

鋼道路橋の鋼重実績と推定式

Data and estimating equations for steel weight of highway bridges

当麻 庄司*

Shouji TOMA

*Ph. D. 北海学園大学教授, 工学部社会環境工学科 (〒064-0926 札幌市中央区南 2 6 西 1 1)

ABSTRACT The steel weight of the bridges can be a index to know the structural characteristics of the bridges. The data of the steel weight for various types of highway bridges, which is expressed by the weight per unit road surface area (kN/m^2), are provided, from which designers can estimate the dead weight at initial design. Also, provided are the equations that show the average weight of bridges and the standard deviations that show the scatter of the data. Those will give the deviation from the average value and the weight position of the bridge in the weight distribution chart. Thus, the position could be a structural index to compare with the weight distribution of other bridges.

Key Words : 橋梁設計, 道路橋, 鋼重, 鋼橋
bridge design, highway bridges, steel weight, steel bridges

1. はじめに

鋼道路橋の設計に当たっては, 最初に死荷重の一部である鋼重の仮定を行わなければならない. 鋼重の大きさは設計で決定される断面の大きさによって決まるのであるから, この設計の初期段階における仮定は, 過去の実績に基づいたデータから正確に判断されなければならない. 最初の仮定が設計を進めた結果と異なると死荷重が変わることになり, 設計のやり直しをしなければならない. 鋼重の仮定は非常に重要な事項となる.

正確な鋼重推定をするためには, その根拠となる過去のデータの整理が必要である. 筆者はこれまでも鋼道路橋鋼重データの分析をし, その結果をまとめてきた^{1) 2)}. それ以来, 平成 6 年に道路橋示方書が改訂され, 一般的に用いられる活荷重 (B 荷重) がそれまでより大きくなった. また, それまで使用してきた重力単位も SI 単位に変更され, 現在鋼道路橋の鋼重データの再構築が必要となってきた. そこで, 本論文では各種の鋼道路橋の鋼重データをまとめるとともに, 設計に用いるための鋼重の推定式を示す. また, 鋼重データの経年推移をみることで, そのための鋼重分布データも示すことにする.

ここで用いたデータは, 「橋梁年鑑」(日本橋梁建設協会)³⁾ からとった. 鋼重は橋の構造種別毎に橋のスパンに対する道路面積 (=有効幅員 $\times$ スパン) 当たりで表しているが, 幅員の大きさ, 主桁数, 歩道の有無, 使用鋼種等による区別はしていない. このことは, 鋼重はある程度分布するということであり, ある橋の鋼重が鋼重分布図のどこに位置するかということから, 構造的特徴を知ることができるということでもある.

2. 各種橋梁の施工実績

設計の大きな傾向をみるために, 平成 13 年 (完工年度) までの鋼道路橋について, 総橋梁数と各種桁橋の施工数を図 1 に示す. これによれば, 最近では総橋梁数には大きな変化はないが, 単純橋よりも連続橋の施工が増加していることがわかる. これは耐震性や走行性を重視することからきていると思われる.

単純合成鉄桁橋の施工が昭和 50 年代以降一貫して減少しているが, これは一時合成桁橋の RC 床版に多くの損傷がみられたことから施工が控えられるようになったためであると思われる. しかし, 床版の損傷は合成・非合成には本質的に関係がなく, 構造的により合理的な合成桁を建設するべきであること

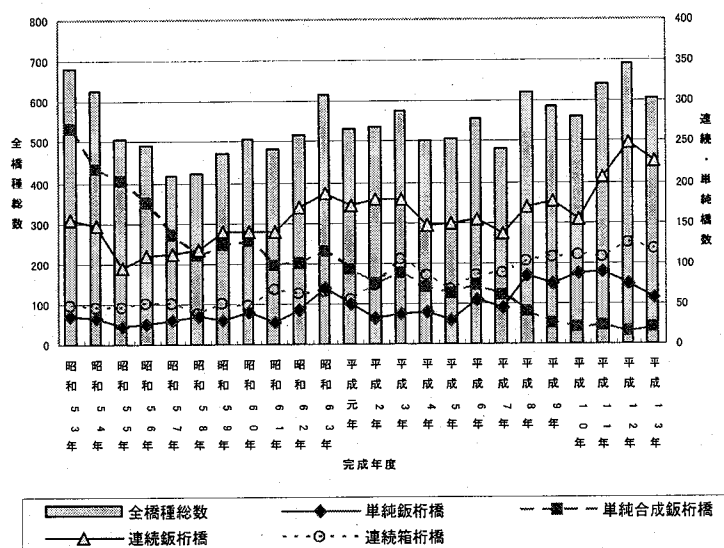


図1 鋼道路橋の施工数

が以前から指摘されている^{4) 5)}。合成桁橋は鋼桁とRC床版のそれぞれの材料の特長を活かした合理的な構造であり、材料の配分が無駄がないと言える。

3. 単純鉄桁橋（非合成）の鋼重

単純鉄桁橋（非合成）は図1にみるように、ここ10年位前から合成桁橋よりも多く採用されるようになった。その鋼重の実績を昭和53年～平成13年度（完工年度）間の経年推移に対して図2～図6に示す。これらはいずれもRC床版をもち、鋼床版の橋は除かれている。平成5年まで（図2、3）は旧道路橋示方書による設計であり、平成6年以降（図4～6）は改訂された道路橋示方書のB荷重を適用した橋である。これらの鋼重分布図はかなりばらつきがみられるもののスパンとの相関関係が割合強く、回帰関係式は線形式でよく表すことができる。

