

下路桁式地中構造物の荷重分配作用の実測

OBSERVATION OF LOAD DISTRIBUTION ON UNDERGROUND STRUCTURES TYPED THROUGH BRIDGE

山下 彰彦* 小山幸則** 喜田浩*** 菊池保孝****

By Akihiko YAMASHITA, Yukinori KOYAMA, Hiroshi KITA and Yasutaka KIKUCHI

URT Method (Under Railway/Road Tunnelling), Pipe Beam Method, PCR (Prestress Concrete Roof) Method and NNCB (Nihonkokuyutetsudou・Nishimatsu Circular Beam) Method are often used to construct underground passage-structures without disturbing surface structures, such as railways and highways. The passage-structures so constructed are composed of two main beams and some dozen of cross beams connected with each other along their length.

This paper is concerned with observation of load distribution on both Ishimatsu passage-structure and two experimental structures.

Key Words: observation, passage-structure, load distribution

1. まえがき

既設鉄道線(又は道路)に立体交差する道路(又は水路等)を新規に建設することがよくある。既設鉄道路盤の盛土中にジャッキを使って水平方向に構造部材を押し込んで構造物構築を行う等、路盤盛土を上から開削することなく構造物構築を行う方法を非開削工法と称している。非開削工法は、工事のための用地買収が少なく、かつ列車運行への支障がほとんどないという利点があるので、開削工法やこ線橋に替わり、近年採用される割合が高くなっている。

非開削工法は、土の掘削前に、線路路盤崩壊の防護工として、掘削予定空間(新設の道路、又は水路等が入ることになる)の鉛直方向すぐ上面を複数本のパイプでおおう処置をする。いわゆる、補助工法のパイプルーフ工の処置をする。

非開削工法に該当するものとして、表-1に示すように、幾つかの工法が考案されている。その中には、パイプルーフ工に着眼して、パイプルーフ工を発展させて考案された工法がある。その工法は、掘削予定空

*正会員 工修 (財) 鉄道総合技術研究所 数理解析 主任研究員 (〒185 東京都国分寺市光町2-8-38)

**正会員 (財) 鉄道総合技術研究所 トンネル研究室長 (〒185 東京都国分寺市光町2-8-38)

***正会員 住友金属工業(株) 土木技術研究室長 (〒314-02 茨城県鹿島郡波崎町大字砂山16)

****正会員 工修 JR西日本旅客鉄道(株) 鉄道事業本部施設部工事課長 (〒314-02 大阪市北区大深町1-1)

間の入口方と出口方にがっちりとした主桁を設けることにより、図-1に示すように、主桁2本と継手付横桁複数本で橋梁構造を作り、活荷重と死荷重等を上載荷重として受けるもので、下路桁形式とよばれている。

下路桁形式に該当するものに、URT (Under Railway/Road Tunnelling) 工法、パイプビーム工法、PCR (Presstressed Concrete Roof) 工法、NNCB (日本国有鉄道・西松式 Circular Beam) 工法がある。この4つの非開削工法の橋梁構造は、共通点として、横桁が強度、剛性の期待しうる継手

で長手方向に相互に連結されているので、横桁相互間の荷重分配作用があり、同時に主桁と横桁との間の荷重分配作用がある。相違点は、横桁構造が異なる。URT工法が薄肉矩形断面鋼梁であり、NNCB工法がルーフパイプとプレキャストコンクリート製サーキュラービームの2重構造の梁であり、PCR工法がプレストレストコンクリート製の正方形断面の梁であり、パイプビーム工法が鋼管パイプの梁である。

上記の下路桁形式の構造物を本論文では、下路桁式地中構造物と名付ける。下路桁式地中構造物は、実構造物で設計する際に、継手による横桁相互間の荷重分配作用の評価をどのようにするか、また主桁と横桁の間の荷重分配作用の評価をどうするかが、構造計算法に大きな影響を与えた。

URT工法、PCR工法とNNCB工法は、橋梁構造自身を本体構造物としたため、主桁が1径間のものが多く、せいぜい4径間である。そして、主桁支点は、単純支持とするものが多い。そのため、主桁は、RC構造でつくられることも加わって、断面積が大きくて、桁重量の大きいものとなり、主桁支点部でねじり回転変位が生じない場合が多い。横桁相互間の荷重分配作用と主桁と横桁の間の荷重分配作用の両者を同時に満たす構造計算法がなかったため、URT工法、PCR工法とNNCB工法は、構造解析に格子計算法を原則とした¹⁾。格子計算法だと、主桁と横桁間の荷重分配作用は、下路桁式地中構造物の構造モデルを主桁と横桁から構成される立体ラーメンとし、主桁と横桁を剛結にすることにより、考慮できるが、継手による横桁相互間の荷重分配作用が考慮できない。

下路桁式地中構造物の継手による横桁相互間の荷重分配作用の研究は、パイプビーム工法の設計の構造計算法開発の中で、まず、後藤等^{2) 3)}で行われた。横桁鉛直変位、横桁ねじり角、横桁継手作用力等を三角級数で表現し、外力および断面力が作用してつり合った状態での全ポテンシャルエネルギーを考え、全ポテンシャルエネルギー最小原理から、横桁相互間の荷重分配作用を求めたものである。実測値は、模型実験²⁾、実構造物現場計測⁴⁾で測っている。横桁と主桁が斜角の位置関係にある場合については、後藤・松村・近藤・高瀬⁵⁾の研究がある。横桁1本を1要素として、梁の曲げと梁のねじりの基本式を積分方程式でグリーン関数を用いて解き、継手の横桁間相互の接続条件から、横桁相互間の荷重分配作用を求めたものである。パイプビーム工法は、主桁が本体利用されない仮設構造なので、主桁を多径間連続のラーメン構造とするため、主桁剛性を無限大と近似している。この近似のもとで、継手による横桁相互間の荷重分配作用だけを取り扱っている。

本論文は、下路桁式地中構造物の荷重分配作用に関するものである。まず、主桁と横桁間の荷重分配作用と継手による横桁相互間の荷重分配作用を同時に考慮できる解析法を提案する。そして、JR西日本北陸本線石松架道橋での現場測定から、実荷重による下路桁式地中構造物の荷重分配作用の確認と構造特性の検討をする。

