

合成桁について

田 原 保 二*

1. 合成桁の概念およびその歴史

鋼道路橋設計の慣用計算法では、鉄筋コンクリート床版の支間方向の荷重負担作用は考慮されなかつた。しかし実際の橋梁荷重試験による応力・タワミ量からコンクリート床版はその自然の付着力によつて鋼桁と共同して荷重を負担していることがわかつた。従つてコンクリート床版の剛性を積極的に設計に利用しようとする研究が第二次世界大戦の頃からドイツ・スイス・アメリカなどでさかんに行われるようになった。著名な外国の実験的・理論的研究としては、1941年のドイツの Maier Leibniz¹⁾、1944年のスイスの Ros²⁾、1948年のアメリカの Siess³⁾、1953年のドイツの Konrad Sattler⁴⁾、などの論文をあげることができる。またわが国においても数年来、主として阪大の安宅教授、大阪市大の橋教授、京大の小西、成岡教授、建設省土木研究所、大阪市、東京都において模型のみならず、実橋についての種々の研究が行われてきた。合成桁特有の問題は、まずいかにして完全に鉄筋コンクリート床版と鋼桁とを一体として外力に抵抗せしめるかであり、初期の研究は主としてこの結合材、すなわちジベルの研究に向けられていた。続いて設計上問題となるコンクリート床版と鋼のヤング係数の比、コンクリート床版のクリープ、硬化乾燥収縮、コンクリート床版と鋼桁の温度差、コンクリート床版の有効幅、床版の最小厚、主桁間隔、安全率および許容応力度などが研究されてきた。合成桁の観念は在来の上路鉄筋コンクリート床版鋼桁にただちに導入されるものであるため、その実現化は急速で、アメリカでは合成桁示方書 (ASAHO 示方書) が 1949年に作成され、ドイツでは合成桁に関する施工法が 1950年7月に、合成桁設計基準 DIN 1078 は 1953年12月に起草されている。本邦では目下道路橋合成桁示方書案が青木楠男博士を委員長とする鋼道路橋設計示方書委員会が審議中である。

2. 合成桁設計計算の諸問題

(1) ジベルと合成鉄筋

ジベルとしては、荷重をうけた場合に変形の少ないものがのぞましい。ジベルとしてはわが国、ドイツでは直方体、馬蹄形のものも多く使われている。1コ当りのせん断力は 10t くらいまでは直方体ジベルでもよいが、

それ以上の荷重をうけるものについては、馬蹄形ジベルがのぞましいとされている。この種ジベルについてはドイツの Graf の実験⁵⁾、本邦の橋教授の実験⁶⁾がある。アメリカでは channel ジベルが多く使用されており、アメリカの Siess³⁾の研究がある。合成鉄筋は床版の浮き上り防止を主目的とし、付加的にズレ力の一部を負担する。また最近ではアメリカにおいて棒状のスタッドジベルを使用する研究が行われ、すでに実施されている。

(2) ヤング係数

鋼とコンクリートとのヤング係数の比 n は断面設計上最も重要な要素である。ドイツではコンクリートの品質により $n=7.0\sim 5.3$ に変化させている。本邦では $n=10$ が慣用されているが、普通の床版コンクリートでは、 $n=7, 8$ 程度が実験的に最もよく適合するように思われる。ドイツでは Herbert Frölich⁷⁾、本邦では成瀬教授⁸⁾の実験研究がある。

(3) 床版の有効幅

幅の広いフランジの有効幅は従来版厚の何倍かであらわす Faust の公式が適用されてきた。これは板の座屈から制限を設けたものであるが、コンクリート床版の荷重分担という見地から、その応力分布からも有効幅を制限することが必要になつてくる。この意味から DIN 1078, 7, 7 項にフランジ幅 b と支間 l との函数として有効幅 λ が規定してあるのは合理的である。ドイツでは Hubert Rüsche⁹⁾、本邦では合成桁に関して筆者¹⁰⁾の研究などがある。