B荷重で設計された単純鉄桁橋（非合成）の鋼重推定式を得るために、平成6～13年までの鋼重実績を図7に示す。信頼性の高い鋼重推定式を導くためには、このようにある程度多くのデータをまとめた方が望ましいと思われる。また、回帰直線（平均値）からの偏差をとって、その標本標準偏差を計算すると $\sigma = 0.489$ であった。これらの平均値と標準偏差から、設計する橋の構造の特徴を加味して鋼重推定をすることができる¹⁾。同図中には、参考のため相関係数 ρ の値を示す。

図8には、図3～7の回帰直線（平均値）の経年比較を示す。これを見ると、新荷重になった初期の

平成6～8年では若干の増加があるが大きな影響は現れていない。しかし、平成9年以降は明確に設計荷重の増加の影響が現れている。平成6～8年はまだ旧荷重で設計された橋もあったためデータ数が112と比較的少なかった。

平成9～10年および平成11～13年と近年になるにしたがって、鋼重は増加している。最近では鋼材の低減よりは工数を減らして人件費を節約した方が全体のコストを下げるので、その影響も現れているものと思われる。図8から、旧荷重による設計とB荷重による設計との鋼重差は概略10%余であることがわかる。

4. 単純合成鉄桁橋の鋼重

単純合成鉄桁橋について、図9～13に昭和53年～平成13年の鋼重分布を示す。先に述べたように非合成鉄桁橋の方が、圧倒的に施工数が多いためデータ数が多い。しかし、合成鉄桁橋についてもここで示したように、統計的データをまとめるだけの十分なデータ数を有していると思われる。各図中にデータから得られる回帰直線式と2次式を示す。図13に示した平成6年～13年の鋼重分布図は、単純合成鉄桁橋の鋼重推定に用いることができ、標本標準偏差は $\sigma = 0.310$ となった。

図14には単純合成鉄桁橋の経年鋼重比較を示す。これによると、平成5年までの旧荷重で設計された橋についても昭和時代から徐々に鋼重は増加してきている。これは、昭和53年に道路局企画課長通達を出して床版の安全率を上げたことによる影響等も含まれているものと考えられる¹⁾。そして、B荷重になった平成6年以降になると大きく鋼重が増加していることがわかる。旧荷重時代とB荷重時代との鋼重差は約10%であるが、スパンが小さくなるにしたがってその差は小さくなっている。

5. 連続鉄桁橋（非合成）の鋼重

連続鉄桁橋は図1でみたように、最近では最も多く建設される橋梁タイプであるのでデータ数は非常に多い。図15～17に各年代の鋼重分布を示す。RC床版のみを取り上げているので、鋼床版は含まれていない。連続橋はスパンの数やスパン割によって鋼重は影響されるが、ここでは通常最大スパンとなる中央スパンのみに代表させて鋼重分布をプロットしている。連続橋は単純橋よりも影響される設計要

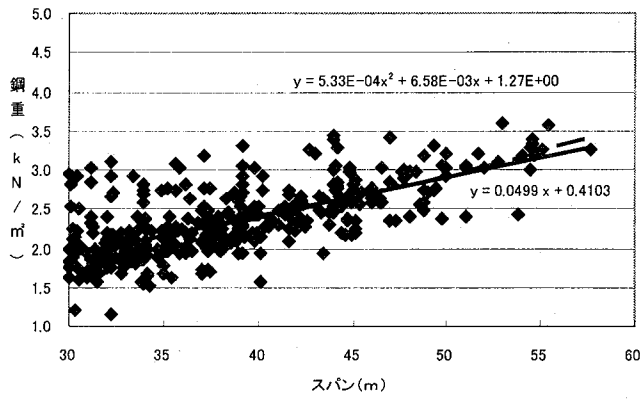


図2 単純鈑桁橋(非合成)の鋼重 (S53-61)
(データ数 : 388)

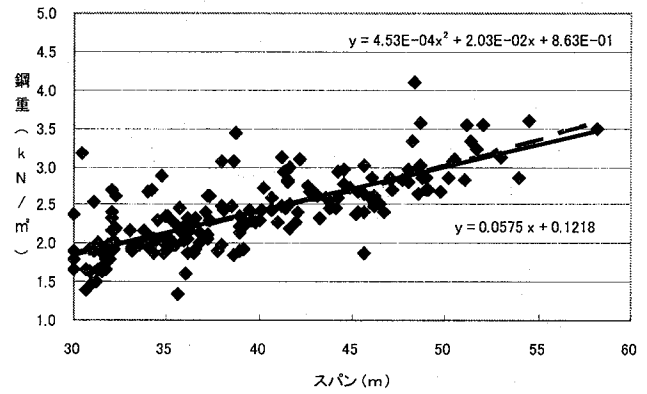


図3 単純鈑桁橋(非合成)の鋼重 (H1-5)
(データ数 : 189)

