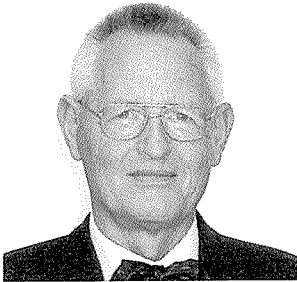


# Recent Development in LCC based Prestressed Concrete Bridge Management in Germany

## ドイツにおける LCC を考慮した PC 橋マネジメントの現状

Klaus BRANDES

## 著者紹介



## Klaus BRANDES

Dr.-Ing., Head of Structural Safety Laboratory  
Federal Institute for Materials Research and Testing (BAM), Berlin

- 1936 年生まれ  
ベルリン工科大学大学院修士課程修了  
BAM 構造安全研究室室長  
●ベルリン工科大学助手 (1964 ~)  
●チューリッヒ工科大学客員教授 (1981 ~)  
●ドレスデン工科大学客員教授 (1991 ~)  
●山口大学外国人特別招聘教授 (1998)  
●ポツダム応用科学大学非常勤講師 (2002 ~)

## Summary

The great number of existing bridges and the tightness of public financial means more and more demand an extension of the life time of the bridges. Together, the costs for maintain the bridges require a sophisticated bridge management system to come to an optimum of needed financial means. To meet all these challenges, further development had to be launched recognisable in all the industrialised countries. Some special development has been done in Germany and some of the most interesting topics shall be presented in this contribution.

## 1. INTRODUCTION

When dealing with the extending the life span of bridges, a big variety of problems come into consideration. Different fields of technology have to be included in order to reach a satisfying result at the end. The development in Germany is characterised as well by elaborating new standards and by approving new methods of evaluation of the condition and load carrying capacity of bridges as of bridge management for cost minimisation. All these facets shall be touched in the contribution.

## 2. STANDARDS

For the maintenance of road bridges, the respective standard DIN 1076 - Highway and Road Bridges - has been launched in a new edition<sup>1)</sup>. The last edition before dates back to 1983. There are some new aspects included in the standard which are worth to be mentioned. Regarding highway bridges, the new standard has to be seen in connection with the regulation of the German Federal Government of 1998. The new view on the structural behaviour and durability makes a contribution to the ecological aim of saving resources by an extension of the use of structures.

## 概 要

多数の橋梁が存在し、また公共財源がひっばくしているために、橋梁の耐用年数の延長がより強く求められようになってきた。それとともに、橋梁の維持管理費のために、精緻な維持管理体制によって必要な財源の確保を最適化する必要がある。これらすべての課題に対処するために、すべての工業国では、さらなる研究開発に着手しなければならない。ドイツでは PC 橋のマネジメントに関する特別な研究開発がおこなわれており、本稿ではもっとも興味深い話題をいくつか紹介してみる。

## 1. はじめに

橋梁の耐用年数の延長を論じるときには、多種多様な問題が検討される。満足のいく結果に達するには、さまざまな技術分野を検討の対象としなければならない。ドイツでの研究開発は、費用最小化のための橋梁マネジメントに関して、橋梁の状態および耐荷力評価の新しい規格を作成したことが特徴としてあげられるとともに、それらの新たな評価手法を認可したことも特徴となっている。本稿では、これらすべての側面について言及するものとする。

## 2. 規 格

ドイツにおける新改訂版<sup>1)</sup>では、道路橋の維持管理についての新規格；DIN 1076（高速道路および一般道路橋）が制定された。旧版が作成されたのは 1983 年のことであった。新しい規格には、言及すべき新たな側面が含まれている。高速道路橋に関しては、1998 年のドイツ連邦政府規則に関連して、新たな規格が検討されなければならない。構造の挙動および耐久性に関する新たな観点は、構造物の供用寿命を延ばすことによって、資源節約という環境保護目的に寄与する。新規格；DIN 1076 では、旧版と比較して