(4) コンクリート床版のクリープ

死荷重に対しても合成桁として作用する桁ではコンクリート床版のクリープによつてコンクリート床版から鋼桁への応力の移動が生ずる。この計算にはクリープ度 φ (塑性変形量/弾性変形量) が基本となる。本邦ではまだこの値に対する研究が十分行われていないため、DIN 4227 を参考としているが、普通の場合 $\varphi=2$ 程度としている。クリープの計算法には次に述べる2つの方法がある。

a) コンクリートのヤング係数 E のかわりに理想的ヤング係数 E_t を使用して応力を計算する方法で E_t として次の値を用いる¹¹⁾。

$$E_t = \frac{E_0}{1+\varphi}$$

b) 時間 dt 間における長さの変化および偏差角の変化を求めて微分方程式を作成しこれを解いた式を用い

* 正員 建設省土木研究所 橋梁設計室長

る¹²⁾。

a) はコンクリート床版がうける荷重が変化しないとき精密解となるが、実際には変化するのでその意味では近似解であろう。しかし普通の断面では b) の精密解に比してその誤差は数%にすぎない。ドイツでは Konrad Sattler の理論的研究¹⁾ が著名であり、本邦でも筆者¹¹⁾ の研究がある。

(5) コンクリート床版の硬化乾燥収縮

コンクリート床版は硬化乾燥にともない収縮するので、これによつて生ずる応力が付加されなければならない。この計算の基本となる収縮量については本邦では合成桁としては、まだ十分研究が行われていないため、DIN 4227 を参考としている。収縮はコンクリートの強度の弱い初期に多くおこるので、4) で用いたクリープ度より大きい値を用いることが合理的で、普通の場合 $\varphi = 4 \sim 5$ 程度が適当であると思われる。この計算方法としては

a) コンクリートと鋼の境界面においてズレがないという条件を使用する計算法と

b) シベルの滑動を考慮した計算法がある。

a) については H. Fröhlich の研究⁷⁾、b) については上記の筆者の研究¹¹⁾がある。短支間については b) で求めた応力が数%小さくできるが、実用上の支間ではほとんど一致する。本計算についても、(4) で述べた理想的ヤング係数を使用する方法と微小時間 dt 間の変形を考慮した計算法があるが、いずれの場合も大差ない値がえられる。ドイツの K. Sattler¹⁾ の研究が著名である。

(6) 温度差

コンクリート床版と鋼桁との温度差によつて生ずる応力で、温度差としていかほどが適当であるか問題になるが、本邦では一般的に $\pm 10^\circ \sim 15^\circ \text{C}$ が適当であると思われる。計算法は(5)の場合に述べた a)、b) の考え方がある。両法では短支間の場合少しの差異が認められるが、実用支間ではほとんど差異は認められない。硬化乾燥収縮は徐々に生ずるからクリープを考慮してよいが、温度差は短時間で生ずるからクリープを考慮してはならない。鋼桁、床版内の温度分布、応力度分布と外気温の関係などについては、京大の成岡教授の貴重な実験的研究¹³⁾がある。

(7) 床版の最小厚

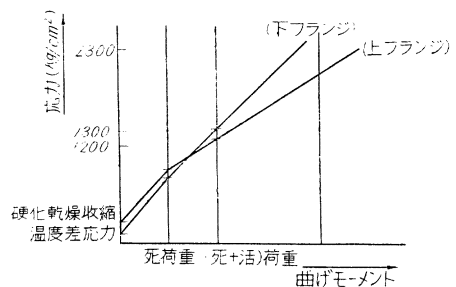
床版が鋼桁と一体となつて支間方向の荷重を負担するためには、床版に支間方向のキレツが生じてはならない。従つて従来の鋼桁橋の床版最小厚より、若干厚くすることがのぞましいと考えられる。もちろん、最小厚は上述のほか構造物の耐久性などをも考慮して最終的に決められるべきものである。DIN 1073 の 6, 11 項で規定してある最小厚をわが国の示方書に適用すると、一等