表-1 既設鉄道線と新設道路の立体交差工事の工法

開削工法	URT工法
こ線橋	パイプビーム工法
	PCR工法
非開削工法	NNCB工法
	フロンテジャッキ工法
	ESA工法
	メッセル工法

2. 解析手法と計算条件

横桁が3本の場合の座標と符号のとり方を図-2に示す。主桁は、2本のうち、左側のものを西側主桁、右側のものを東側主桁と表現しておく。横桁は、手前にあるもの、つまり z 座標の小さい物から順に、1番目、2番目、3番目、 $\dots$ 、 n 番目と名付け、端部で主桁に結合している。 Q_{MW1} 、 M_{MW1} 、 T_{MW1} は、西側主桁端部の z 座標の小さい方でのせん断力、曲げモーメント、ねじりモーメントであり、添字 m で主桁を示し、添字 w で西側を示し、添字 1 で z 座標の小さい方を示した。 Q_{MW2} 、 M_{MW2} 、 T_{MW2} は、西側主桁端部の z 座標の大きい方でのせん断力、曲げモーメント、ねじりモーメントであり、 Q_{ME1} 、 M_{ME1} 、 T_{ME1} 、 Q_{ME2} 、 M_{ME2} 、 T_{ME2} は、西側に対応した東側主桁のものである。 $Q_{1(i)}$ 、 $M_{1(i)}$ 、 $T_{1(i)}$ は、 i 番目横桁端部の x 座標の小さい方のせん断力、曲げモーメント、ねじりモーメントであり、 $Q_{2(i)}$ 、 $M_{2(i)}$ 、 $T_{2(i)}$ は、 i 番目横桁端部の x 座標の大きい方のせん断力、曲げモーメント、ねじりモーメントである。

横桁は図-3に示すように隣接の横桁と継手をモデル化した鉛直変位と回転角におおの独立に比例した力を生ずるばね（継手せん断ばね定数 K_{JY} 、継手回転ばね定数 K_{JR} ）によって長さ方向に相互に連結されている形で表現した。 $q_{j(i)}^{\downarrow}$ 、 $q_{j(i)}^{\uparrow}$ 、 $m_{j(i)}^{\downarrow}$ 、 $m_{j(i)}^{\uparrow}$ は、 i 番目横桁の左側継手部に生ずる分布せん断力、右側継手部に生ずる分布せん断力、 i 番目横桁の左側継手部に生ずる分布曲げモーメント、右側継手部に生ずる分布曲げモーメントであり、添字 (i) で i 番目横桁を示し、横桁番号と同じ値の添字 i で左側を示し、横桁番号に1加わった値の添字 $i+1$ で右側を示した。

そうすると、西側主桁の曲げは、デルタ関数 δ を用いて j 番目横桁から伝わる集中せん断力 $Q_{CW(j)}$ と集中曲げモーメント $M_{CW(j)}$ を分布鉛直荷重 $p_{YMW}(z)$ に加えることにより式(1)で表現され、西側主桁のねじりはデルタ関数 δ を用いて横桁から伝わる集中ねじりモーメント $T_{CW(j)}$ を分布ねじりモーメント荷重 $m_{MW}(z)$ に加えることにより式(2)で表現できる。同様に、東側主桁の曲げが式(3)、ねじりが式(4)で表現できる。

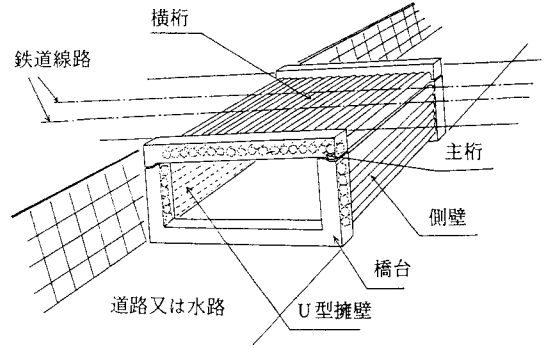


図-1 下路桁式地中構造物

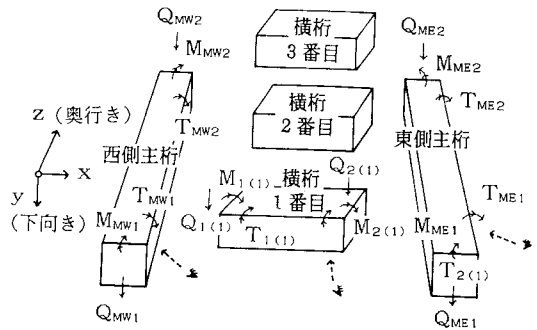


図-2 座標と符号

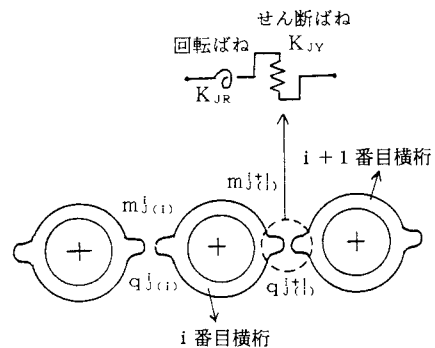


図-3 横桁継手のモデル化

$$E_{MW} I_{MW} \frac{d^4 v_{MW}(z)}{dz^4} = p_{YMW}(z) + \sum_{j=1}^n \{ Q_{CW(j)} \delta(z - z_{W(j)}) + M_{CW(j)} \delta'(z - z_{W(j)}) \} \quad (1)$$

$$G_{MW} J_{MW} \frac{d^2 \phi_{MW}(z)}{dz^2} = -m_{MW}(z) - \sum_{j=1}^n T_{CW(j)} \delta(z - z_{W(j)}) \quad (2)$$

$$E_{ME} I_{ME} \frac{d^4 v_{ME}(z)}{dz^4} = p_{YME}(z) + \sum_{j=1}^n \{ Q_{CE(j)} \delta(z - z_{E(j)}) + M_{CE(j)} \delta'(z - z_{E(j)}) \} \quad (3)$$

$$G_{ME} J_{ME} \frac{d^2 \phi_{ME}(z)}{dz^2} = -m_{ME}(z) - \sum_{j=1}^n T_{CE(j)} \delta(z - z_{E(j)}) \quad (4)$$