In the new standard DIN 1076, only some parts deviate from the last issue. Of course, the *Bauwerksbuch* (structure log) is again a very important document which include all the relevant data of the bridge. It should be available in time for the initial major test. The list of tests has been extended. Besides major and minor tests ad-hoc-tests are listed as well as testing in "accordance with regulation requirements". For inspecting solid components, a more detailed instruction is established: "...concrete components shall be examined for cracks, bulging, penetration of moisture, damaged joints, efflorescence, rust stains, cavities, spalling and other changes in surface conditions. When necessary, spalling in the vicinity of and cracks parallel to cables shall be traced back to the prestressing steel. If concrete is in dubious condition, its compressive strength, carbonization depth, chloride content, the concrete cover, and the degree of rusting of the reinforcement shall be determined. The condition of protecting coating shall be examined. Any exposed reinforcement shall be registered. Crack widths (particularly in the vicinity of day joints) shall be measured and the size of blemishes established. Dubious cracks shall be measured and checked for any sign of enlargement. Areas that have already been repaired require greater attention." Compared with the old edition, a more comprehensive as well as detailed inspection is required.

Really new is the clause 5.2.1.3 ; Monitoring surveys. For the first time, monitoring is mentioned in the standard: "For a more sophisticated appraisal of the structure, a monitoring survey programme shall be designed, updated, where appropriate, and specified in the *Bauwerksbuch*, together with the results of the control measurement. The datum points and measuring points shall be recorded in sketch form.. If control measurements are not required as part of regular tests on the structure, this shall be expressively stated in the *Bauwerksbuch*." An example for monitoring of prestressed concrete bridges is given below. When mentioning durability, design for durability is of major importance. Concerning the bridges of the German Federal Highway Administration (*Autobahn* and *Bundesstrassen*), in 1998 a new regulation was issued<sup>2)</sup>. It was aimed to overcome a lot of problems connected with prestressed concrete bridges in Germany, especially the question about the condition of the prestressing cables which were grouted after prestressing. The new type of bridge structures of the Federal highways and roads is characterised by box-girders and external prestressing inside the boxes. Additionally, space has to be provided for later strengthening and the cables should be replaceable (Fig.1). No cables should be provided in the webs of the box girders. The idea now brought to reality is not new, and in most other countries of Europe, grouting of cables had not been favoured. In Germany, thousands of bridges have been built with post-tensioning and grouting, and many of them have been replaced meanwhile, sometimes after only 20 years of service. The vulnerability of this system became obvious when the roof edge beam of the Congress Hall in Berlin crashed down in 1980, only

いくつかの条項で相違がみられる。もちろん、橋梁台帳 (*Bauwerksbuch*) は、橋梁の関連データすべてを網羅している非常に重要な文書である。この台帳は、初期の主要な試験で利用できるように作成しなければならない。試験の一覧表が拡充された。このほか、大小の特別な試験および「規格要件に合致する」試験が列記されている。中実部材の点検については、以下のような詳細な指示が規定されている。「・・・コンクリート部材については、ひび割れ、膨張、水分の浸透、損傷した目地、風化、錆、空洞、剥落、およびそのほかの表面状態の変化について検査するものとする。必要なきには、ケーブル周辺の剥落、およびケーブルに並行するひび割れをたどって PC 鋼材まで調べるものとする。コンクリートが疑わしい状態であれば、その圧縮強度、中性化の深さ、塩化物含有量、コンクリートかぶり、および錆の程度を測定するものとする。防護被膜の状態を調査する必要がある。どのような状態の露出鉄筋についても記録するものとする。(とくに目地付近の) ひび割れ幅を測定し、欠陥の大きさを明らかにしておくものとする。疑わしいひび割れを測定し、どのような拡大の徴候についても検査するものとする。すでに補修された部分には、より大きな注意を払わなければならない割れ。」旧版の規格と比較してみると、いっそう包括的で、かつ詳細な点検が要求されている。

