

8.2 鉄道橋

大橋 勝弘*
山田 幸男**

1. ま え が き

鉄道橋は道路橋と異なり、死荷重に対する活荷重の占める割合が大きく、かつ、設計荷重に近い活荷重が1日数十回から百数十回載荷されるという特質をもっている。したがって、1872年、わが国に初めて鉄道が開通した当時は、機関車重量も23t程度と軽く、列車回数も少なかったため、ほとんどが木橋であったが、その後、機関車重量の増大と列車回数の増加に伴い、繰返し荷重による疲労に対する安全性の高い鋼橋が採用され、種々の形式の橋梁が架設されてきた。この間、1920年頃からは、一部の短スパンの橋梁には鉄筋コンクリート橋も採用されてきたが、主体となったのは鋼橋である。しかし、近年になって、長足に進歩したプレストレストコンクリートの技術は、疲労に対する安全性の確保を可能ならしめ、長大スパンのPC鉄道橋の出現を見るに至った。

以下に、このような経緯により建設されてきた現在の鉄道橋の、経年分布、欠陥、延命の方法、健全度判定などを通じ、耐荷力と寿命についての概要を述べる。

2. 荷重の変遷

(1) 動力車の変遷

新橋一横浜間に初めて鉄道が開通したときに使用された機関車は、150形式と呼ばれる先輪と動輪2軸の1-B飽和蒸気タンク機関車で、その重量も23.5tと軽いものであった。その後、鉄道網が整備されるにつれて、機関車も逐次大型化され、1950年には総重量147.05tのD62形式が出現し、狭軌鉄道の蒸気

* 国鉄施設局土木課補佐
** 正会員 国鉄施設局土木課

機関車としては最大級のものとなった。しかし、この頃から鉄道の動力近代化が始まり、蒸気機関車による動力集中方式から、貨物は電気機関車およびディーゼル機関車による動力集中方式に、旅客は電車およびディーゼルカーによる動力分散方式に置き替えられ、現在では、ほとんどの線区がこの方式になってきた。そして、車両技術の進展に伴い、機関車の重量も減少の傾向にある。

(2) 設計荷重の変遷

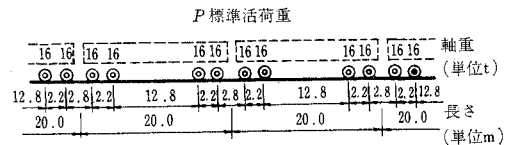
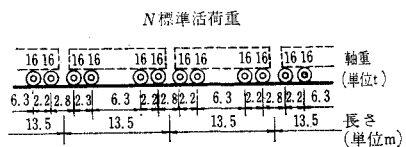
橋梁の設計に用いる活荷重は使用する機関車により決定されるので、機関車の変遷につれて設計荷重も表-1のように変ってきた。すなわち、1902年までは、いずれも実際の機関車を設計荷重としていたが、1909年に至り、初めてアメリカ鉄道保線協会のクーパーE荷重を標準活荷重として採用し、1928年に現行のKS荷重となったものである¹⁾。その後、1964年には新幹線用とし

表-1 設計荷重の変遷

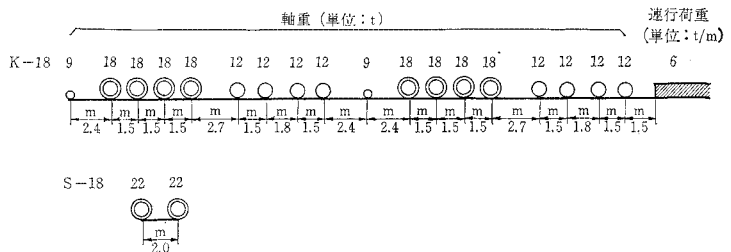
年代	設計荷重
1872	1t/ftの等分布荷重
1882	1t/ftの等分布荷重または重量32.7t、軸重11.35tの機関車4両
1893	2100形式機関車(プレートガーダーの設計に用いられ、最初の定規桁となった……作30年式)
1898	93.4tの機関車荷重と4.47t/mの等分布荷重(トラスの設計に用いられた)
1902	77tの機関車荷重(プレートガーダーの設計に用いられた……作35年式)
1909	標準活荷重 クーパーE33
1921	標準活荷重 クーパーE40
1928	標準活荷重 KS12, KS15, KS18
1964	標準活荷重 N, P (新幹線用)