ただし、 $v_{MW}(z)$ 、 $E_{MW} I_{MW}$ 、 $\phi_{MW}(z)$ 、 $G_{MW} J_{MW}$ は、西側主桁の鉛直変位、曲げ剛性、ねじり角、ねじり剛性であり、 $v_{ME}(z)$ 、 $E_{ME} I_{ME}$ 、 $\phi_{ME}(z)$ 、 $G_{ME} J_{ME}$ は、東側主桁の鉛直変位、曲げ剛性、ねじり角、ねじり剛性である。 $z_{W(j)}$ は j 番目横桁と西側主桁との結合点の z 座標値。 $z_{E(j)}$ は東側主桁との結合点の z 座標値。 n は横桁の本数である。 $\delta'(z - z_{W(j)})$ は、 $\delta(z - z_{W(j)})$ を z で微分したものの。

i 番目横桁については、曲げが式(5)、ねじりが式(6)で表現できる。

$$EI \frac{d^4 v_{(i)}(x)}{dx^4} = p_{Y(i)}(x) + q_{\downarrow(i)} + q_{\uparrow(i)} \quad (5)$$

$$GJ \frac{d^2 \phi_{(i)}(x)}{dx^2} = -m_{(i)}(x) + r q_{\downarrow(i)} + r q_{\uparrow(i)} - m_{\downarrow(i)} - m_{\uparrow(i)} \quad (6)$$

ただし、 $v_{(i)}$ 、 EI 、 $p_{Y(i)}$ 、 $\phi_{(i)}$ 、 GJ 、 $m_{(i)}$ 、 r は、 i 番目横桁における鉛直変位、曲げ剛性、分布重、ねじり角、ねじり剛性、分布ねじりモーメント荷重、横桁1本幅の1/2の長さである。

西側主桁の鉛直変位 $v_{MW}(\eta)$ 、回転変位 $\phi_{MW}(\eta)$ は、式(1)、(2)について、積分方程式を解くことにより^{6) 7)}、次のように表せる。付録に、式の展開を示す。

$$\begin{aligned} v_{MW}(\eta) = & Q_{MW1} v_M^*(0, \eta) + Q_{MW2} v_M^*(\ell_M, 0) + M_{MW1} \theta_M^*(0, \eta) + M_{MW2} \theta_M^*(\ell_M, \eta) + v_{MW1} Q_M^*(0, \eta) \\ & - v_{MW2} Q_M^*(\ell_M, \eta) - \theta_{MW1} M_M^*(0, \eta) + \theta_{MW2} M_M^*(\ell_M, \eta) - \int_0^{\ell_M} p_{YMW} v_M^*(z, \eta) dz \\ & + \sum_{j=1}^n (Q_{MW(j)} v_M^*(z_{W(j)}, \eta) + M_{MW(j)} \theta_M^*(z_{W(j)}, \eta)) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \phi_{MW}(\eta) = & -T_{MW1} \phi_M^*(0, \eta) - T_{MW2} \phi_M^*(\ell_M, \eta) - \phi_{MW1} T_M^*(0, \eta) + \phi_{MW2} T_M^*(\ell_M, \eta) \\ & - \sum_{j=1}^n (T_{MW(j)} \phi_M^*(z_{W(j)}, \eta)) - \int_0^{\ell_M} m_{MW} \phi_M^*(z, \eta) dz \end{aligned} \quad (8)$$

西側主桁のたわみ角は、式(7)を η で微分すると求まる。

$$\begin{aligned} \theta_{MW}(\eta) = & Q_{MW1} \widetilde{v}_M^*(0, \eta) + Q_{MW2} \widetilde{v}_M^*(\ell_M, \eta) + M_{MW1} \widetilde{\theta}_M^*(0, \eta) + M_{MW2} \widetilde{\theta}_M^*(\ell_M, \eta) + v_{MW1} \widetilde{Q}_M^*(0, \eta) \\ & - v_{MW2} \widetilde{Q}_M^*(\ell_M, \eta) - \theta_{MW1} \widetilde{M}_M^*(0, \eta) + \theta_{MW2} \widetilde{M}_M^*(\ell_M, \eta) + \int_0^{\ell_M} p_{YMW} \widetilde{v}_M^*(z, \eta) dz \\ & + \sum_{j=1}^n (Q_{MW(j)} \widetilde{v}_M^*(z_{W(j)}, \eta) + M_{MW(j)} \widetilde{\theta}_M^*(z_{W(j)}, \eta)) \end{aligned} \quad (9)$$

ただし、 $\widetilde{A}$ は $dA/d\eta$ 。 $v^*(x, \eta) = \frac{1}{12E_{MW} I_{MW}} |x - \eta|^3 + C_1 x^3 + C_2 x^2 + C_3 x + C_4$ 、

C_1, C_2, C_3, C_4 は定数。 $\phi^*(x, \eta) = \frac{|x - \eta|}{2G_{MW} J_{MW}} + C_5 x + C_6$ 、 C_5, C_6 は定数。

$$Q_{MW1} = -E_{MW} I_{MW} \frac{d^3 v_{MW}}{dz^3} \Big|_{z=0}, \quad Q_{MW2} = E_{MW} I_{MW} \frac{d^3 v_{MW}}{dz^3} \Big|_{z=\ell_M}, \quad M_{MW1} = -E_{MW} I_{MW} \frac{d^2 v_{MW}}{dz^2} \Big|_{z=0},$$

$$M_{MW2} = E_{MW} I_{MW} \frac{d^2 v_{MW}}{dz^2} \Big|_{z=\ell_M}, \quad T_{MW1} = G_{MW} J_{MW} \frac{d\phi_{MW}}{dz} \Big|_{z=0}, \quad T_{MW2} = -G_{MW} J_{MW} \frac{d\phi_{MW}}{dz} \Big|_{z=\ell_M},$$

$$\theta_{MW1} = \frac{dv_{MW}}{dz} \Big|_{z=0}, \quad \theta_{MW2} = \frac{dv_{MW}}{dz} \Big|_{z=\ell_M}, \quad \theta_M^*(z, \eta) = \frac{dv_M^*}{dz}, \quad M_M^*(z, \eta) = -E_{MW} I_{MW} \frac{d^2 v_M^*}{dz^2},$$

$$T_M^*(z, \eta) = G_{MW} J_{MW} \frac{d\phi_M^*}{dz} \quad \text{ただし } \ell_M \text{ は主桁長。}$$