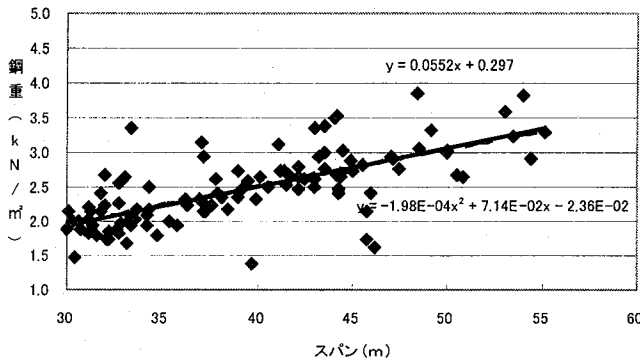


図4 単純鈑桁橋(非合成)の鋼重 (H6-8)
(データ数 : 112)

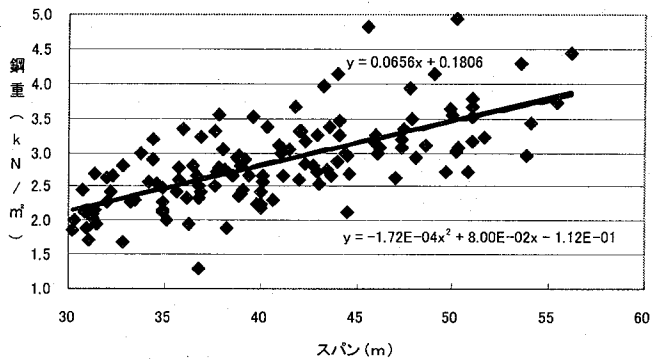


図5 単純鈑桁橋(非合成)の鋼重 (H9-10)
(データ数 : 127)

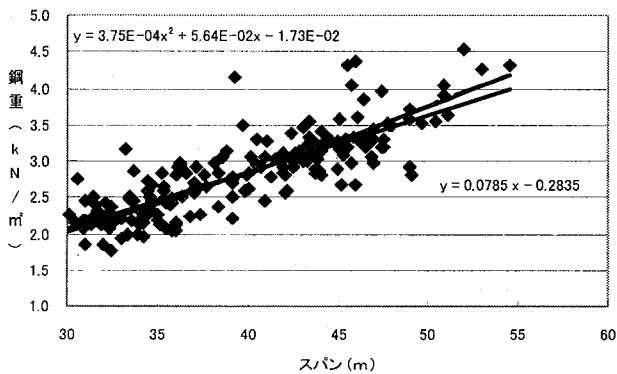


図6 単純鈑桁橋(非合成)の鋼重 (H11-13)
(データ数 : 189)

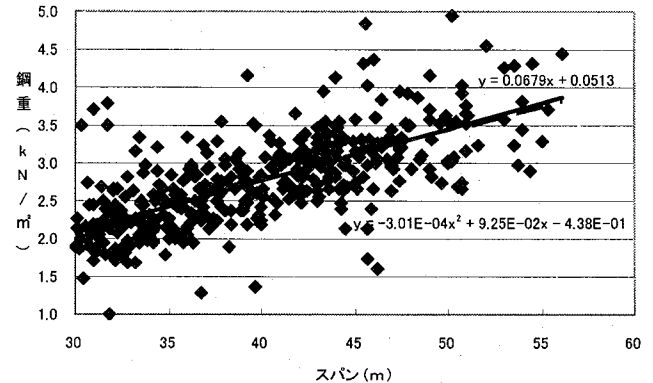


図7 単純鈑桁橋(非合成)の鋼重 (H6-13)
(データ数 : 436, $\sigma=0.489$, $\rho=0.653$)

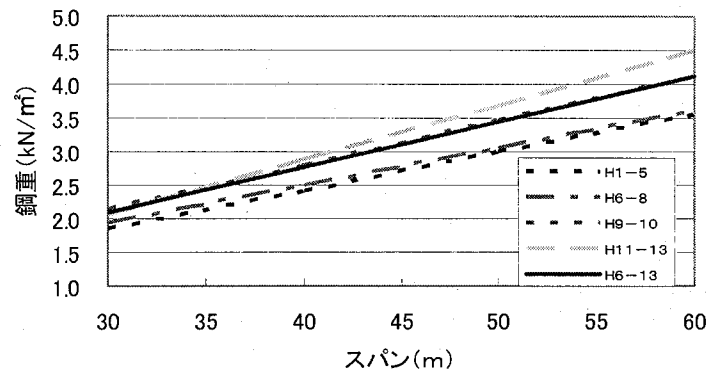


図8 単純鈑桁橋(非合成)の経年比較

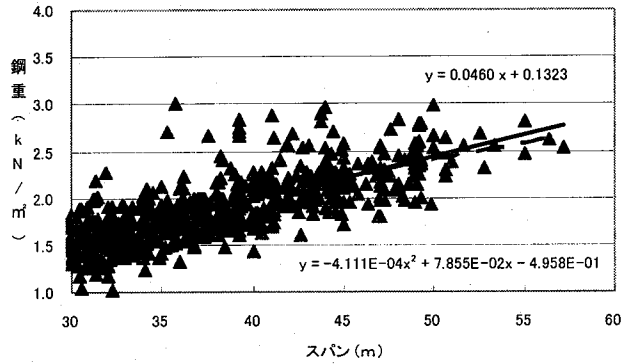


図9 単純合成鉄桁橋 (S53-55)
(データ数: 684)