新規格 5.2.1.3 条「モニタリング調査」は、まったく新しく制定された。規格において、モニタリングに言及されたのはこれが最初であり、「構造を精緻に評価するために、モニタリング調査計画を立案、更新し、適切であれば、管理測定の結果とともに「橋梁台帳」に明細に記入するものとする」と定められている。測定基準点および測定地点は、略図の形で記録するものとする。管理測定が必要でなければ、そのことを台帳に明確に記述するものとする。」プレストレストコンクリート (PC) 橋に対するモニタリングの一例を以下に示す； 耐久性に言及するとき、耐久性設計がきわめて重要である。ドイツ連邦道路庁 (German Federal Highway Administration) が管轄する橋梁 (高速道路および連邦道路) に関して、1998 年に新たな規定が公布された<sup>2)</sup>。それは、ドイツの PC 橋の多くの問題、とくにポストテンション PC 鋼線の問題を克服することがねらいであった。連邦道路の新しい種類の橋梁構造は、箱げたと、箱げた内部における外ケーブルプレストレスングを特徴とする。このほか、後から外ケーブルを追加補強するための配置スペースをとっておかなければならず、またケーブルは取替え可能でなければならない (図 - 1)。どのケーブルも箱げたのウェブに配置してはならない。現在、実現化されている着想は、新しいものではなく、ほかの欧州諸国の大半においてはケーブルへのグラウトが支持されなかった。ドイツでは、数千の橋梁がポストテンションとグラウト方式によって建設されており、そのうちの多くが、使用期間わずか 20 年程度で交換された。この方式の弱点は、ベルリン議事堂の屋根のエッジビームが、完成からわずか 22 年後の 1980 年に崩落したときに明らかになった (図 - 2)。

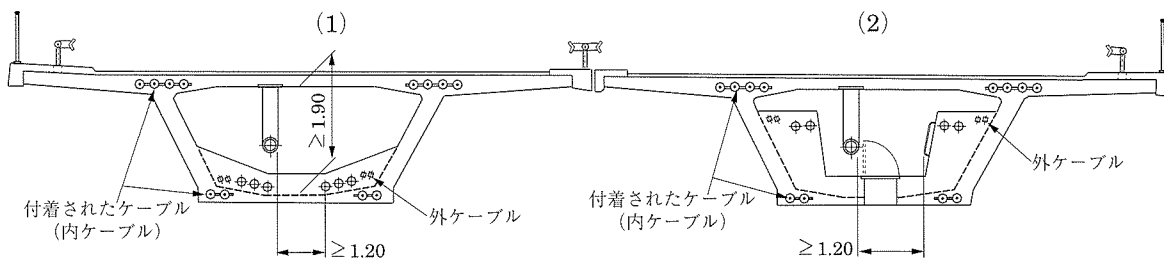


図 - 1 ドイツにおける外ケーブルを有する高速道路橋の設計に関する新しい規定<sup>2)</sup>。中央径間の断面図（左の断面(1)）と連続ばりの中間支点（右の断面(2)）。箱げた内では、ケーブル（緊張材）は部材外側に配置されている（断面(1)）。後から外ケーブルを追加補強するためのスペースがとってある（断面(2)）。

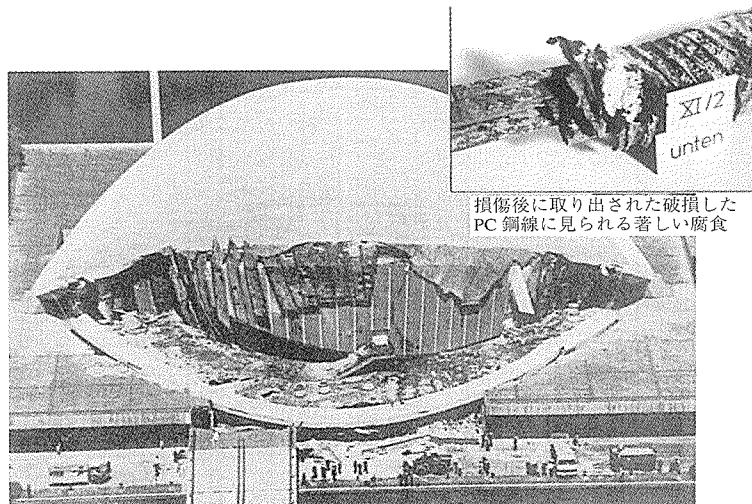


図 - 2 1958年建設のベルリンの議事堂。1980年に屋根のエッジビームの一つが崩落した。

22 years after completion (Fig.2).