東側主桁のものも西側主桁と同様にして表せる。

i 番目の横桁の鉛直変位, 回転変位, たわみ角は, 式(5), (6)について, 積分方程式を解くことにより^{6), 7)}, 次のように表せる。

$$v_{(i)}(\eta) = Q_{1(i)} v^*(0, \eta) + Q_{2(i)} v^*(\ell, \eta) + M_{1(i)} \theta^*(0, \eta) + M_{2(i)} \theta^*(\ell, \eta) \\ + v_{1(i)} Q^*(0, \eta) - v_{2(i)} Q^*(\ell, \eta) - \theta_{1(i)} M^*(0, \eta) + \theta_{2(i)} M^*(\ell, \eta) \\ + \int_0^\ell p_Y(x) v^*(x, \eta) dx - \int_0^\ell q_{1(i)}^* v^*(x, \eta) dx + \int_0^\ell q_{2(i)}^* v^*(x, \eta) dx \quad (10)$$

$$\phi_{(i)}(\eta) = -T_{1(i)} \phi^*(0, \eta) - T_{2(i)} \phi^*(\ell, \eta) - \phi_{1(i)} T^*(0, \eta) + \phi_{2(i)} T^*(\ell, \eta) \\ + r \int_0^\ell q_{1(i)}^* \phi^*(x, \eta) dx - r \int_0^\ell q_{2(i)}^* \phi^*(x, \eta) dx \\ - \int_0^\ell m_{1(i)}^* \phi^*(x, \eta) dx - \int_0^\ell m_{2(i)}^* \phi^*(x, \eta) dx \quad (11)$$

$$\widetilde{v}_{(i)}(\eta) = Q_{1(i)} \widetilde{v}^*(0, \eta) + Q_{2(i)} \widetilde{v}^*(\ell, \eta) + M_{1(i)} \widetilde{\theta}^*(0, \eta) + M_{2(i)} \widetilde{\theta}^*(\ell, \eta) \\ + v_{1(i)} \widetilde{Q}^*(0, \eta) - v_{2(i)} \widetilde{Q}^*(\ell, \eta) - \theta_{1(i)} \widetilde{M}^*(0, \eta) + \theta_{2(i)} \widetilde{M}^*(\ell, \eta) \\ + \int_0^\ell p_Y(x) \widetilde{v}^*(x, \eta) dx + \int_0^\ell q_{1(i)}^* \widetilde{v}^*(x, \eta) dx + \int_0^\ell q_{2(i)}^* \widetilde{v}^*(x, \eta) dx \quad (12)$$

$$\text{ただし, } Q_{1(i)} = -E I \frac{d^3 v}{dx^3} \Big|_{x=0}, \quad Q_{2(i)} = -E I \frac{d^3 v}{dx^3} \Big|_{x=\ell}, \quad M_{1(i)} = -E I \frac{d^2 v}{dx^2} \Big|_{x=0},$$

$$M_{2(i)} = E I \frac{d^2 v}{dx^2} \Big|_{x=\ell}, \quad T_{1(i)} = -G J \frac{d\phi}{dx} \Big|_{x=0}, \quad T_{2(i)} = -G J \frac{d\phi}{dx} \Big|_{x=\ell}, \quad \theta_{1(i)} = \frac{dv}{dx} \Big|_{x=0},$$

$$\theta_{2(i)} = \frac{dv}{dx} \Big|_{x=\ell}, \quad \theta^* = \frac{dv^*}{dx}, \quad Q^* = -E I \frac{d^3 v^*}{dx^3}, \quad M^*(x, \eta) = -E I \frac{d^2 v^*}{dx^2},$$

$$T^*(x, \eta) = G J \frac{d\phi^*}{dx}, \quad \ell \text{ は横桁長。} \quad v^* \text{ は } E I \text{ に横桁のもの, } \phi^* \text{ は } G J \text{ に横桁のものの値を用いる。}$$

主桁と横桁が剛結されている場合, 結合部での i 番目横桁と西側主桁の間に式(13), (14), (15)が成立する。

i 番目横桁と東側主桁の間に式(16), (17), (18)が成立する。

$$v_{1(i)} = v_{MW}(z_{W(i)}) \quad (13)$$

$$\theta_{1(i)} = \theta_{MW}(z_{W(i)}) \sin(90^\circ - \zeta) + \phi_{MW}(z_{W(i)}) \cos(90^\circ - \zeta) \quad (14)$$

$$\phi_{1(i)} = \theta_{MW}(z_{W(i)}) \cos(90^\circ - \zeta) - \phi_{MW}(z_{W(i)}) \sin(90^\circ - \zeta) \quad (15)$$

$$v_{2(i)} = v_{ME}(z_{E(i)}) \quad (16)$$

$$\theta_{2(i)} = \theta_{ME}(z_{E(i)}) \sin(90^\circ - \zeta) + \phi_{ME}(z_{E(i)}) \cos(90^\circ - \zeta) \quad (17)$$

$$\phi_{1(i)} = \theta_{ME}(z_{E(i)}) \cos(90^\circ - \zeta) - \phi_{ME}(z_{E(i)}) \sin(90^\circ - \zeta) \quad (18)$$

ただし、 α は、主桁と横桁の交差角で、主桁から横桁に時計廻りにとった角度。

また、横桁継手部では、 i 番目横桁右と $i+1$ 番目横桁左について、継手相互の位置関係から、次の式が成立する。

$$v_{(i)} + r\phi_{(i)}(x) + q_j^{(i)} / 2K_{JY} = v_{(i+1)} - r\phi_{(i+1)}(x) + q_j^{(i+1)} / 2K_{JY} \quad (19)$$

$$\phi_{(i)}(x) + m_j^{(i)} / 2K_{JR} = \phi_{(i+1)}(x) + m_j^{(i+1)} / 2K_{JR} \quad (20)$$

ただし、 K_{JY} 、 K_{JR} は、横桁継手をばねに置き換えた時のせん断ばね係数、回転ばね係数である。

各桁の鉛直変位、回転変位、たわみ角は、主桁と横桁の結合条件を満たし、かつ継手相互の位置関係を満たす。この結合条件と位置関係から、連立方程式が導かれる。

3. 石松架道橋の現場測定

JR西日本旅客鉄道(株)金沢支社管内加賀笠間・松任間の石松架道橋は、横桁本数が18本であり、主桁と横桁は直角でなく、60度で交差している。横桁の長さは、1619cmであり、横桁の隣接ピッチは117.5cmで、主桁上の隣接ピッチは交差60度であるので135.68cmとなる。主桁は、鉄筋コンクリート製であり、桁の両端が単純支持で、全長2609.6cm、支間長2331.0cmである。主