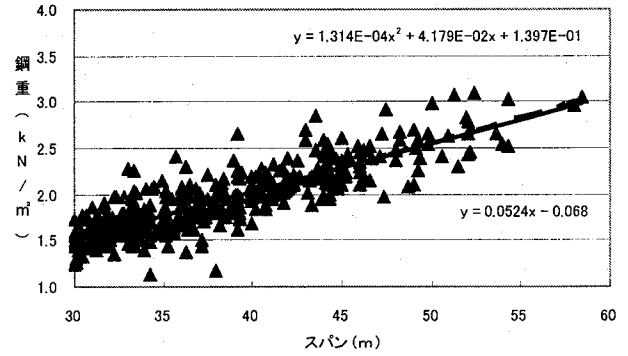


図10 単純合成鉄桁橋 (S56-58)
(データ数: 418)

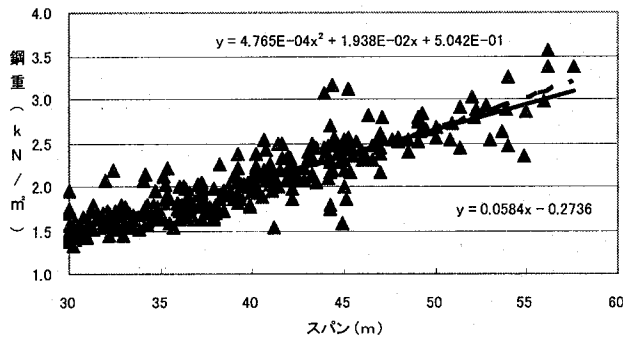


図11 単純合成鉄桁橋 (S61-63)
(データ数: 311)

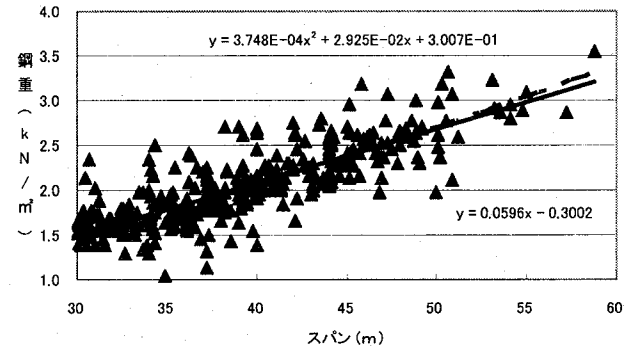


図12 単純合成鉄桁橋 (H1-5) H1-5
(データ数: 383)

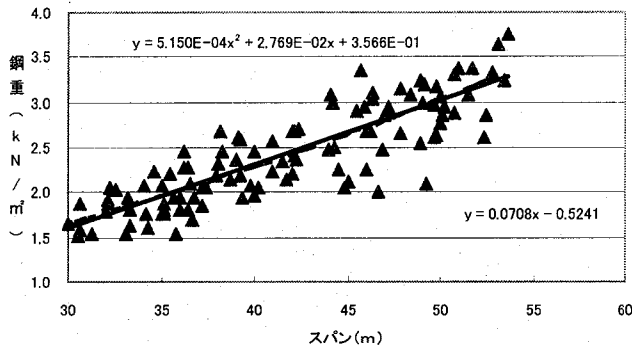


図13 単純合成鉄桁橋 (H6-13)
(データ数: 132, $\sigma=0.310$, $\rho=0.831$)

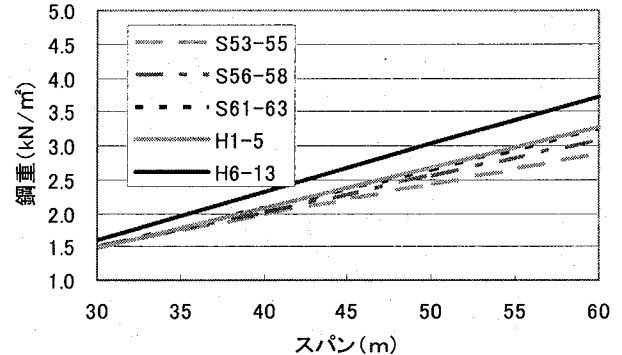


図14 単純合成鉄桁橋の経年比較

素が多いのでばらつきは大きくなり、したがってデータ数を大きくとってまとめた。図17はB荷重による設計の鋼重をまとめたものであり、図中の回帰直線および標本標準偏差の値 ($\sigma=0.398$) は連続鉄桁橋の鋼重推定に用いることができる。

図18に示した図15～17の回帰直線の比較によれば、平成6年以降のB荷重で設計された橋は明確に鋼重が大きくなっている。そしてその増加率はこれまでの単純非合成および合成鉄桁橋と同様に約10%強である。

6. 単純箱桁橋（非合成）の鋼重

単純箱桁橋（非合成）の各年代に対する鋼重分布を図19～21に示す。いずれもRC床版のみを取り上げているので、鋼床版は含まれていない。図21はB荷重になってからのデータをまとめたものであり、同図中の回帰直線および標本標準偏差の値 ($\sigma=0.491$) は単純箱桁橋の鋼重推定に用いることができる。相関係数は $\rho=0.779$ と非常に大きく、鋼重とスパンの相関性は強い。また、線形式でよく近似できていることがわかる。