橋では 18~19 cm となる。

(8) 安全率および許容応力度

構造物として普通の概念からいえば、従来の鋼桁橋とひとしい安全率が要求されるのであるから、鋼に比し、コンクリートの安全率はやや高めておくべきである。多くの破壊試験においては、鋼断面で破壊するような設計でも、表面上はコンクリートで破壊したように見えるため、コンクリートの安全率が低いのではないかと懸念されることがあるが、それは最初鋼下フランジが降伏した場合でも(この降伏によつて桁は大きな変形量をおこす)鋼の降伏ヒズミが大きいのにに対しコンクリートの破壊までのヒズミ量が少ないため、コンクリートが先に破壊するのである。従つて、鋼に所定の安全率をえきせておけば合成桁として少しも従来の鋼桁橋に比し、安全率はおちていないのである。逆に、次に述べる理由で鋼桁については高い安全率がある。合成桁では活荷重による応力増加率は床版コンクリートの硬化乾燥収縮およびクリープと死荷重によつて生ずる応力増加率にくらべてかなり緩であり、特に上フランジについてこの性質はいちじるしい(図-1 参照)。かつ、限界変形を考慮する場合、増加するのは活荷重だけである。従つて上フランジに対しては許容応力を増加することがのぞましい。どれくらい増加させてよいかは、なお検討の余地はあるが、筆者の研究の結果によれば、15%程度が適当と思われる。クリープ、硬化乾燥収縮は必ず生ずるものであるから主荷重と考え、原則的には許容応力を増加しないが、上述の理由で上フランジにだけは増加を認める方がむしろ合理的であろう。温度差は従荷重と考え、これを考慮するとき、15%程度の許容応力を増すことがのぞましい。

図-1



3. 架 設

死活合成桁では死荷重を合成させるために次に述べる種々の方法が考えられている。

(1) 中間支保工の使用

コンクリート床版打設前に鋼桁のみを支保工で支持しコンクリート床版を打設し所要の強度に達したとき、支保工を除去する方法で、一般にはこの方法がよく用いられている。しかし、コンクリート床版打設から所要強度

に達するまでの間、特にコンクリート打設直後において、支保工の沈下が見られるので、あらかじめ、この量だけの押し上げを必要とする。

(2) 桁に frame を取りつけてプレストレスする方法

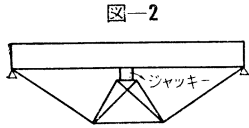


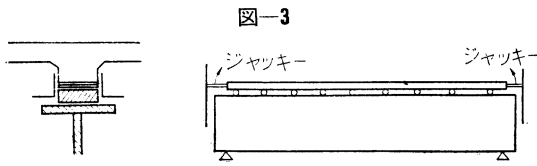
図-2 のように桁の下に frame を取りつけてプレストレスする方法で、この方法によるとかなり信頼しうる死活合成桁ができる。本法はいくぶん費用が高くなるが標準化すれば frame の転用がきくのでこの工法についても研究の余地があると思う¹⁴⁾。

(3) プレストレス材を用いる方法

鉄桁のみにプレストレスを加えておき、コンクリート床版を打設し所要強度に達したときプレストレス材をとる方法である。この工法によれば信頼しうる死活合成桁がえられるが、プレストレス材のアンカー部に費用がかかる。本法も(2)の場合と同じく、わが国では将来の問題として十分研究され、実用化されることが期待される。

(4) ジャッキを用いてプレストレスする方法

図-3 のようにコンクリート床版と鉄桁上フランジの間にローラーを入れて絶縁しておき、コンクリート床版が所要強度に達したとき、両端からジャッキでプレストレスし、コンクリート床版と鉄桁上フランジとをリベットなどで結合したのち、ジャッキをとる方法でドイツの Franz Dischinger¹⁵⁾ によつて研究されている。