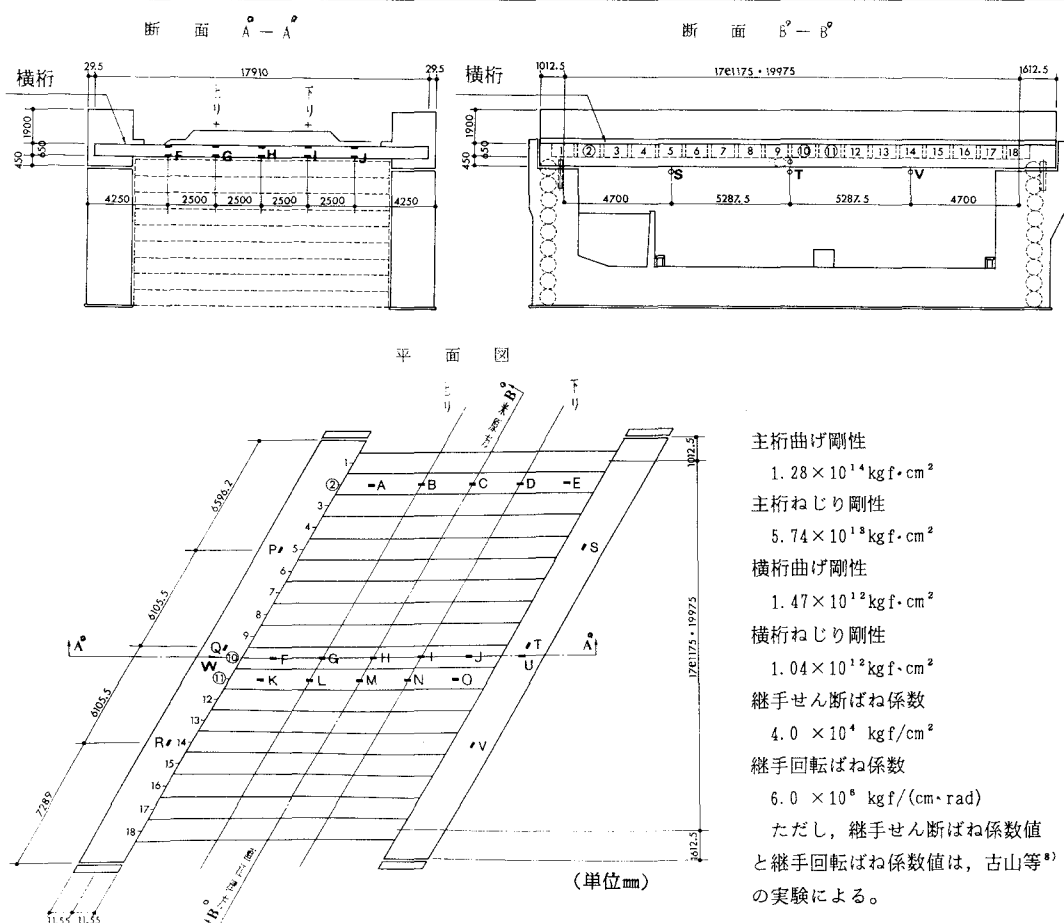


図-4 石松架道橋構造図

桁と横桁はがっちりと結合している。図-4に、石松架道橋の平面図、断面A-A（平面図に示す断面）、断面B-B（平面図に示す断面）と構造物諸元を示す。

測定項目は、列車通過時の列車輪重、各桁の鉛直変位、主桁の鉄筋応力、および横桁の鋼板応力である。

主桁断面を図-5の(a)に示し、横桁（URTエレメント）断面を図-5の(b)に示す。横桁の継手部にコンクリートを充填し、横桁内部に発泡モルタルを充填している。

解析における列車荷重としては、車体重量と乗車旅客重量から設定した輪重を連行集中移動荷重として軌道に鉛直に作用させる。計算対象として、下り特急加越7号と上り特急加越12号をとりあげる。先頭車車体重量約41～44tfであり、乗車旅客重量を約80人×60kgf/人で、約4.8tfとなる。1車体4軸であるから、1軸あたり11.45～12.2tfとなる。軸重を12tfとすると、列車荷重は表-2のようになる。表-3には、線路に貼りつけたレールゲージから測定して読みとった輪荷重を示す。

(1) 桁鉛直変位

表-4に、上り特急加越12号が石松架道橋を走行したときの、横桁、主桁での測定点における現場測定値を示す。各現場測定値は、列車通過時に読み取れた各点での最大鉛直変位量である。表-5に、下り特急加越7号が石松架道橋を走行したときの、横桁、主桁での測定点における現場測定値と計算値を示す。

上り特急加越12号の場合、車体重量と乗客重量からの荷重に比べ、表-3に示したレールゲージからの読みとり列車荷重値は、20%程度大きく、表-4の計算1と計算2の値に反映している。各現場測定値と各計算値との比を比較すると、計算1をみると19点のうち差異10%以内に12点、+11～+20%に4点、-11～-20%に1点、その他2点であり、計算2をみると19点のうち差異10%以内に2点、+11～+20%に4点、+21～+30%に7点、+31～+40%に4点、その他2点であり、計算1が計算2より妥当な結果となっている。

表-2 下り特急加越7号ならびに上り特急加越12号の輪重値と輪重位置

輪重	①	②	③	④
右側レール	6.0	6.0	6.0	6.0
左側レール	6.0	6.0	6.0	6.0
左右計	12.0	12.0	12.0	12.0 (単位tf)

① ② ③ ④ →進行方向

↓ ↓ ↓ ↓

← 2.1 ← 4.25 ← 2.1 (単位m)

表-3 レールゲージから読みとった下り特急加越7号と上り特急加越12号の輪重値

(a) 特急加越7号

輪重	①	②	③	④
右側レール	5.5	5.5	6.1	6.6
左側レール	7.1	6.3	7.5	7.0
計	12.6	11.8	13.6	13.6 (単位tf)

(b) 特急加越12号

輪重	①	②	③	④
右側レール	6.1	6.3	7.0	8.3
左側レール	8.1	7.4	6.7	6.4
計	14.2	13.7	13.7	14.7 (単位tf)