### 3. LOADING TESTS BY LOADING VEHICLE

Very often, it is nearly impossible to find out whether a bridge meets the requirements of a specific loading (in German: Brueckenklasse), especially if there are no reliable documents available what sometimes happens after wars and unfavourable political regimes. To overcome this problem, a big R&D programme had been launched in 1992 which was called EXTRA (experimental safety assessment). At the end of these endeavours, a loading vehicle has been developed which is capable to perform loading tests on bridges within 2 days and closing of the traffic only for a minimum of 2 hours<sup>3)</sup> (Fig.3). The vehicle can be driven on roads and is usable for bridges up to 18 m span and about 100 tf total loading on one lane. Some weeks before, a second vehicle has been approved in a test on a railway bridge at Lueneburg, Germany (Fig.4). In all the tests, a sophisticated assessment of the load bearing capacity and the structural behaviour has to be undertaken for interpretation of the test results.

### 4. MONITORING

As has been emphasised by congresses and seminars since

### 3. 車両による載荷試験

橋梁が特定の荷重条件（ドイツ語では橋梁等級）を満たしているか否かを見分けることは、とくに、戦中戦後の好ましくない政治体制時の終結後に生じたことに関しては、信頼できる資料が入手できなければ、不可能に近い場合が多い。この問題を解決するために、1992年にEXTRA（実験による安全性評価）と呼ばれる大規模な研究開発計画が開始された。これらの取り組みの結果、橋梁の載荷試験を2日間で実施することのできる車両が開発された。この試験では、交通を遮断するのは2時間という最短時間で済む<sup>3)</sup>（図-3）。この車両は、一般道路で運転することが可能で、径間が18m、1車線上での総荷重が約100tfまでの容量で橋梁に適用することができる。数週間前、ドイツ、リュエネブルクでは、鉄道橋での試験において2番目の試験車両が認可された（図-4）。すべての試験において、耐荷力と構造挙動に関する高度な評価を踏まえて試験結果を解釈しなければならない。