4. 支間、主桁間隔と経済性の問題

通常の合成桁の適用スパンは 15~40 m 前後である。あまりにスパンが小さいと合成断面の中立軸がコンクリート床版中に入ること、およびジベルが割高になるため不経済となる。またスパンが大きくなりすぎると、コンクリートの許容応力を超えること、および一様性のコンクリートを同時に打つことがむずかしくなるなどの理由でのぞましくない。主桁間隔は実用の範囲内では大きい方が経済的になるが、あまり大きいのは、2. (7) で述べた理由でのぞましくない。1.5~2.5 m くらいが適当と思われる。よく設計された合成桁では 10~30% 鋼材が節約される。以上の問題については筆者の研究¹⁶⁾、安宅教授の研究¹⁷⁾がある。

5. 各種実橋の実験結果

単独合成桁としてまた、合成桁橋として次に述べる種

々の実験が行われてきた。

(1) 耐荷力

単独合成桁については荷重載荷を行い、応力・タワミを測定しつつ破壊する方法がとられた。本邦では建設省高野 務技官と土木研究所の共同実験研究がこの種の最初のものであつた。実橋については載荷試験の応力・タワミを理論値と比較検討し、耐荷力を推定する方法がとられているが、いずれも良好な実験結果をえている。本邦ではすでに多くの合成桁橋について試験が実施されたがそのおもなものに小西教授の研究¹⁹⁾がある。

(2) 死荷重の合成

死活合成桁においては、死荷重の合成が前提条件であるから、死荷重が合成されたかどうかを、実橋について確かめなければならない。タワミ・応力をコンクリート床版打設後から中間支持除去まで測定し、その結果から判定する方法がとられている。いずれも実測の資料としては良好な結果がえられているようであるが、間接的測定法によるので、全幅の信頼度はおききたいきらいがある。興味あるものとしては、建設省坂田技官²⁰⁾、小西教授¹⁹⁾、筆者²¹⁾の研究がある。

(3) コンクリート床版のクリープ、硬化乾燥収縮による応力

本邦においても、若干実験が行われたが、いずれも失敗に終わっているように思われる。それは測定が長期を要すること、気象条件の規正が困難なこと、測定値が小さいため測定器の精度誤差内に入つてしまうからである。これについては、ドイツの K. Klöppel と H. Weihermüller が Darmstadt において行つた貴重な実験報告²²⁾がある。それによるとコンクリート床版の硬化乾燥収縮による応力変化については、上述の理由で良好な結果をえていないが、クリープ応力については等二径間連続桁の中間支点を沈下させ、その支点力の変化から計算で求め、良好な結果をえている。それによると DIN 4227 で規定しているクリープ度 ϕ 、および諸々の計算法の妥当性が認められる。

6. 現在の研究問題

現在、諸外国、本邦で研究されている新しい問題について述べてみよう。

(1) 合成トラス橋 (Fach werk-verbund träger)

支間が増大するにつれて、鉄桁よりもトラス橋の上フランジとして、コンクリート床版を合成することが経済的見地からのぞましい。ドイツでは K. Sattler¹⁾、本邦では福田教授²³⁾の研究がある。

(2) プレストレスト コンクリート合成桁橋

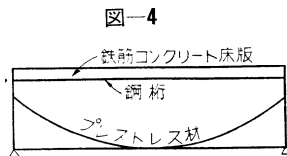
プレストレスト コンクリートを架設したのち、打設するコンクリート床版を合成する方法である。この場合のジベルに関しては、なお、研究の必要があると思われ

る。この種の合成桁については建設省奥田秋夫、安部清孝両技官の研究²⁴⁾がある。両氏の報告にある石川県津幡川橋は、本邦において試みられた最初のプレストレストコンクリート合成桁橋である。