図-1 標準活荷重

(1) N, P 荷重



(2) KS 荷重 (KS-18 の例)



て、NおよびP荷重が制定された。図-1は、現行の標準活荷重を示したものである。

3. 下部構造

(1) 材質と経年

橋台、橋脚は、当初は木製ステージングであったが、間もなく、れんがおよび石造となり、明治から大正中期にかけて建設されたものの大部分はこの構造で、いまなお大多数が使用されている。コンクリートが使用されはじめたのは大正初期からであるが、本格的に使用されたのは昭和になってからである。図-2は1969年における下部構造の材質別、経年別の数量分布を表わしたものである。これをみると、土木技術がさほど進展していなかった時代に建設された、れんがおよび石造でも、外的条件の変化がなければ、案外耐用性があることがわかる。

(2) 寿命を縮めるおもな原因

a) 基礎根入れの不足

橋脚は河口付近の一部のものを除き、局部洗掘または河床の低下により基礎根入れが浅くなるが、特に最近では急速な地域開発の進展に伴い、河川の砂利採取および河川工事等がさかんに行なわれ、河相の変化が著しく、その傾向が大きい。現在、根入れが不足していると目され

図-2 下部構造の材質別、経年別分布

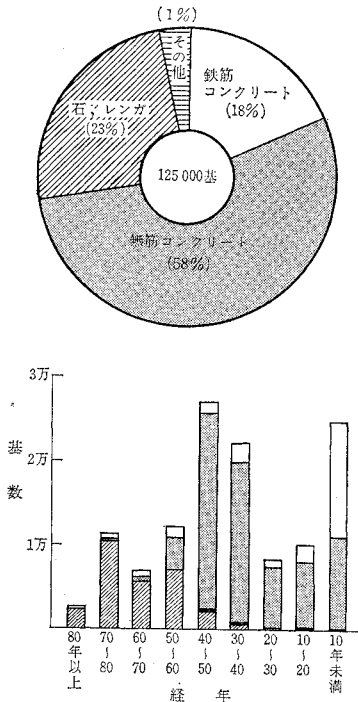


写真-1 洗掘により倒壊した橋脚

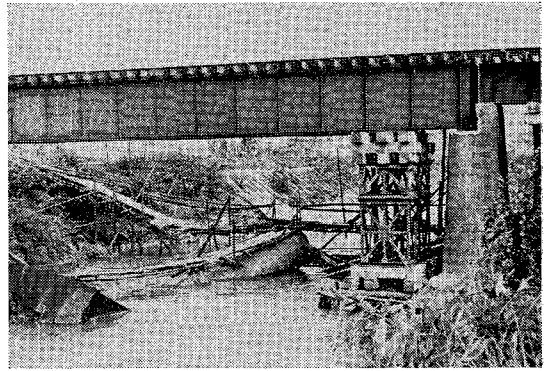
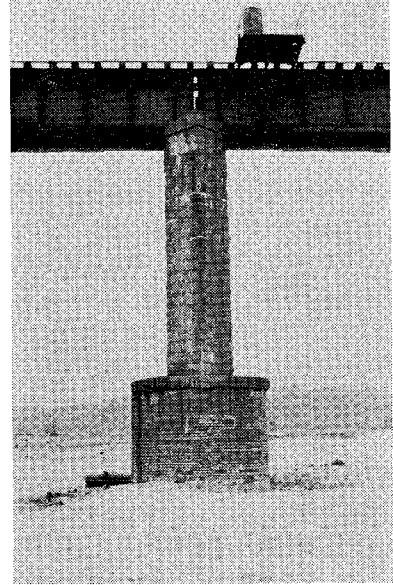


写真-2 河床低下により根入れが不足した橋脚



る橋脚は約2700基あり、総数の10%を占めている。根入れ不足が進行すると、地震時または出水時に傾斜、倒壊する恐れがあり、最も注意を要する欠陥とされている。

b) 基礎地盤の支持力不足および圧密

建設年次の古いものは、基礎地盤の調査技術が未熟であったため、支持力の不足や圧密によって沈下、傾斜を起こしたり、不等沈下によって躯体にきれつが発生し、このため取り替えたものもある。また、地下水の過剰揚水により、木杭が腐食して沈下するものもある。

c) 震害

現在の橋台、橋脚は、震度法による耐震設計がなされているが、大正年代までに建設されたものは、ほとんどが耐震構造として設計されていないので、強い地震によって下部構造にきれつが入ったり、れんがの目地切れおよびはく落が発生する。また、基礎地盤の流動沈下により、傾斜、倒壊することもある。