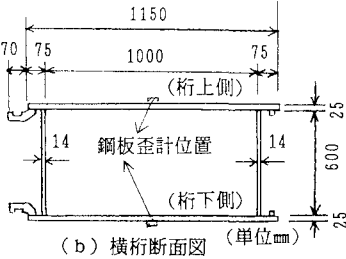
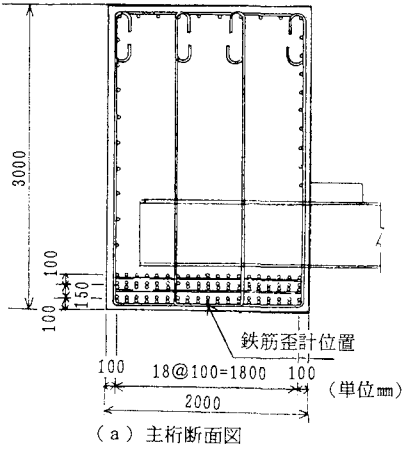


図-5 石松架道橋の桁断面図

下り特急加越7号の場合、表-5に示した計算3と計算4の値から、計算3をみると19点のうち差異10%以内に12点、+11～+20%に3点、-11～-20%に1点、その他3点であり、計算4をみると19点のうち差異10%以内に9点、+11～+20%に4点、+21～+30%に3点、その他3点であり、車体重量と乗客重量からの荷重算定した計算3の方が妥当な結果となっている。計算2に比すると、計算4は現場測定値と計算値に近いものとなっている。下り特急加越7号のレールゲージからの読みとり列車荷重値は、上り特急加越12号のレールゲージからの読みとり列車荷重値に比べ、車体重量・乗客重量からの列車荷重値に近いからである。

列車荷重は、盛土上面の鉄道線路での荷重伝達状態と盛土中の下路桁式地中構造物に伝わった荷重伝達状態とが異なる。そこで、石松架道橋について、列車荷重を分布荷重として、集中荷重のものと比較した。線路部分でのバラスト厚さ25cm、路盤厚さ30cmで、枕木下の荷重分散対象厚さが、 $25 + 30 = 55$ cmである。列車荷重が、まず枕木巾200cmに広がり、バラストのところで鉛直から37度、路盤のところで鉛直から30度に等分布すると仮定するなら、荷重分布巾は、 $200 + 2 \times 25 \times \sin 37^\circ + 2 \times \sin 30^\circ = 272.3$ cmとなる。列車荷重を集中荷重とせず、横桁軸長方向に272.3cm巾で広がる等分布荷重として桁鉛直変位を計算すると、集中荷重としたものとの差異が、1%未満であった。石松架道橋の場合、桁鉛直変位は、横桁への列車荷重載荷を集中荷重としても分布荷重としても差異が小さい。

(2) 主桁の鉄筋応力

表-6に、上り特急加越12号が石松架道橋を走行したときの、測定点P、Q、R、S、T、Vの主桁の鉄筋歪計からの現場測定値と、計算1、計算2を示す。表-7に、下り特急加越7号が石松架道橋を走行したときの、測定点P、Q、R、S、T、Vの主桁の鉄筋歪計からの現場測定値と、計算3、計算4を示す。

表-4 桁鉛直変位最大値(上り特急加越12号走行時)についての現場測定値と計算値の比較

測定位置	現場測定値	計算1	計算2
A	0.43	0.179(0.42)	0.202(0.47)
B	0.74	0.491(0.66)	0.544(0.74)
C	0.96	0.847(0.88)	0.936(0.98)
D	0.89	0.956(1.07)	1.056(1.19)
E	0.51	0.601(1.18)	0.661(1.30)
F	0.68	0.627(0.92)	0.659(0.97)
G	1.08	1.022(0.95)	1.073(0.99)
H	1.25	1.290(1.03)	1.353(1.08)
I	1.19	1.313(1.10)	1.377(1.16)
J	0.86	0.988(1.15)	1.043(1.21)
K	0.63	0.611(0.97)	0.645(1.02)
L	1.00	0.980(0.98)	1.033(1.03)
M	1.27	1.224(0.96)	1.309(1.03)
N	1.24	1.241(1.00)	1.349(1.09)
O	0.90	0.934(1.04)	0.981(1.09)
S	0.36	0.388(1.08)	0.417(1.16)
U	0.53	0.562(1.06)	0.603(1.14)
V	0.34	0.383(1.13)	0.411(1.21)
W	0.37	0.255(0.69)	0.274(0.74)

変位量はmm。計算1は車体・乗車旅客から算定した荷重による。計算2はレールゲージから算定した荷重による。()の数字は計算値/現場測定値を示す。

表-5 桁鉛直変位最大値(下り特急加越7号走行時)についての現場測定値と計算値の比較

測定位置	現場測定値	計算3	計算4
A	0.43	0.179(0.42)	0.202(0.47)
B	0.74	0.491(0.66)	0.544(0.74)
C	0.96	0.847(0.88)	0.936(0.98)
D	0.89	0.956(1.07)	1.056(1.19)
E	0.51	0.601(1.18)	0.661(1.30)
F	0.68	0.627(0.92)	0.659(0.97)
G	1.08	1.022(0.95)	1.073(0.99)
H	1.25	1.290(1.03)	1.353(1.08)
I	1.19	1.313(1.10)	1.377(1.16)
J	0.86	0.988(1.15)	1.043(1.21)
K	0.63	0.611(0.97)	0.645(1.02)
L	1.00	0.980(0.98)	1.033(1.03)
M	1.27	1.224(0.96)	1.309(1.03)
N	1.24	1.241(1.00)	1.349(1.09)
O	0.90	0.934(1.04)	0.981(1.09)
S	0.36	0.388(1.08)	0.417(1.16)
U	0.53	0.562(1.06)	0.603(1.14)
V	0.34	0.383(1.13)	0.411(1.21)
W	0.37	0.255(0.69)	0.274(0.74)

変位量はmm。計算3は車体・乗車旅客から算定した荷重による。計算4はレールゲージから算定した荷重による。()の数字は計算値/現場測定値を示す。

表－6 主桁鉄筋応力（上り特急加越12号走行時）
について現場測定値と計算値の比較

測定位置	現場測定値	計算1	計算2
P	20.4	23.5(1.15)	27.4(1.34)
Q	30.1	30.4(1.01)	35.4(1.18)
R	17.7	22.5(1.27)	26.3(1.49)
S	8.9	10.6(1.19)	12.4(1.39)
T	13.7	13.7(1.00)	16.1(1.18)
V	8.3	10.3(1.24)	12.1(1.46)