(3) プレストレスト鋼桁，活荷重合成桁

死活合成桁では死荷重の合成に対する懸念があり，破壊荷重試験によれば実用断面では死活合成桁と活荷重合成桁とでは，破壊に対する耐荷力に大差がないので，2. (8) で述べた上フランジの許容応力の増加を認めれば，活荷重合成桁の使用の方が最も合理的，経済的と考えられる。合成桁では上フランジの節約はいちじるしいが下フランジはあまり節約されない。図-4 のように鋼桁に

プレストレスを加えると下フランジはいちじるしく節約され，上フランジはあまり節約されない。従つて鋼桁に



プレストレスを加え，そのち活荷重合成桁にすれば，両方の長所をとり入れることができるので，いちじるしく経済的な設計を行うことができる。この種の合成桁は本邦でも目下研究中の段階にある。ドイツでは，1949年に Fr. Dischinger がこの構想について理論的発表²⁵⁾を行つている。つづいて Emil Burkhardt によつて，Neckar 河に架設された支間 34 m の単純支持街路橋の実例²⁵⁾，Hans Wenk によつてモンタパウルに架設された支間 37.8+50.4+37.8 m の連続自動車道²⁶⁾の実例が発表されている。

7. 外国および本邦の著名な例

著名な外国例としては支間 45 m，総桁高 1.6 m のフリーデンスドルフのラーン橋梁，支間 21 m 全溶接のオイスキルヘンのエルフト橋梁，および 7. (3) で述べたプレストレスト鋼桁活荷重合成桁がある。本邦で初期の合成桁は 1952 年大阪に架設された活荷重合成桁としての神崎橋，鶴見川に関東地方建設局の手で架設された死活合成桁としての支間 15.5 m の鶴見川橋，1954 年東北地方建設局が秋田県に架設した活荷重および死荷重の一部を合成する支間 21 m の米白橋などがある。支間の増大するにつれて活荷重合成桁橋が用いられるようになってきた。

1954 年大阪府に架設された支間 36 m の西条大橋，1955 年京都市に架設された支間 28.6 m，37 m の白雲橋，八榎橋が著名である。合成箱桁橋はその他にも続々と採用されつつある。鋼桁の代りにトラスを用いた合成トラス橋として 1955 年新潟県に中宿橋が架設された。