写真—3 腐食した木杭



d) その他

以上のほか、経年または温度変化、活荷重の増大、施工不良、地すべり等により、表面が劣化して強度が下がったり、桁座の破損、きれつの発生、沈下、傾斜等の現象が見られる。

(3) 延命の方法

前述のような欠陥が現われたものに対しては、修繕または補強を行なって延命をはかっているが、そのおもなものあげると次のとおりである。

- ① 基礎根入れの不足したもの…根固工、堰堤の設置
- ② 基礎支持力の不足したもの…基礎の拡張および増し杭、モルタルまたは薬液注入
- ③ 沈下、桁座の破損…桁座改築
- ④ 躯体の劣化、強度不足…鉄筋コンクリート巻補強
- ⑤ 躯体のきれつ、目地切れ…ポインティング、モルタルまたは薬液注入、鉄筋コンクリート巻き補強

以上のような工事を行なっても、なお機能が回復しないときには、全面的に取り替えて更新する。表—2 は、1965 年から 1969 年までに修繕または取り替えられた下部構造の実態を示したものである。

(4) 健全度の判定

道路橋と異なり鉄道橋の場合は、活荷重の影響がきわめて大きいので、下部構造の健全度の判定は必然的に動的性状に主体がおかれるが、現在、国鉄で行なっている検査方法は、一般的外観検査のほか、精密検査として計器を用いて、次のような検査を行なって健全度を確認し

表—2 橋梁下部構造修繕および取替え基数

(1965~1969 年・単位 基)

原因	種別 現象	修繕	部分取替え	全取替え	全取替えをしたものの経年別内訳											計
					0~9	10~19	20~29	30~39	40~49	50~59	60~69	70~79	80以上			
局部洗掘または河床底下による基礎根入れの不足	根固工の破損、流失	1353	58	80	—	—	4	26	10	2	20	18	—	80		
	躯体のきれつ	68	7	163	—	—	—	27	8	29	65	24	10	163		
	沈下・傾斜	73	2	99	—	11	11	27	26	9	6	6	3	99		
	倒壊	2	—	31	—	1	—	12	3	10	2	3	—	31		
	その他	1062	2558	46	105	424	797	—	10	1	46	108	57	75	108	19
地 震	躯体のきれつ	69	14	116	—	2	4	8	10	27	44	21	—	116		
	沈下・傾斜	23	3	14	—	—	—	5	3	2	—	4	—	14		
	倒壊	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
	その他	9	101	—	17	—	130	—	—	—	—	—	—	—		
基礎地盤の圧密、支持力不足	躯体のきれつ	41	—	53	—	—	—	2	19	2	20	8	2	53		
	沈下・傾斜	112	4	250	4	6	—	133	14	11	43	36	3	250		
		44	197	—	4	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
地 す べ り	躯体のきれつ	5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
	沈下・傾斜	3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
	倒壊	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
	その他	—	8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
基礎杭の腐食	躯体のきれつ	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
	沈下・傾斜	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
	その他	4	5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
老朽、凍害、施工不良	表面の劣化	621	91	85	—	2	—	2	15	21	19	24	2	85		
	躯体のきれつ	715	85	174	—	2	—	13	15	27	28	84	5	174		
	その他	501	1837	112	288	254	513	—	27	6	14	24	31	49	93	10
荷重の増加、施工不良	躯体のきれつ	44	22	66	—	—	—	—	5	46	3	10	2	66		
	桁座の破損	1294	61	2	—	—	—	—	—	—	2	—	—	2		
	その他	666	2004	20	103	4	72	—	2	—	—	—	—	2	4	
計		6710	525	1815	4	63	26	315	260	274	376	439	58	1815		

表-3 単位沈下量の標準値 (単位 mm/t)

基礎地盤	鉄 桁		コンクリート桁	
	橋 台	橋 脚	橋 台	橋 脚
岩 盤	10/10 000 以下	15/10 000 以下	10/10 000 以下	10/10 000 以下
締った砂礫等、 堅硬な場合	15/10 000 以下	25/10 000 以下	15/10 000 以下	20/10 000 以下
緩い砂、粘土等 の場合	30/10 000 以下	50/10 000 以下	30/10 000 以下	40/10 000 以下

