 水深 60 m
- 16 クインチンヒル列車衝突 227 名死亡, 247 名負傷 (英)
- 16 マンホール爆発損害 50 万ドル (米)
- 17 モダース鉄道事故トンネル付近軍用列車脱線 550 名死亡 (仏)
- 17 ハリファックス火薬貨物船爆発 1500 名死亡, 8000 名負傷 (カ)
- 17 撫順炭坑爆発 917 名死亡 (中)
- 17 資源技術試験場爆発, 試験坑道で実験始める
- 17 ケベック橋完成 (加)→1907
- 19 ホストン糖蜜タンク脆性破壊, 糖蜜の洪水で 21 名死亡 (米)
- 19 アイオワ濃粉の粉の粉じん爆発 43 名死亡, 30 名負傷 (米) →1929
- 20 (頃) 油入変圧器・遮断器爆発火災ひん発 (世界). PCB 開発の動機
- 20 Mcuser 大学テトラニトロメタン爆発 学生 300 名中 7 名死亡, 負傷多数 (ド)
- 21 オッパウ化学工場硫酸 4500 t 大爆発 509 名死亡, 1952 名負傷
- 21 黄リンマッチ製造禁止 (日)
- 22 改良型 Burton 式装置 (高温高压石油分解蒸留) のパルタワー 2 基爆発 20 名死亡 (米)
- 22 GE・Rice 水素冷却発電機 (米)
- 22 四エチル鉛ガソリンアンチハフリ制発見 (米). 圧縮ガス取締法 (日)
- 23 加鉛ガソリン販売さる (米)
- 24 加鉛ガソリンによる四エチル鉛中毒 10 名死亡, 50～60 名中毒…現在は着色されている
- 24 海軍 SS 3 号 (SS 1 号再建→1922) 爆発 5 名死亡 (日). 小樽の駅でダイナマイト爆発 87 名死亡 300 名負傷 (日)
- 25 国鉄自動連結に切換 (日)
- 26 光洋丸 (タンカー) 造船所内でガソリン爆発 13 名死亡 (日) (微量ガス分析器開発の動機)
- 1926 海田市村急脱線転覆 34 名死亡, 39 名負傷 (木製から鋼製客車への動機)
- 26 4 月 8 日・11 日タンカー火災 35 名死亡 25 名負傷 (米)
- 27 グレノレークダム崩壊 100 名死亡 (伊)
- 27 LP ガス付臭制検討 (米)
- 27 飛行船白鳩号墜落 4 名死亡
- 28 セントフランシスダム基礎地盤欠陥で崩壊 205 名死亡 (米)
- 28 北極探検飛行船爆発 6 名死亡 (伊)
- 28 ヨハンネス, オステルマイエル写真用セン光電球 (O₂+Al) 発明 (ド)→1859
- 28 ドライクリーニング安全協会設立 (日)
- 28 Mg による火傷火災の恐れなくなる
- 29 クリーブラント病院 X 線爆発火災 123～125 名死亡 (ガス中毒)
- 29 PCB 開発 Swan clem (米)→1920
- 29 ガス干渉計発明 (微量ガソリンの分析) (日)
- 29 強化ガラス (窓ガラス等大物) 成功 (仏)→1892
- 29 工場危害予防及び衛生規則公布 (日)
- 30 仏上空で R 101 飛行船炎上 48 名死亡 (航空相含む) (英)
- 30 貯水池安全規定 (英)
- 30 PCB 工業化モンサント社 (米)
- 30 エーテル麻酔火災・爆発事故年 100 例→1846
- 30 福岡・耐圧防爆電気器の防爆試験 (日)
- 30 アルスドルフ炭坑爆発 254 名死亡
- 30 鎮海海要港映写中フィルム火災 104 名死亡 (小学生). 年間 40 件, 上映中の火災発生 (日)
- 30 (頃) 難燃生フィルムの開発研究 (米)
- 30 (頃) 安全帽としてカンカン帽が利用される (日)
- 31 神奈川製粉工場小麦粉爆発 12 名死亡, 34 名負傷 (日)
- 31 ドライクリーニング工場火災増加 (日)
- 31 無害な冷媒フロン製造開始 (米)→1873
- 31 写真電球販売される (日)