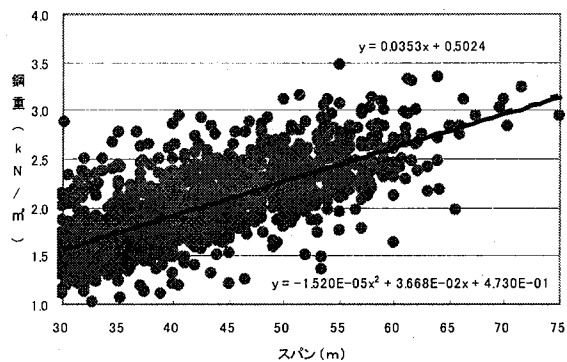


図15 連続鈑桁橋の鋼重 (S53-63)
(データ数: 1508)

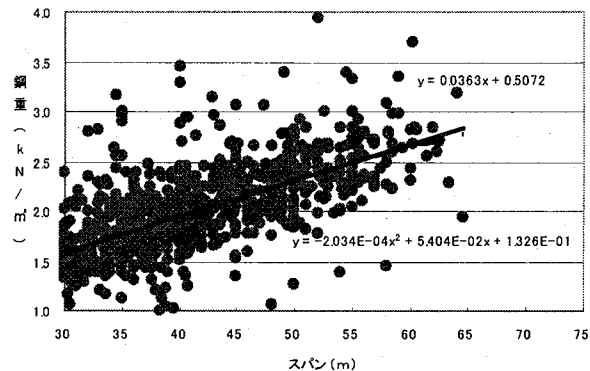


図16 連続鈑桁橋の鋼重 (H1-5)
(データ数: 827)

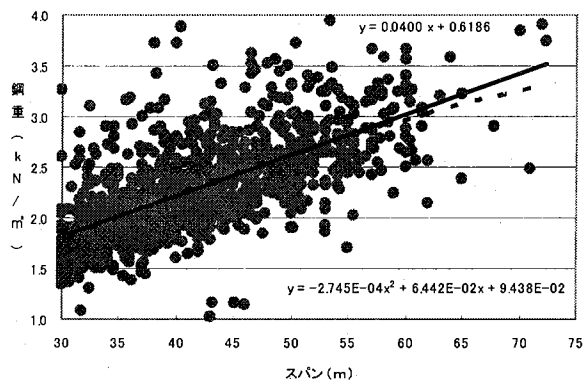


図17 連続鈑桁橋の鋼重 (H6-13)
(データ数: 1082, $\sigma=0.398$, $\rho=0.629$)

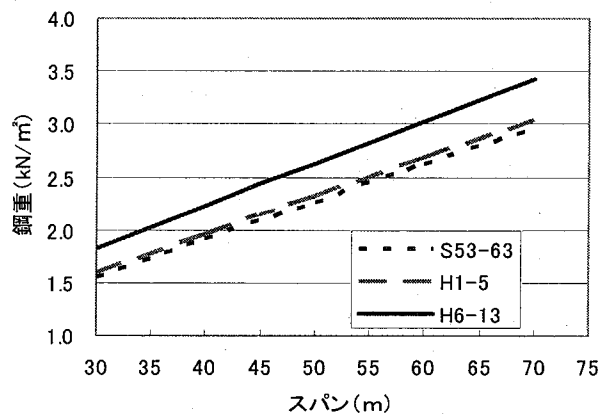


図18 連続鈑桁橋の経年比較

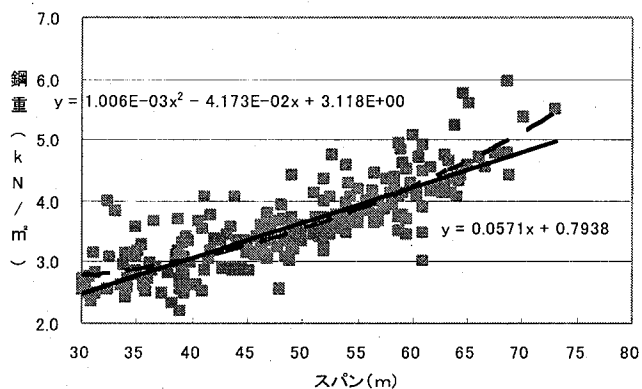


図19 単純箱桁橋の鋼重 (S53-63)
(データ数: 221)

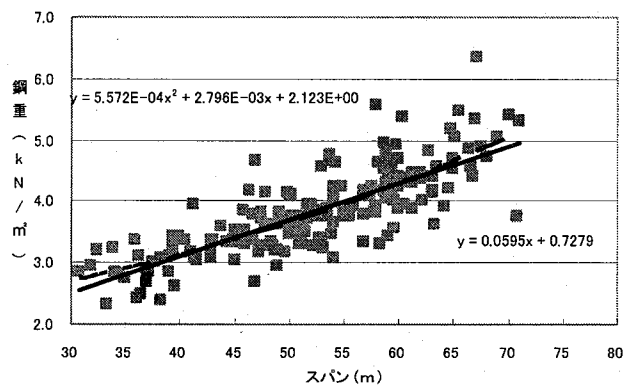


図20 単純箱桁橋の鋼重 (H1-5)
(データ数: 187)