合成桁は道路橋としてのみならず，鉄道橋にも応用されてきた。鉄道橋では死荷重に比して，活荷重の占める割合が大きいため，活荷重合成桁としても大いにその利

写真-1 格子合成桁橋（飯塚橋）

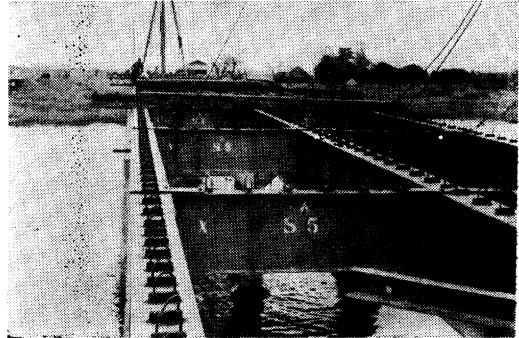


写真-2 合成箱桁橋（西条大橋）

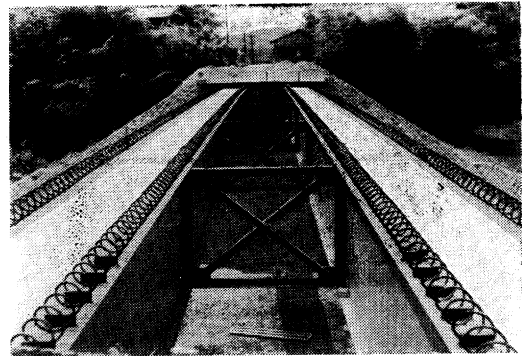
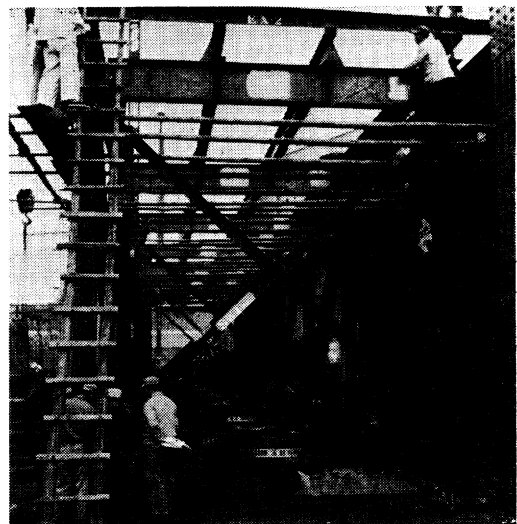


写真-3 合成トラス橋（中宿橋）



点を活用することができる。東京の摩利支天架道橋，忍川架道橋²⁷⁾は活荷重 KS-18 を用いた支間 19 m の合成桁鉄道橋である。

9. むすび

以上合成桁の概念，および歴史と設計上最も問題となる諸点，および経済性と目下の研究問題について簡単に述べたが，詳細は参考文献を参照されたい。目下，本邦

の合成桁の示方書は審議未了であるため、設計者としては多くの不便を感じるのが実状である。本文はいくぶん筆者の独断的な考察に走つたきらいもあるかと思うが、目下各方面で研究が行われており、上に紹介した諸研究の結果とあわせて、近くわが国独自の設計、施工基準を確定することが急務とされている。それまでの暫定的なよりどころとして、内外の研究試験の情勢を紹介することも無意味としないので、あえて本文を草した次第である。他の有意義な研究についても十分意をつくしえなかつたことをお断わりするとともに、本文がいささか諸賢の参考となれば幸甚である。

参 考 文 献

- 1) Maier-Leibniz: Bautechnik, 19 1941 s. 265~270
- 2) Ros: Träger in Verbund-Bauweise. Eiden Mat und Versuchsanstalt, Zurich Bericht Nr 149 Zürich 1944
- 3) Siess: Proc. A.S.C.E. 1948 p. 331
- 4) Konrad Sattler: Theorie der verbundkonstruktionen von DR-ing K. Sattler, 1953
- 5) Graf: B.I. 1950 Heft 8 p. 297
- 6) 橋 善雄: 昭.29.9, 合成桁, P.S.C. 研究発表会論文集
- 7) Herbert Fröhlich: Theorie der stahlverbund-Tragwerke. Bauingenieur 1950 Heft 3 s. 80
- 8) 成瀬勝武: 第3回日本道路会議論文集 p. 296
- 9) Hubert Rüschi: Die mitwirkende Plattenbreite bei Plattenbalken, stahlbau 22 1953 Heft 1 s. 12~14