- 32 シュミット式ニトログリセリン連続硝化装置試運転中爆発 (連続装置の導入欧米より大幅に遅れる) (日)
- 32 白木屋, セルロイドが発火により火災 14 名死亡 21 名負傷 (日)
- 32 全国産業安全大会開かる (日)
- 33 丹那トスネル開通, 工事中 63 名死亡
- 33 海軍酸素魚雷完成 (日) 他国では爆発事故で開発を断念
- 34 Comendatore Donati 14434 m 高度記録を作ったが, ひどい高圧病にかかる (伊)
- 34 オサ・ヴィアヒム N 1 号気球爆発 3 名死亡 (ロ)
- 34 英国客船モロ・キャッスル号ニューヨーク付近で火災 125 名死亡 (英)
- 36 尾去沢笹さいダム決壊 315～362 名死亡 818 名負傷 (日)
- 36 アセチレン溶接取締規則庁令 7 号 9 月 1 日施行 (日)
- 36 高圧ガス協会創立 (日)→1963
- 37 ゼチレングリコール中毒 93 名死亡, 100 名中毒 (米)
- 37 ニューロンドン高校ガス爆発 294 名死亡 (米)
- 37 ヒンデンベルグ号ニューヨークで炎上 35 名死亡 (ド)
- 37 麻酔学会 230 件の火災・爆発事故 (36 名死亡, 89 名負傷)

- 写)の発表、防爆対策が注目される(米)
- 1937 セルロイド工場取締規則庁令14号施行(日)
- 37 準急列車内でセルロイド発火7名死亡24名負傷(日)
- 37 ガス溶接用アセチレン爆発事故46件(日)
- 38 Hasselt 橋脆性破壊(ベ)
- 38 蛍光灯GE発火
- 39 日・仏・英・米潜水艦沈没、米救助システム活躍→1963
- 39 マルクドルフ付近列車同士衝突102名死亡
- 39 ベルリンーマクテブルク間列車大破288名死亡(ド)
- 40 (頃)手術室麻酔ガス爆発防止のための静電気注目される(米)
- 40 大正、ガソリンカー災上191名死亡82名負傷(日)ディーゼル化電化促進→1956
- 40 タコマ橋崩壊(米)
- 40 LZ130号飛行船爆破さる(ド)飛行船消える
- 41 硝石槽爆発1名死亡25名負傷(日)
- 41 飛行機用ジュラルミン焼入で事故頻発(日)
- 41 幌内川重力ダム施工不良で崩壊60名死亡(日)
- 41 山陽線網干駅急行が信号無視で停車中の列車に追突65名死亡71名負傷(日)
- 42 本浜湖炭坑爆発1527名死亡(中国)
- 42 (頃)保育器による未熟児網膜症多発(国外)→1953
- 43 千葉碓ニッケル鉱電炉爆発16名死亡9名負傷(日)
- 43 T₂タンカー(戦時標準船)脆性破壊沈没のため溶接船事故調査委員会発足(米)
- 43 (頃)船建造りベットから溶接が主流となる
- 43 (頃)航空機油圧機器火災防止上難燃性作動油実用化
- 43 倶知安、上映中フィルム火災、積雪のため非常口ひらかず205名死亡(日)
- 44 和歌山山化学工場水添反応塔爆発13名死亡45名負傷(日)
- 44 LNG球型タンク脆性破壊流出メタン爆発128名死亡(米)
- 44 トンネル内蒸気機関車排煙による一酸化炭素中毒452名死亡(伊)
- 44 美明炭坑ガス爆発107名死亡(日)
- 44 サークス小屋火災168名死亡(米)
- 45 旧軍用列車火薬庫(二又鉄道トンネルを利用)米軍により焼却中爆発147名死亡149名負傷(日)
- 45 肥薩線トンネル内蒸気機関車排煙による中毒49名死亡20名負傷(日)
- 46 以降炭車運搬からベルトコンベヤ運搬へ(英)
- 46 音速突破飛行中分解しハヴィランド死亡(英)
- 47 テキサスンティー硝安貨物船爆発68名以上死亡(米)
- 47 ロスアンゼルスアルミ電解研磨工場過塩素酸爆発15名死亡400名負傷(米)
- 47 八高線列車ブレーキきかず184名死亡497名負傷(日)
- 47 労働基準法施行(日)
- 48 液体塩素タンク爆発19名死亡(フィン)
- 49 コメット旅客機初飛行(英)