### 4. モニタリング

数年前から国際会議やセミナーで力説されているように<sup>4)</sup>、橋

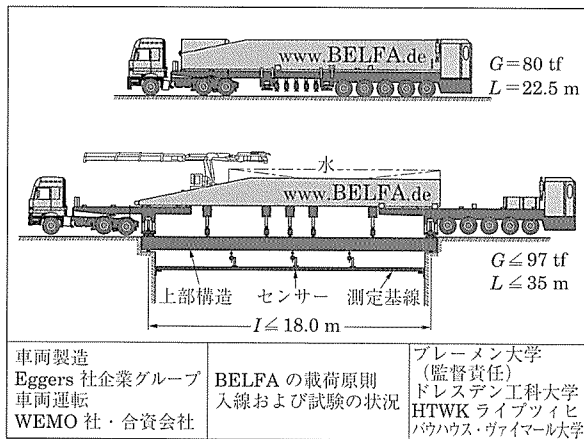


図 - 3 径間が 18 m、荷重が 100 tf までの道路橋の試験車両 BELFA

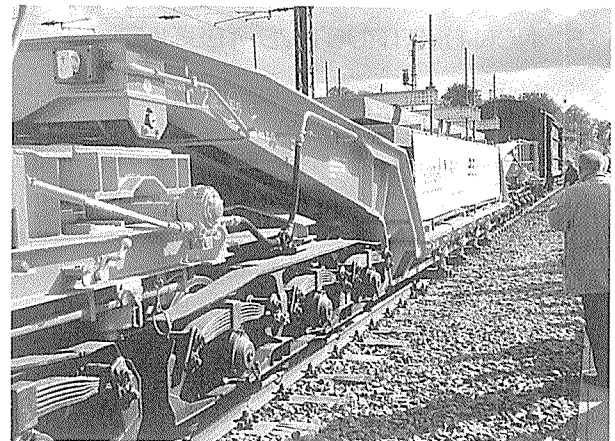


図 - 4 2002 年 9 月 24 日、リュネブルクにおける車両 BELFA-DB による鉄道橋の載荷試験

several years<sup>4)</sup>, that long-term monitoring is unavoidable when intending life span extension of bridges. Together, it became evident that many of the often favoured techniques like modal analysis or acoustic emission is not capable to meet the challenge. For the pre-stressed concrete viaduct of the new central railway station at Berlin (so-called Lehrter Bahnhof), an innovative and redundant system for monitoring has been developed by BAM which will be run during the next years. Some interesting results will be available via INTERNET (see Fig.5)<sup>5)</sup>. The backbone of the measuring system consists of an advanced hydrostatic levelling system combined with a laser-based (Fig.6), levelling system<sup>5)</sup>. While that system is measuring the vertical displacements, the straining of the structural members are traced by strain gages, some of them as fibre-optic sensors (of up to 2 m length) others as resistive (electric) gages, always arranged as redundant measuring devices. The fibre-optic sensors can not be influenced by electro-magnetic fields as occur at the railway lines. The systems operates since spring 2002.

梁の耐用年数の延長を目的とするときには長期モニタリングが不可欠である。さらに、モーダル・アナリシスやアコースティックエミッション(AE)法のように頻繁に用いられる技術の多くは、このような課題に対応することができない。ベルリンの新しい鉄道中央駅(いわゆるレールター駅)のPC高架橋のために、革新的で冗長性のあるモニタリングシステムがBAMによって開発されており、今後数年間にわたって運用される。興味深い結果が、インターネットを通じて入手可能となる(図-5)<sup>5)</sup>。測定システムの中核は、レーザー式水準測量システム(図-6)と組み合わせた高性能流体水準測量システムからなる<sup>5)</sup>。このシステムが鉛直変位を測定する一方、構造部材のひずみはひずみゲージによって追跡されるが、これらのひずみゲージには光ファイバーセンサーもあれば、電気抵抗式ゲージもあり、つねに冗長性のある計測機器群として配置されている。光ファイバーセンサーは、鉄道線路上で発生するような電磁場の影響を受けない利点がある。これらのシステムは、2002年春以降に運用されている。