- 10) 田原保二: 幅の広いフランジの有効幅に関する研究, 土木研究所報告, 92 号の 4
- 11) 田原保二: 米白橋 (合成桁) の設計について, 道路 1954, 4. p. 144~151
- 12) 田原保二: 合成桁の設計及び架設について, 第3回日本道路会議論文集 p. 305
- 13) 成岡昌夫: 新喜多大橋の床版, 鋼桁の温度の測定並びにこれによる床版の熱応力の推定, 昭.31.9.7, 実在橋梁, 構造物の応力測定及び測定結果に関する研究発表論文集
- 14) 比留間 豊 合成桁の施工について, 第3回日本道路会議論文集 p. 309
- 15) Franz Dischinger: Stahlbrücken im Verbund mit Stahlbteondruckplatten bei gleichzeitiger Vorspannung durch hoch. Bauingenieur 1949 Heft 11
- 16) 田原保二: 合成桁における桁間隔について, 土木技術, 6 巻, 昭.29.3, p. 48~58
- 17) 安宅 勝: 合成桁, オーム社
- 18) 高野 務: 鋼桁の鋼重軽減に関する一考察, 第1回日本道路会議論文集 p. 88
- 19) 小西一郎: 神崎橋の応力, タワミ測定試験, 第2回日本道路会議論文集 p. 133
- 20) 坂田 中: 鶴見川橋 (合成桁) について, 第2回日本道路会議論文集 p. 130
- 21) 田原保二: 米白橋 (合成桁) に関する実験的研究, 土木研究所報告, 91 号の 5
- 22) K. Klöppel, H. Weihermüller: Versuche mit Verbundträgern, Stahlbau 1954 Heft 6
- 23) 福田武雄: 合成トラス橋について (新潟県中宿橋の設計) 土木技術昭.31.4, p. 24
- 24) 奥田秋夫・安部清孝: 津幡川プレストレスト コンクリート合成桁の強度試験について, 土木技術 昭.31.4, p. 14
- 25) Emil Burkhardt: 単純支持街路橋: Strassenbrücke über den Schiffahrtskanal zu Lauffen am Neckar, Bautechnik 1955 Heft 7 s 238~241
- 26) Hans Wenk の連続自動車道: Neubau der westlichen Fahrbahnseite für die Autobahnbrücke bei Montabaur. Stahlbau 1954 Heft 6 s. 129~134 p. 31~34
- 27) 忍川架道橋: 合成桁鉄道橋の一設計例, 土木技術, 昭.31.4 p.31~34