- 49 石炭坑山携帯照明は安全電灯以外禁止[安全灯を用いなくなり酸欠増加](日)
- 49 蛍光灯内硫酸ベリリウム亜鉛の使用中止(米)[子供らがけがをして問題となった]
- 1949 川崎肥料工場水素爆発19名死亡80名負傷(日)[化学工場露天化の動機]
- 50 (頃)不燃性麻酔剤バサン開発(英)
- 50 (頃)耐火難燃性作動油実用化(米)
- 50 (頃)燃えやすいズボン、セーターによる死亡続出(米)
- 50 クレスウェル炭坑火災80名死亡(英)[ベルトコンベヤのベルト難燃化]→1958(日)
- 50 石山氏らベニシリンショック死を報告
- 50 信濃川発電用トンネル落盤43名死亡(日)
- 51 平和池アースダム決壊97名死亡(日)
- 51 映画フィルム火災70件124名死亡(日)
- 51 桜木町電車炎上106名死亡92名負傷(日)
- 51 西フランクフォート炭坑ガス爆発119名死亡(米)
- 52 名古屋化学工場硝安爆発22名死亡362名負傷(日)
- 52 パラチオン中毒発生[低毒性農薬の要求](日)
- 52 ロンドン、大スモッグ、大気汚染規制の動機(英)
- 52 ワルサム液体酸素タンク爆発7名死亡239名中毒(ド)
- 52 LD転炉(純酸素上吹き転炉)(オーストリア)
- 52 初のジェット旅客機コメット号定期便に就航
- 53 引火性繊維に関する法案提出[布製品難燃化促進](米)
- 53 シカゴのアルミ粉爆発35名死亡38名負傷(米)
- 53 未熟児網膜症の原因わかる(英)
- 54 洞爺丸転覆1155名死亡(日)
- 54 パラチオン中毒続出307名死亡(日)
- 54 川崎潜函工事中酸欠空気噴出6名死亡(日)
- 54 コメット号旅客機連続墜落[実物による与圧金属疲労テスト](英)
- 54 アンホ(AN-FO)爆薬鉱山で成功(米)
- 55 秋葉ダム工事大発破による爆発事故19名死亡(日)
- 55 森永ヒ素ミルク事故113名死亡(日)
- 55 難燃写真フィルム80%占める(日)
- 55 紫雲丸衝突沈没(日)
- 55 保育箱酸素濃度40%以下とす(米)
- 55 液体酸素タンク爆発3名死亡(米)[タンク断熱材に可燃物使用禁止さる]
- 56 造船高世界一となる(日)
- 56 ベレーマ高気圧手術室建設(オランダ)
- 56 マルンネイ炭坑坑内火災261名死亡(ベルギー)
- 56 東大教授ベニシリンショック死(日)
- 56 炭坑保安会議難燃性作動油開発を勧告(ド)
- 56 無人採炭機独より輸入(日)
- 57 造船電気溶接感電死18名[溶接機用電撃防止装置実用化促進]
- 57 サリドマイド発売(ド)
- 57 ニトログリコール中毒火薬工場で発生(日)
- 58 造船所電気溶接感電死3名(日)
- 58 純酸素炉(56年よりオーストリア技術導入)
- 59 マルパッセアーチダム基礎滑動による崩壊500名死亡、行方不明多数(仏)
- 59 ベンゼン含有ゴムのり製造禁止(日)
- 60 都市ガス一酸化炭素中毒98名死亡以後次第に減少(日)

- 1960 サリドマイド販売不許可 (米)
- 60 製鉄所酸素配管事故続発 3 名死亡 3 名負傷 (日)
- 60 (項) 普通ガラス→強化ガラス
- 60 炭坑内ガス自動警報器
- 60 レーザ安全基準
- 61 ドルトムント酸素工場材料と液体酸素による爆発 15 名死亡 (ド)
- 61 ジェット旅客機灯油型→JP4へ変更 (米)
- 62 ニューヨーク市電話会社地下ボイラ自動制御装置欠陥で爆発 23 名死亡 100 名負傷 (米)
- 62 電気用品試験所発足 (日)
- 62 三河島二重衝突 160 名死亡 325 名負傷 (日) [ATS 設置の動機]
- 63 パイオントアーチダム地すべりによる 溢水 3000~4000 名死亡 (伊)
- 63 原子力潜水艦スレッシュャー沈没 129 名死亡
- 63 溶接継手の疲労折損 (米)