表-4 振動の物理量と基礎の状態

記 号	物 理 量				橋 脚 の 状 態
	全振幅 $2a$ (mm)		周 期 T (sec)		
	$2a < 0.70$	$2a \geq 0.70$	$T \leq 0.35$	$T \geq 0.35$	
A	○		○		健 全
B		○	○		基礎支持力不足
C	○			○	基礎部弱化または 基礎支持力不均等
D		○		○	基礎支持力不足または 不均等かつ基礎部弱化

ている。

a) 動的運動性状による判定

列車の動的載荷によって生ずる橋台、橋脚の運動性状は、欠陥の種類によって異なるので、これを把握することにより健全度判定の目安とすることができる。一般に行なわれているのは、沈下および振動性状による判定であって、その方法の概略は、次のとおりである。

① 沈下性状による判定は、1/100 mm までの沈下を測定できる変位計により最大沈下量を測定し、その値を活荷重 1t あたりに換算した値をもって判定するものでその標準値を表-3²⁾に示す。

② 振動性状による判定は、振子の固有周期 1 sec 以下の振動計により列車通過時の橋脚の振動を測定し、その全振幅、周期および記録波形から判断するもので、表-4³⁾は、振動の物理量と基礎の状態を示した判断資料の一例である。

b) 破壊検査

a) の非破壊検査の結果、異常な数値が現われた場合には、躯体をボーリングし、躯体各部の強度、基礎の状態を確認のうえ判断する。

c) 応力および安全度の解析

断面計算を行ない、その結果算定された応力または転倒、滑動、支持力に対する安全度により判定を行なうもので、鉄筋の降伏点、コンクリートまたは、れんがの破壊に対する安全度は、1.3 以下をもって取り替え、または補強の標準とする。

4. 上 部 構 造

(1) 橋桁の材質と経年

1872 年開業した新橋—横浜間の橋桁は、いずれもひのき材であったが、その後次第に錬鉄が使用されるようになり、1897 年には木造は見られなくなって、もっぱら軟鋼が使用されるようになった。そして、東京の市街地には 1900 年頃から、れんがアーチの高架橋が建設され、また、1920 年頃からは鉄筋コンクリートも用いられるようになり、最近ではプレストレストコンクリートもさかんに用いられるようになった。図-3 は 1969 年

写真-4 わが国最初の鉄筋コンクリート鉄道橋
(Tビーム、房総西線・江見—大海間)

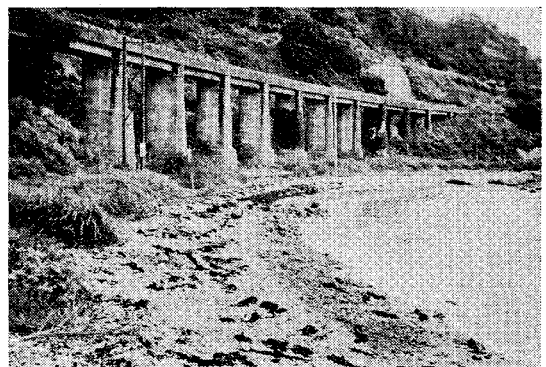


図-3 上部構造の材質別、経年別分布

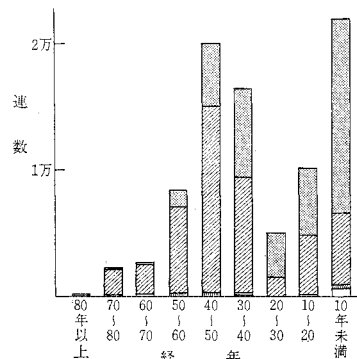
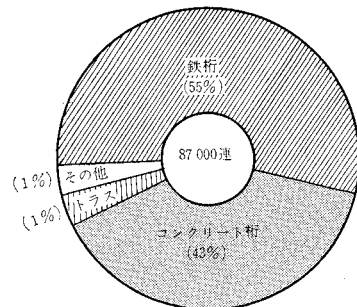


表-5 鉄桁の種類別、経年別取替え連数

(1964~1966年)