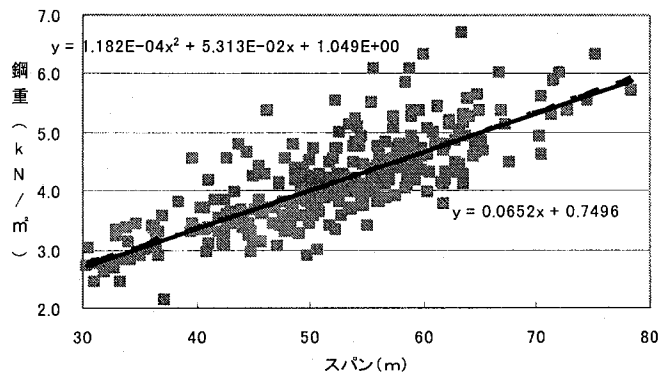


図21 単純箱桁橋の鋼重 (H6-13)
(データ数: 292, $\sigma=0.491$, $\rho=0.779$)

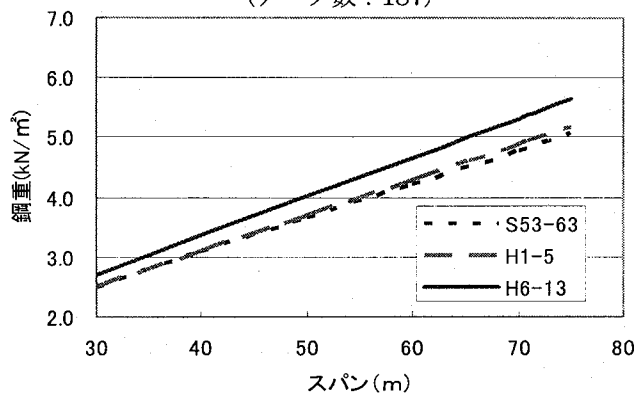


図22 単純箱桁橋の経年比較

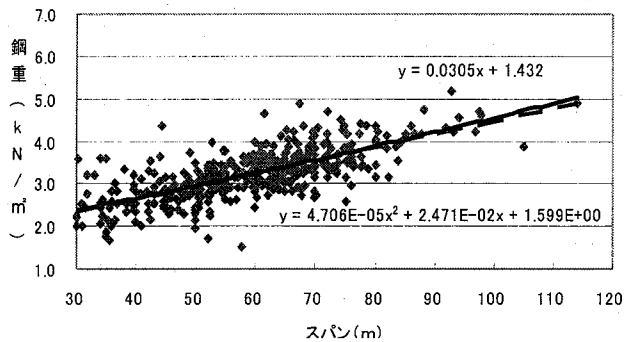


図 2 3 連続箱桁橋の鋼重 (S56-63)
(データ数: 428)

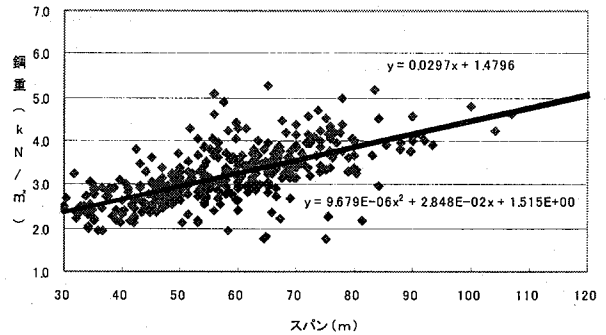


図 2 4 連続箱桁橋の鋼重 (H1-5)
(データ数: 382)

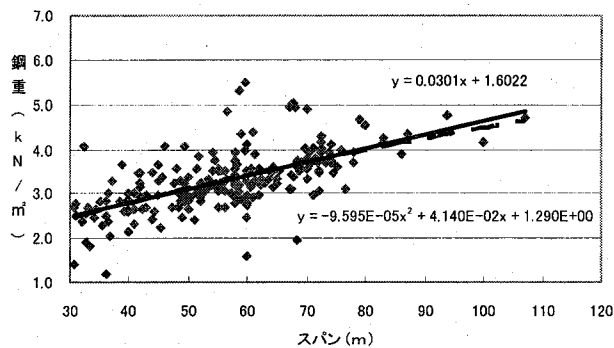


図 2 5 連続箱桁橋の鋼重 (H6-9)
(データ数: 208)

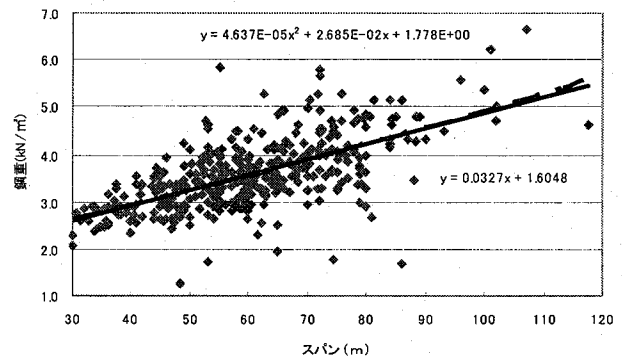


図 2 6 連続箱桁橋の鋼重 (H10-13)
(データ数: 404, $\sigma=0.576$, $\rho=0.638$)

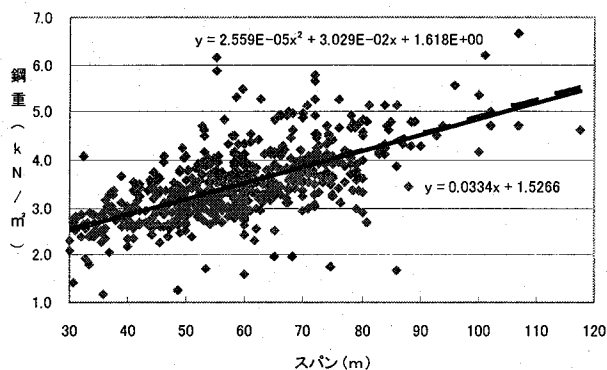


図 2 7 連続箱桁橋の鋼重 (H6-13)
(データ数: 612, $\sigma=0.614$, $\rho=0.620$)