- 63 高圧ガス保安協会発足 (日)
- 63 酸素ボンベ爆発 4 名死亡 30 名負傷 (米) [実物ボンベによる爆発実験行なわれる]
- 63 アウスブルグ鋳造工場空気配管爆発 20 名死亡 40 名負傷 (日)
- 63 三池炭坑爆発 458 名死亡 (日)
- 63 鶴見二重衝突 161 名死亡 102 名負傷 (日)
- 64 新潟地震石油工場火災 (日) [工場の地震対策注目される]
- 64 新幹線開通工事犠牲 221 名死亡 (日)
- 64 ベラザール・ナローズ大橋完成犠牲 2 名死亡 (米)
- 64 DC7 実物機火災実験フェニックスで実施 (米)
- 65 ベバーコーツ炭坑遠隔操作採炭法公開 (英)
- 65 モンブラン自動車トンネル完成 (着工 1959) 工事犠牲者 23 名死亡 (伊・仏)
- 65 ニューヨーク市大停電事故 (米)
- 65 ケミカルライト発明 (米)
- 65 ジェット旅客機燃料 JP4→灯油型へ
- 65 漏電シャ断器注目される (日)
- 66 旅客機連続墜落事故 (日)
- 66 ボタ小崩壊 144 名死亡 (英)
- 66 液化プロパンタンク爆発 7 名死亡 130 名負傷 (仏)
- 66 大阪ガス無毒性燃料ガスプラント建設 (日)
- 66 製鉄所自動連続圧延技術導入、手作業(1951)時の 1/16.5 に事故回数率減少 (日)
- 1967 アポロ宇宙船地上で酸素火災 3 名死亡 (米)
- 67 ソユーズ 1 号墜落飛行士死亡 (ソ)
- 67 新日鉄堺製鉄所完成工事中犠牲者 43 名死亡 (日)
- 67 蛍光灯蛍光体へのカドミウム添加改善は毒性のため自粛 (日)
- 67 イノバシオン百貨店大火 322 名死亡 (ベルギー)
- 68 スコピオン原子力潜水艦沈没 (米)
- 68 郡山自動化貨車操車場完成 (日)
- 68 四エチル鉛中毒予防規則 (日)
- 68 新四ツ木橋リングビーム (橋脚工事) 事故 8 名死亡 (日)
- 68 高圧設置基準案 NFPA 56 D-T (米)
- 68 北炭平和鉱ベルトコンベア火災 31 名死亡 (日)
- 69 東大高気圧治療室酸素火災 4 名死亡 (日)
- 69 高気圧環境医学安全基準案 (日)
- 69 シーラブ海底居住実験事故 185 m 1 名死亡 (米)
- 69 ぼりばあ丸沈没 31 名死亡 (日)
- 69 未熟児網膜症多発 (日)
- 69 20 万トンタンカー 3 隻空荷でタンク洗浄中連続爆発 3 名死亡 3 名負傷, 1 隻沈没 (英・その他)
- 70 普通スレーター安全スレート
- 70 トンネル無人シールド工法
- 70 かりほるにあ丸沈没 7 名死亡 (日)
- 70 大阪市都市ガス爆発 78 名死亡 311 名負傷 (日)
- 70 熊谷酸素ボンベ爆発 6 名死亡 7 名負傷 (日)
- 71 ソユーズ 11 号再突入後軟着陸間に事故 3 名死亡 (ソ)
- 71 川崎市内がけ崩れ実験中事故 15 名死亡 11 名負傷 (日)
- 72 貨物船 (2500 トン) 補助ボイラ爆発で沈没 12 名死亡 2 名負傷 (日)
- 72 サンフランシスコ無人自動化鉄道暴走 5 名死亡 (米)
- 72 消毒中毒によるメチル水銀中毒 459 名死亡 (イラク)
- 72 北陸トンネル内寝台車火災 (日)
- 73 バリで SST-TU 144 超音速機墜落 14 名死亡 28 名負傷 (ソ)
- 73 LP ガスによるアパート・マンション爆発続発
- 73 コンビナート化学工場爆発ひん発 (日)
- 74 サンパウロ市ジョエルマルビル大火 200 名死亡 (米)
- 74 カプロラクタム工場爆轟爆発 29 名死亡 100 名以上負傷 (英)
- 74 第 10 確洋丸東京湾で爆発火災
- 74 新幹線半日運休総点検開始
- 74 三菱石油重油タンクから重油流出瀬戸内海汚染