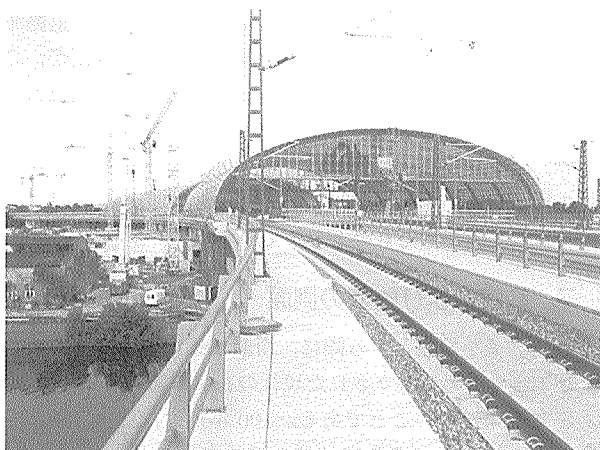


図 - 5 ベルリンの新しい鉄道中央駅(「レールター駅」)。軽量ガラスで作られた大屋根が、4本の並行するPC高架橋のうち、外側の二つの橋に支えられている。

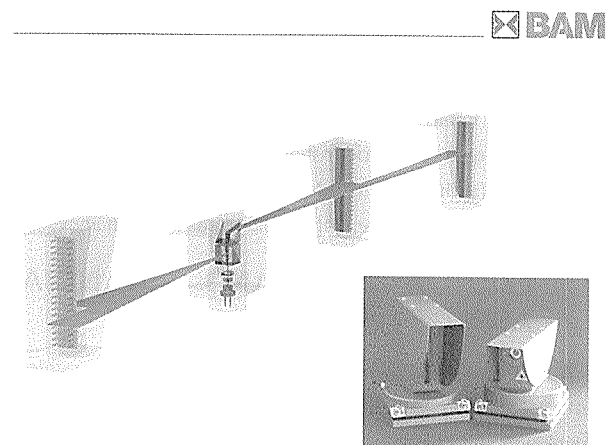


図 - 6 橋梁の不同沈下変位量を測定するためのレーザー式水準測量システム

## 5. NON-DESTRUCTIVE TESTING

"Evaluation and prediction of deterioration is one of the most difficult things to be done", expressed T. Uomoto during the Seiken Symposium No. 26 in Tokyo which he organised in April 2000. During that symposium some survey speeches gave an overview on development and practical experience in Japan, however also in European countries<sup>6)</sup>. All the contributions to the symposium outlined that there is a lot of R&D needed to reach a satisfactory state of knowledge and experience in that field. Nearly all the physical principles known are subject of trying to use them for the evaluation of deteriorated prestressed concrete structures. Up to now, only small progress can be recognised compared to the big amount of problems encountered. Presumably, only a combination of different methods will lead to sufficient results. At this place, only a listing of some of the methods shall be given: Ultra-sound (as pulse echo), impact-echo, radar, thermography, moisture measurement, X-Ray radiography, remanent-magnetism as well as some electrical-chemical measuring methods for recording corrosion processes. After some years of collecting as many methods as possible, a compendium has been issued listing many of the respective methods<sup>7)</sup>. It is of interest from a more theoretical point of view, because for only a few methods are given some hints about experiences. The series of symposia like that in Tokyo 2000 will continue which is really of great interest for the exchange and dissemination of knowledge in this field of rapid development. Non-destructive methods for the evaluation of bridges is also subject of the Conferences performed by IABMAS (International Association for Bridge Maintenance, Safety and Management)<sup>8)</sup>.

## 6. BRIDGE MANAGEMENT

Bridge management systems are unavoidable when being concerned with a big number of such structures. In Germany, the Deutsche Bahn AG (German Railway) has modernised its system during the last decades. Also the authorities being responsible for roads have developed different system, and there is a development to have only very few different systems. In Fig.7, a simplified sketch of the bridge management system of the City of Duesseldorf (at the Rhine river) is outlined<sup>9)</sup>. The requirements of the BMS are in accordance with the standards as given above.

## 7. EDUCATIONAL AND FINANCIAL ASPECTS

When dealing with existing bridges, it is nearly impossible to refer to actual codes which are formulated for the design, calculation and construction of new bridges. Hundred years ago, engineers designed and constructed bridges of high quality which are in use up to now. However, the material was different to today material and the methods of calculation and mounting was