書 評

計算機の自動操作法 谷本勉之助著 佐々木書店 刊

著者谷本氏の土木工学における研究は学会刊行物その他ですでに広く知られているが、今回上記の著書の刊行を見るに至つた。常に座右に備えて計算機を利用するに当たりたえず工夫の眼を注ぎ、改善の努力を惜しまなかつたその成果が、この著書となつて現われたのであろう。

それゆえ本書は理論書ではなく、すべて実用のための説明ないし解説書であり、従つて具体的な例題が豊富に記載されている。また自動操作法と標題には掲げてあるが、内容よりすればそれにとどまらない。計算機活用法でもあり、なお計算機の一般的な取扱ひ説明書でもある。

乗除計算さえできれば計算機の使命は果たたと一般に考えがちであるが、著者のいわんとする自動操作法

はそれよりはるかに用途が広げられている。すなわち乗除した数の加減とか、逆数の計算などは中間で数値を紙に書きとどめることなく、一気に結果まで出せる方法を述べているのである。これを曲芸といつてはいけない、時間と労力をはぶき、かつ精確さを保つゆえんであると著者は強調する。

一度座右に備えたからには数値計算のあらゆる過程に計算機を活用しなくてはもつたない。三角函数、対数表と併用すれば計算過程が楽になる、といつたような説明も多い。

計算機をまわすことにかけては人後に落ちなくても、その手入れには一向に無関心な人がある。計算機も動かす器械なのだから、ときには掃除し、注油しなければいけない。そ

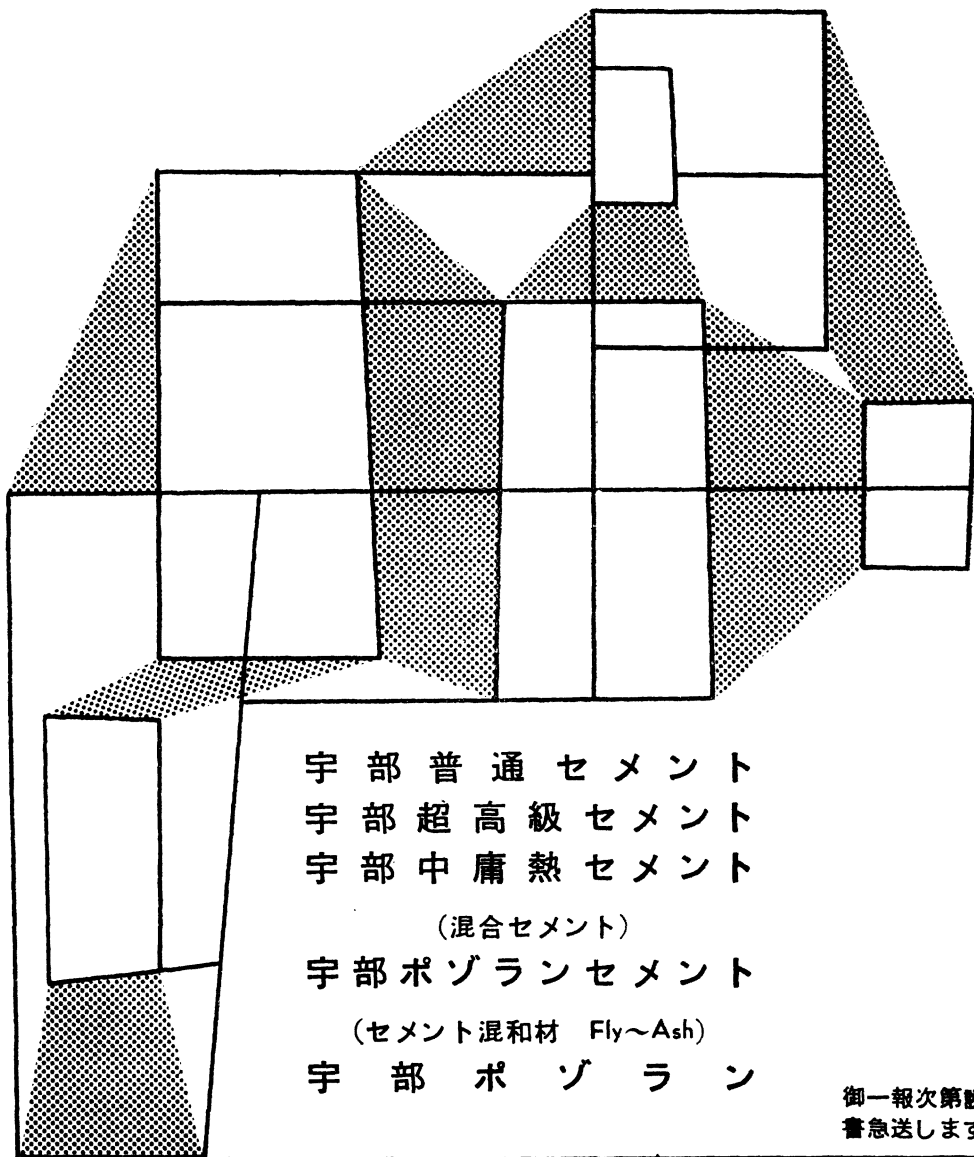
れでいてその取扱ひ方法は案外知られていない。本書は長く性能を維持するための操作注意、注油の方法など、いわゆる取扱ひ説明も行つている。そしてさらに、得てして陥りやすい位取りの錯誤、桁違い、不要な数列の書取りに関する対策も怠らない。

要するに一応満足に使いこなしているつもりでいた計算機をさらに効果的に活用し、かつ誤りを少なからしめんとするのが本書のねらいであると思われる。記述に精確があり、また内容の配列に考慮の余地があるとはいえ、土木にかぎらず全般の計算機使用者の一読に値する好著である。

著者: 正員 工博 信州大学工学部教授, A 5 版 170 ページ, 上製 定価 260 円, 昭和 31 年 12 月 10 日 発行



宇部セメント



宇部普通セメント
宇部超高級セメント
宇部中庸熱セメント

(混合セメント)

宇部ポゾランセメント

(セメント混和材 Fly~Ash)

宇部ポゾラン

御一報次第説明
書急送します



宇部興産

沖の山炭、山陽無煙炭、宇部碓安、カプロラクタム、宇部鉄工