経年	桁種類				トラス				デッキプレート ガーダー				スループレート ガーダー				トラス				計			
	欠陥の種類				A	B	C	計	A	B	C	計	A	B	C	計	A	B	C	計	A	B	C	計
20 ~ 29	—	—	—	—	—	3	—	3	—	—	7	7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3	7	10
30 ~ 39	12	3	8	23	2	40	6	48	11	11	15	37	—	1	—	1	—	—	—	—	25	55	29	109
40 ~ 49	3	13	40	56	—	16	6	22	11	9	97	117	—	2	—	2	—	—	—	—	14	40	143	197
50 ~ 59	30	9	36	75	1	2	6	9	15	5	41	61	2	—	—	2	—	2	—	2	48	18	83	149
60 ~ 69	30	6	32	68	—	—	1	1	43	11	50	104	—	—	—	—	3	—	—	3	76	17	83	176
70 以上	6	1	14	21	—	—	—	—	1	—	31	32	—	—	—	—	—	—	—	—	7	1	45	53
計	81	32	130	243	3	61	19	83	81	36	241	358	2	3	—	5	3	2	—	5	170	134	390	694
平均耐用年数	50.05				39.53				53.51				45.00				70.43				52.48			

注：A：活荷重の増大，B：局部的損傷，C：腐食。

における橋桁の材質別、経年別の数量分布である。

(2) 欠陥の種類

a) 鉄 桁

鉄桁の欠陥は、強度不足と局部的損傷に大別される。強度不足は、活荷重と頻度の増大ならびに腐食による断面の減少により、桁全体として耐荷能力が低下しているものであり、局部的損傷は、構造上の欠陥、局部的な外的条件などにより、桁に局部的に損傷の生ずるものである。局部的損傷のうち、おもなものは

- ① 部材のきれつおよび破断、ゆるみ、変形
- ② リベットの弛緩、溶接部分のきれつ
- ③ たわみおよび振動の増大

などである。以上のうち、①の損傷は、ピントラスの斜材のアイバーおよび製作年次の古いプレートガーダーの支承部に多く見られ、③の損傷は、1930年代に活荷重の増大に伴って溶接補強をしたプレートガーダーに多く見られる。表-5は、これらの欠陥が原因で、1964年から1966年にかけての3年間に取り替えられた鉄桁の実態である。

b) コンクリート桁

鉄筋コンクリート桁は、地震など異常外力による損傷により機能を失う以外は見べき欠陥はなく、乾燥収縮、施工不良などに起因するひびわれ程度である。したがって、局部的損傷が原因で取り替えられたものはあまりないが、活荷重の増大によって強度不足となったものは、鉄桁のように簡単な補強方法がないため、局部的損傷がなくても取り替えられたものもある。

PC桁はその歴史が浅いため、明らかな欠陥は発見されていないが、採用当初のもので、ひびわれが相当広範囲に生じたものがある。

(3) 延命の方法

a) 鉄 桁

鉄桁は、表-4に見るように、腐食が原因となって取り替えられているものが多いので、腐食を防止することによって延命できる。その方法は、もちろんペイントの

塗り替えであって、その周期は環境条件によって異なるが、おおむね6~8年が適正である。

荷重の増加によって強度不足となったものおよび軽微な局部的損傷に対しては、溶接補強によって延命がはかれる。

b) コンクリート桁

きれつまたは、ひびわれに対しては、モルタル、合成樹脂の注入によっては内部の鉄筋の防食をはかり、表面がはく落して鉄筋が露出したものに対しては、モルタルの吹付けが行なわれる。

(4) 耐荷力の判定

a) K S相当値

標準活荷重は、図-1のように蒸気機関車をモデルとした荷重系列であるが、現実の荷重は、車両の形式によりこれと異なった軸重および軸配置をもったものばかりである。したがって、橋桁の耐荷力を判定するためには車両の荷重系列の静的載荷によって生ずる橋桁の応力を等値のK S荷重系列の値に換算する必要がある。この値を車両のK S相当値と称し、K S荷重の1働輪軸重の大きさをもって表わす。橋桁に生ずる応力は、荷重が一定ならばスパンの関数であるから、K S相当値も車両に固有のものではなく、スパンにより異なる。

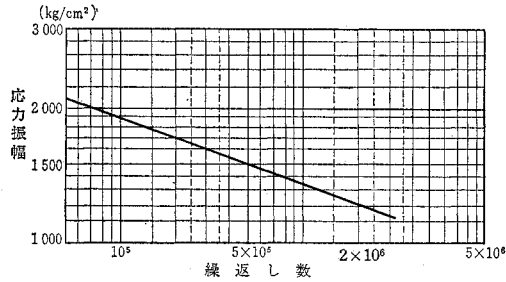
b) 鉄桁の現有強度と実耐率

架設年次の古い鉄桁は、腐食によって部材断面が減少したり補強することによって、架設時と異なった条件となっているので、現時点での耐荷力、すなわち現有強度を算定することが必要である。その方法は、最小部材断面における抵抗曲げモーメントまたは抵抗せん断力を算出し、これを等値のK S荷重系列の値に換算することによって求められる。現有強度とその橋桁を通過する最大車両のK S相当値との比を実耐率と称し、これにより現時点において車両が通れるかどうか、あるいは、桁を取り替えるべきかどうかを判定する。