## 5. 非破壊試験

東京での第26回生研シンポジウムにおいて、東京大学、魚本教授は「劣化の評価と予測はもっとも困難な事柄の一つである」と述べた。このシンポジウムは、魚本教授によって2000年4月に企画された。同シンポジウムでは、日本と欧州諸国における開発の概観ならびに実績について研究発表がおこなわれた<sup>6)</sup>。同シンポジウムで発表されたすべての論文は、この分野に関する知識と経験が満足な状態に達するために必要とされる研究開発がまだまだ数多くあることを示すものであった。劣化したPC構造物を評価するためには、ほぼすべての既知の物理法則が駆使される。現在までのところ、直面する問題の多さに比較して、明確に認識できることと進捗度はごくわずかなものに限られている。おそらく、十分な結果を得るには、さまざまな方法を組み合わせるしかないであろう。ここでは、それらの方法のいくつかを挙げておく。すなわち、超音波（パルス反射）法、衝撃反響法、レーダー法、赤外線法、水分測定法、X線照射法、残留磁気検出法、ならびに腐食過程を記録するためのいくつかの電気化学的測定法である。数年にわたって可能な限り多くの方法を収集した後、それぞれの方法を列記した一覧表が発行された<sup>7)</sup>。この一覧表が、理論的な観点から興味深く思われるのは、いくつかの測定法に対して、その実施にあたっての有用な要領が与えられていることである。上述のように2000年に東京で開催されたような非常に興味深いシンポジウムが、迅速な研究開発分野における知識の交換および普及を目指して引き続きおこなわれることになっている。橋梁評価のための非破壊試験法は、「橋梁の安全性と維持管理に関する国際学会（IABMAS）（International Association of Bridge Maintenance, Safety, and Management）」によって開催された国際会議においても検討された<sup>8)</sup>。

## 6. 橋梁マネジメント

橋梁マネジメントシステムは、数多くの関連構造物が存在する場合には必要不可欠である。ドイツでは、ドイツ鉄道会社が、過去10年間でシステムを近代化した。道路を担当する官庁もさまざまなシステムを開発してきたが、これらの研究開発で構築されたシステム間での違いはほとんど生じていない。図-7に、デュッセルドルフ市（ラン川河畔）における橋梁マネジメントシステムの概要を示す<sup>9)</sup>。この橋梁マネジメントシステム（BMS）の必要要件は、上記の規格に準拠したものとなっている。

## 7. 教育および財政の側面

既設橋梁を対象とする際に、新設橋梁の設計、積算、および工事のために確立された現行の基準を参照することは、あまり意味がないことである。100年前は、技術者が現在に至るまで供用できる高品質の橋梁を設計し、架設した。しかしながら、現在では材料が変化しており、積算方法や架設工法も異なってきた。ニューヨーク市運輸局の橋梁点検およびマネジメント部門の責任者である Dr Yaney, B. S.