単位は kgf/cm^2 。計算1は車体・乗車旅客から算定した荷重による。計算2はレールゲージから算定した荷重による。（ ）の数字は計算値／現場測定値を示す。

表－7 主桁鉄筋応力（下り特急加越7号走行時）
について現場測定値と計算値の比較

測定位置	現場測定値	計算3	計算4
P	10.1	10.4(1.03)	11.0(1.09)
Q	15.9	13.8(0.87)	14.8(0.93)
R	10.1	10.6(1.05)	11.5(1.14)
S	17.1	22.5(1.32)	24.0(1.40)
T	26.0	30.4(1.17)	32.4(1.25)
V	15.2	23.3(1.53)	25.2(1.66)

単位は kgf/cm^2 。計算3は車体・乗車旅客から算定した荷重による。計算4はレールゲージから算定した荷重による。（ ）の数字は計算値／現場測定値を示す。

各現場測定値は、列車通過時に読み取れた各点での最大鉄筋応力である。

表－6と表－7に示す計算1，計算2，計算3，計算4は，（1）桁鉛直変位の表－4，表－5中の計算1，計算2，計算3，計算4と同じものである。また，（3）横桁の鋼板応力の表も同様である。

主桁引張鉄筋の断面積は，図－5（a）に示す様に直径32mmの鉄筋95本だから， $95\text{本} \times 7.942\text{cm}^2/\text{本} = 754.5\text{cm}^2$ である。主桁鉄筋のヤング率は， $2.10 \times 10^6 \text{kgf/cm}^2$ とする。主桁コンクリートは，設計基準強度300 kgf/cm^2 なのでヤング率 $2.8 \times 10^6 \text{kgf/cm}^2$ とする⁹⁾。また，主桁コンクリートは，全断面有効とした時の最大引張応力が約5 kgf/cm^2 で，土木学会コンクリート標準示方書の設計引張強度17 kgf/cm^2 （設計基準強度300 kgf/cm^2 ）以内であるから⁹⁾，全断面有効とする。主桁の曲げモーメント M ，鉄筋とコン

クリートのヤング率比 $\frac{E_s}{E_c} = \frac{2.1 \times 10^6}{2.8 \times 10^6} = 7.5$ から換算した主桁鉄筋と主桁コンクリートの鉄筋換算断面2次モーメント I ，主桁断面中立軸からの距離 y を用いて，計算の主桁鉄筋応力 σ は， $\sigma = (M/I)y$ から求める。主桁断面での鉄筋計位置は，図－5（a）に示す。主桁鉄筋応力の計算1，計算3は，現場測定値と似た値となっている。計算2，計算4は，桁鉛直変位と同じ傾向で大きめの値となっている。

（3）横桁の鋼板応力

表－8に，上り特急加越12号が石松架道橋を走行したときの，測定点B，C，G，H，I，L，M，Nの横桁の鋼板歪計からの現場測定値と，計算1，計算2を示す。表－9に，下り特急加越7号が石松架道橋を走行したときの，測定点B，C，G，H，I，L，M，Nの横桁の鋼板歪計からの現場測定値と，計算3，計算4を示す。

横桁断面は，図－5（b）に示している。横桁の鋼板の中空部は，発泡モルタルを充填し，横桁の継手部は，コンクリートを充填している。

横桁鋼板部の断面2次モーメントとヤング率は $6.122 \times 10^5 \text{cm}^4$ と $2.10 \times 10^6 \text{kgf/cm}^2$ であり，横桁発泡モルタル部の断面2次モーメントとヤング率は $4.493 \times 10^6 \text{cm}^4$ と $1.42 \times 10^4 \text{kgf/cm}^2$ であり，横桁コンクリート部の断面2次モーメントとヤング率は $5.918 \times 10^5 \text{cm}^4$ と $2.76 \times 10^5 \text{kgf/cm}^2$ である。よって，横桁の鋼換算断面2次モーメントは， $I = 6.122 \times 10^5 + 4.493 \times 10^6 \times \frac{1.42 \times 10^4}{2.10 \times 10^6} + 5.918 \times 10^5 \times \frac{2.76 \times 10^5}{2.10 \times 10^6} = 7.20 \times 10^5 \text{cm}^4$

である。横桁鋼板応力 σ は，横桁の曲げモーメント M と横桁断面中立軸からの距離 y を用いて， $\sigma = (M/I)y$ から求める。横桁コンクリートは，引張応力が土木学会コンクリート標準示方書の設計引張強度17 kgf/cm^2 以内であるから⁹⁾，全断面有効とする。横桁発泡モルタルは全断面有効とする。

17番目横桁の測定点B，Cの現場測定値は，表－8と表－9によると，桁上側の負値の絶対値が桁下側の正值の絶対値より大きい。9番目横桁の測定点G，Hの現場測定値は，表－8と表－9によると，桁上側

表－８ 横桁鋼板応力（上り特急加越１２号走行時）
についての現場測定値と計算値の比較

測定位置	現場測定値	計算１	計算２
B 桁上側	-34	-44.7	-52.4
B 桁下側	26	44.7	52.4
C 桁上側	-24	-30.6	-35.8
C 桁下側	16	30.6	35.8
G 桁上側	-24	-47.3	-55.6
G 桁下側	34	47.3	55.6
H 桁上側	-30	-21.2	-24.7
H 桁下側	26	21.2	24.7
I 桁下側	12	16.8	19.9
L 桁上側	-22	-41.0	-48.0
L 桁下側	32	41.0	48.0
M 桁上側	-24	-20.2	-23.4
N 桁上側	-10	-11.8	-13.7
N 桁下側	14	11.8	13.7

単位は kgf/cm^2 。符号＋は引張り。計算１は車体・乗車旅客から算定した荷重による。計算２はレールゲージから算定した荷重による。

表－９ 横桁鋼板応力（下り特急加越７号走行時）
についての現場測定値と計算値の比較

測定位置	現場測定値	計算３	計算４
B 桁上側	-12	6.2	7.1
B 桁下側	8	-6.2	-7.1
C 桁上側	-30	-8.4	-8.6
C 桁下側	16	8.4	8.6
G 桁上側	-12	5.5	6.4
G 桁下側	16	-5.5	-6.4
H 桁上側	-30	-8.9	-7.7
H 桁下側	24	8.9	7.7
I 桁下側	30	33.0	32.4
L 桁上側	-10	-1.0	-0.9
L 桁下側	12	1.0	0.9
M 桁上側	-34	-22.5	-24.9
N 桁上側	-22	-55.1	-61.1
N 桁下側	34	55.1	61.1