許容応力度 σ_a によって設計された桁の実耐率が α であれば、生ずる最大応力 σ は

$$\sigma = \sigma_a / \alpha$$

図-4 腐食鋼材の疲労強度
(片振引張)



で計算される。 σ の限界値は、鋼材の降伏点応力度に対して1.6の安全率をもつ値を標準としており、これを保守限度応力度といい、現在の鉄桁の大多数を占めるSS41に例をとれば1500 kg/cm²である。ちなみに、50年以上使用したSS41の腐食橋桁からとった標準試験片による疲労試験の結果(図-4)によると、応力振幅1500 kg/cm²に対する繰返し数は、約50万回である。

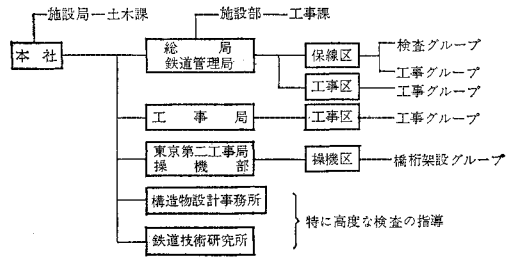
保守限度応力を超過したものは、列車を徐行させて衝撃を減少し、生ずる応力を保守限度応力度以内におさえるかもしくは橋桁を取り替える必要がある。

5. 鉄道橋の検査と保全

鉄道橋は、いったんその機能が失なわれると流通経済に及ぼす影響が大きく、特に突然破壊された場合には多くの人命にかかわる。したがって、機能の実態を把握するための検査を行っており、この結果、発見された欠陥に対しては、その程度に応じた措置をして列車運転の安全をはかっている。この組織は図-5のとおりである。実際の橋梁の検査作業は、現場機関である保線区の専門グループによって行なわれており、その種類は

- ① すべての橋梁を一定周期で行なう定期検査

図-5 検査と保全の組織



- ② 地震時、出水時などに機能を確認するための臨時検査

- ③ 欠陥の発生した長大橋梁の極限機能を確認するための特別検査の3つがある。

6. あとがき

最近の鉄桁は、高張力鋼および耐侯性鋼材の使用、材質の向上等により耐荷力が増加し、その寿命の延伸が期待されるが、下部構造においては、施工技術の進歩および材質の向上にもかかわらず、設置条件の急激な変化により寿命が短縮される傾向にある。これは、急速な地域開発の進展に伴い、河川の砂利採取、山林の伐開等により、橋梁建設当時と比較して大きく河相が変化するためであり、橋梁保全上その広域防災対策は、今後における重要な課題となるであろう。

参考文献

- 1) 高坂紫朗：鉄道防災改良施工法，三報社，1955，pp. 861～863
- 2) 3) 振動による橋梁下部構造の判定指針に関する研究報告書，日本鉄道施設協会，1965，pp. 11～17
- 4) 鋼構造物の耐用性調査報告(鋼鉄道橋)，日本鋼構造協会，1969，pp. 11～12

土木学会視聴覚教育委員会編

申込先：土木学会刊行物係

土木技術フィルムリスト 1970年版

B5判 126 ページ

定価 1 000 円 (〒 80 円)

情報化時代の今日、視聴覚教材には映画・スライド・テープ等さまざまなものがあり、各種の教育システムの中に積極的にとり入れられるようになりました。本リストは44年6月現在における土木技術に関する映画およびスライドフィルムの保有状況を各機関の協力により一冊にまとめたもので、1. 土木一般から21. 電子計算機までに分類し、企画、製作、製作月日、上

映時間、内容要旨、対象などがのっており、作られたまま、とかく埋もれがちなるフィルムを役立たせるために編集されたものであります。印刷部数の関係でコストが高くなりましたが、学校、研究機関、企業内教育機関などでの利用価値はきわめて高いと思われまので、ぜひお求め下さい。