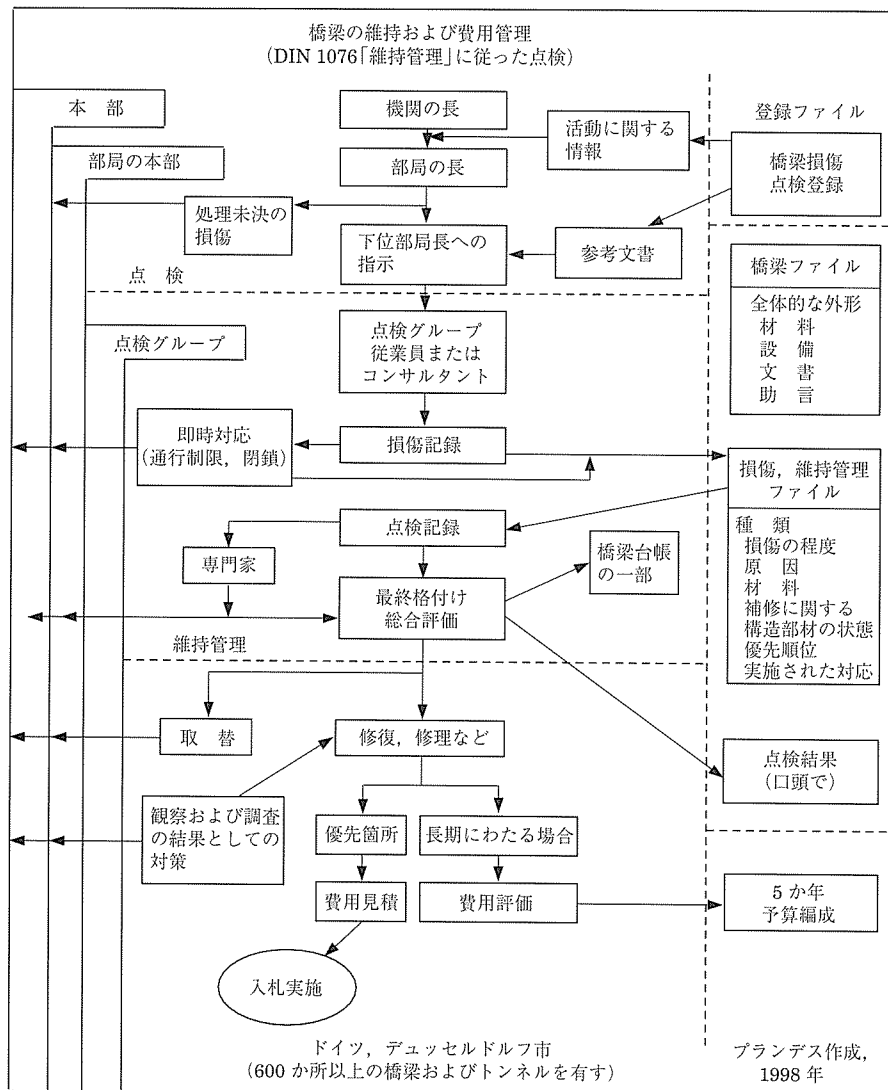


図-7 デュッセルドルフ市のBMSの流れ(概要図)<sup>9)</sup>

different. Dr. B. S. Yanev, director, Bridge Inspection & Bridge Management, New York City Dept. of Transportation, tells us in his recent contribution<sup>10)</sup>, that since 1964 no new bridges have been built in New York City, however, billions of \$ had to be spent to maintain all the traffic lines and bridges. There are not enough well educated engineers in this field and the development of reliable methods to evaluate the bridges accurately is in its infancy. Education of civil engineers must urgently meet the new challenge<sup>11)</sup>.

は、最近の論文<sup>10)</sup>の中で、1964年以降、ニューヨーク市では新設橋梁はまったく架設されていないが、すべての交通路線および橋梁群を維持管理するために数十億ドルが費やされたと述べている。また、この分野には十分な教育を受けた技術者がおらず、橋梁を正確に評価するための確実な手法の開発は、まだ初期段階である。土木技術者に対する教育は、緊急を要する新たな課題になっており、早急な対応が必要である<sup>11)</sup>。

References 参考文献

1) DIN 1076 Strassen- und Wegbrücken. Nov. 1999.  
 2) Standfuss, F., Abel, M. and Haveresch, K.-H.: Erläuterungen zur Richtlinie fuer Betonbruecken mit externen Spanngliedern. Beton- und Stahlbetonbau May 1998.  
 3) Unter Druck. Spezialfahrzeug zur Brueckenpruefung. Fernfahrer No. 3, 2002.  
 4) IABSE Congress Lucerne 2000.  
 5) Brandes, K. and Knapp, J.: Long-term Monitoring of Prestressed Concrete Bridges of the new Railway Main Station of Berlin: Lehrter Bahnhof. IABMAS Conference, Barcelona, July 2002.  
 6) Uomoto, T. (Editor): Non-Destructive Testing in Civil Engineering. Tokyo, April 2000.  
 7) Compendium zerst Örungsfreie Pruefungen im Bauwesen. BAM 1992.  
 8) Casas, J. R., Frangopol, D. M. and Nowak, A. S.: Bridge Maintenance, Safety and Management. Proceedings of 1st International Conference on IABMAS, Barcelona 2002.  
 9) Vollrath/Tathoff: Handbuch der Brueckenstandhaltung. Beton-Verlag 1990.  
 10) Yanev, B. S.: The steel bridges of New York. Stahlbau 71, 2002.  
 11) Bruehwiler, E.: From Design to Examining. Structural Engineering International, May 1995.

(宮本文徳 訳)

【2002年11月26日受付】