単位は kgf/cm^2 。符号＋は引張り。計算３は車体・乗車旅客から算定した荷重による。計算４はレールゲージから算定した荷重による。

の負値の絶対値が桁下側の正值の絶対値より小さい。８番目横桁の測定点 L、N の現場測定値は、表－８と表－９によると、桁上側の負値の絶対値が桁下側の正值の絶対値より小さい。だから、１７番目横桁は、桁軸長方向に圧縮力を受け、８番目横桁と９番目横桁は、桁軸長方向に引張力を受けていることになる。理由を考えると、１８本の横桁の内、中央の位置の８、９、１０、１１番目横桁鉛直変位が１、２、１７、１８番目横桁鉛直変位より大きくなるため、横桁の水平方向の投影長に差が生じる。それで、主桁は、桁横の水平方向に曲げを受けることとなり、主桁軸長中間部で引張力、主桁端部で圧縮力を横桁に与える。

また、表－８と表－９から現場測定値と計算値を比較すると、横桁軸長方向中央 C、H、M グループは、軸長方向中央でない B、G、I、L、N グループより一致程度がよい。理由は、主桁と横桁の結合が完全剛結でなく半剛結的なためであろう。だから、横桁両端に生じる負の曲げモーメント真の値が、計算値の数十パーセントとなる。そのため、B、G、I、L、N グループは、発生曲げモーメントが真の値より小さく計算されることとなり、表－９の B と G のように、実測値と計算値の符号が反対になる差異も生じる。表－８、表－９の両者共、車体・乗車乗客から算定した荷重による計算値の方が、レールゲージから算定した荷重による計算値のものより、現場実測値に近い傾向である。

上り特急加越１２号と下り特急加越７号について、桁鉛直変位と主桁鉄筋応力と横桁鋼板応力の現地測定結果と各計算値との比較を行った。桁鉛直変位と主桁鉄筋応力の場合に比し、横桁鋼板応力は、計測値と計算値の一致が悪い。車体重量と乗客重量から列車荷重を求めている計算１と計算３の計算値は、レールゲージから列車荷重を求めている計算２と計算４よりも、桁鉛直変位と主桁鉄筋応力と横桁鋼板応力のいずれにおいても、現地測定値に近い。計算１と計算３の荷重は、車体重量に乗車旅客重量（車体重量約１０％に相当）を加えたもので、計算２と計算４の荷重より小さい。また、計算値の方が、現地測定値より絶対値が大き気味である。

また、列車走行時の列車荷重は、動的なものであり、静的荷重と同じものではない。そのため、列車荷重は、静的な列車荷重に 1+C を乗じたものを用いており、C を列車衝撃係数として設計に織り込んでいる。石松架道橋の場合、現場実測値と計算値から考えると、列車衝撃係数は 0.１か、0.１以下となる。なお、

文献3)での東北本線片岡・矢板間の上富田架道橋の電気機関車EF65による衝撃係数測定では、0.1以下の結果となっている。

4. まとめ

下路桁式地中構造物について実構造物現地測定を行い、構造物の荷重分配作用の挙動を実測した。また、計算値との比較も行った。解析法は、横桁1本を1要素としたものと主桁1本を1要素としたものそれぞれについて、梁の曲げと梁のねじりの基本式を積分方程式でグリーン関数を用いて解き、継手の横桁間相互の接続条件と主桁と横桁間の接続条件を課すもので、主桁と横桁間の荷重分配作用と継手による横桁相互間の荷重分配作用を同時に考慮できる。

横桁の鋼板応力測定から、主桁は、鉛直方向だけでなく、桁横の水平方向にも曲げが生じてることがわかった。主桁と横桁の結合部は半剛結的であり、列車通過時に横桁は正の曲げモーメント値となる傾向が強い。石松架道橋の場合、列車荷重は、車体・乗車旅客から算定したものの方が、レールゲージ測定から算定したものより、現場測定値と計算値の一致がよい。列車衝撃係数は0.1か、0.1以下となる。

【付録】

$$EI v_{zzzz} = p(z)$$

上式の両辺に、グリーン関数 v^* を掛け、区間 $[a, b]$ についての積分を考える。上式の左辺について

$$\int_a^b v^* EI v_{zzzz} dz = EI (v^* v_{zzz} - v_{zz}^* v_{zz} + v_{zz}^* v_{zz} - v_{zzz}^* v) \Big|_a^b + \int_a^b v EI v_{zzzz} dv$$

そこで、 $EI v_{zzzz}^* = \delta(z - \eta)$ を満たす様に v^* を選ぶと

$$v(\eta) = -EI (v^* v_{zzz} - v_{zz}^* v_{zz} + v_{zz}^* v_{zz} - v_{zzz}^* v) \Big|_a^b + \int_a^b v^* p(z) dv$$

参考文献

- 1) 国鉄構造物設計事務所：線路下横断構造物設計の手引き 下路桁形式，日本鉄道施設協会，pp23-29，1976年1月
- 2) 山川純雄・後藤芳顕：水平鋼管矢板構造の継手による荷重分配作用の解析，土木学会論文報告集，第301号，pp1-12，1980年9月
- 3) 後藤芳顕・山下彰彦・飯田毅：水平鋼管矢板構造の継手による荷重分配性状，土木学会論文集，第344号，pp243-252，1984年4月
- 4) 後藤芳顕・山下彰彦・高瀬幸紀：水平鋼管矢板構造の継手による荷重分配作用の現場計測，土木学会論文集，第344号，pp387-390，1984年4月
- 5) 後藤芳顕・松村暢久・近藤邦明・高瀬幸紀：水平鋼管矢板斜角構造の継手による荷重分配作用の解析，構造工学論文集，vol. 33A，pp229-240，1987年3月
- 6) 山下彰彦：境界要素法による線路下横断構造物の荷重分配解析，鉄道総研報告，第3巻第9号，pp61-pp66，1989年9月
- 7) ミカエルD. グリーンベルグ：応用グリーン関数，ブレイン図書，pp27-30，1983年5月
- 8) 古山章一・小山幸則：URTElement継手載荷試験，土木学会第43回年次学術講演会，VI-67 pp162-163，1988年10月
- 9) 土木学会：コンクリート標準示方書 設計編，pp17-19，pp21-23，昭和61年10月

(1991年9月30日受付)