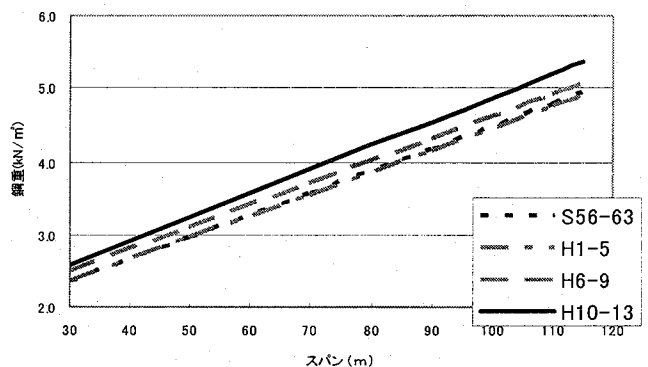


図 2 8 連続箱桁橋の経年比較

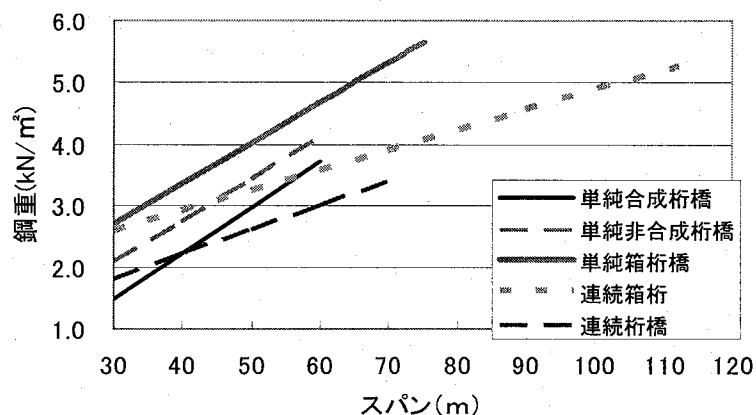


図 2 9 各種桁橋の鋼重比較

図22は、図19～21に示した鋼重分布の回帰直線の比較を示す。これをみると平成5年までの旧荷重で設計された橋とそれ以降のB荷重の橋とは明確に違いが現れている。単純箱桁橋では、その差は約10%弱である。

7. 連続箱桁橋（非合成）の鋼重

連続箱桁橋は図1にみたように施工数は多く、最近では連続鉄桁橋に次いで多い構造形式である。図23～26に連続箱桁橋の鋼重分布を示す。B荷重になった平成6年以降は平成9年までとそれ以降に分けており、それらを一緒にしたものを図27に示す。図27（または図26）に示した回帰直線や標本標準偏差が、この形式の鋼重推定に用いることができる。

図28に連続箱桁橋の経年推移による比較を示す。これをみるとB荷重になってからの平成6年以降は初期の平成9年までと平成10年以降では増加の仕方がかなり異なっている。平成10年以降は旧荷重の橋に対する鋼重の増加率が大きく、それはこれまでの形式の橋と同じ約10%である。

8. 各種桁橋の鋼重比較

これまでに示した各種桁橋の鋼重推定式を比較して図29に示す。鋼重推定式は、B荷重に移行した

後の平成6～13年のデータを用いている。ここでの比較は回帰直線で行っている。また同図からは示された線の長さから適用スパンの大きさも読みとることができる。

図29を見ると、単純合成鉄桁橋の鋼重は非合成鉄桁橋に比べてかなり小さいことがわかる。そして、単純箱桁橋はこれらの単純鉄桁橋よりかなり鋼重は大きい。これら3者はほぼ平行で推移している。一方、連続橋は同形式の単純橋より鋼重が小さく、適用できるスパンも大きい。連続箱桁橋は連続鉄桁橋よりかなり重く、両者はスパンに対してやはり平行で推移している。

9. トラス橋の鋼重

図30に旧荷重の単純トラス橋の鋼重分布を示す。B荷重になってからのデータ数は十分でないので、図31には旧新荷重の区別をしないで全鋼重データを示す。そして、図32には同様に連続トラス橋の全鋼重データを示す。

単純および連続トラスのこれらの鋼重データを比較したのが図33である。旧荷重とB荷重の両方を含んだ単純トラスの鋼重は平成5年までのものより大きくなっているが、当然ながらその差はこれまでの10%よりは小さいことがわかる。また、連続トラス橋は単純トラス橋よりかなり小さい。

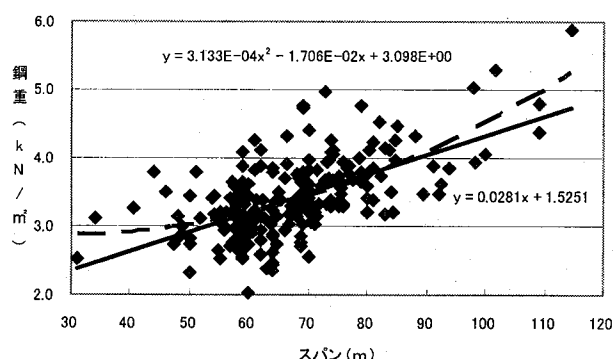


図30 単純トラス橋の鋼重 (S53-H5)
(データ数: 211)

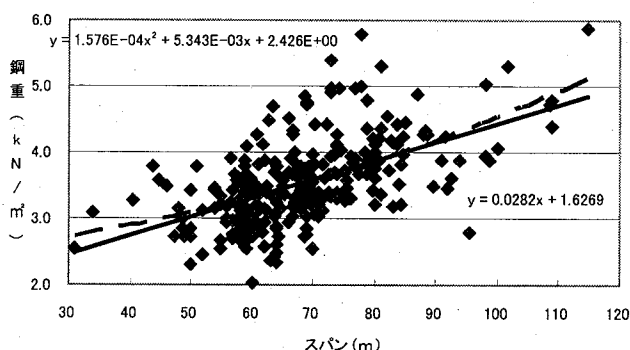


図31 単純トラス橋の鋼重 (S53-H13)
(データ数: 274, $\sigma=0.563$, $\rho=0.527$)

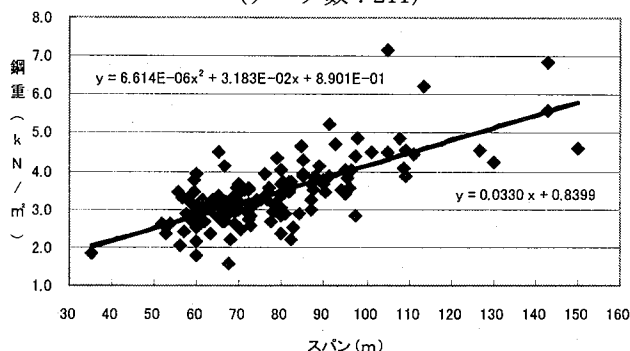


図32 連続トラス橋の鋼重 (S53-H13)
(データ数: 148, $\sigma=0.583$, $\rho=0.716$)

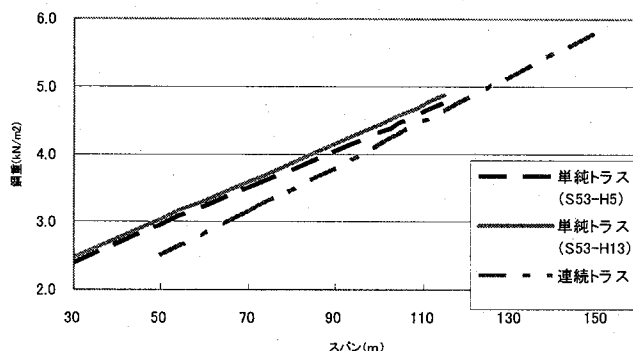


図33 トラス橋の鋼重比較

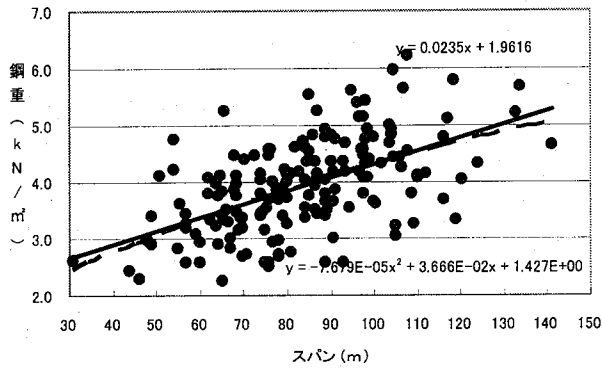


図 3 4 ランガー橋の鋼重 (S53-H13)
(データ数 : 170, $\sigma=0.685$, $\rho=0.544$)

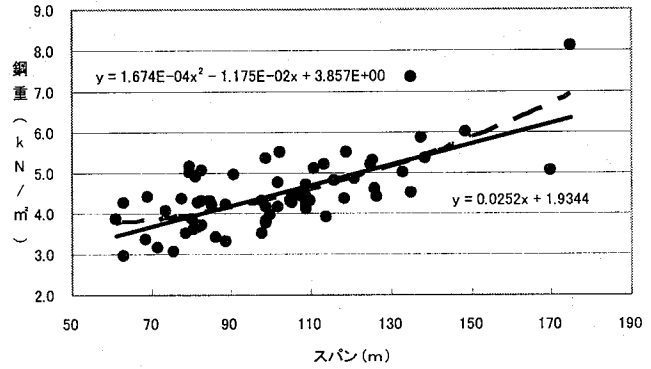


図 3 5 トラスランガー橋の鋼重 (S53-H13) (データ数 : 66, $\sigma=0.646$, $\rho=0.679$)

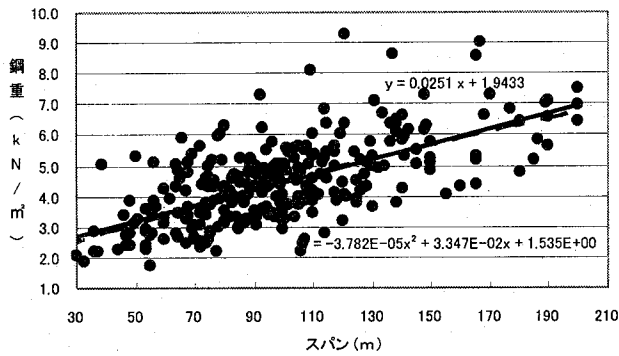


図 3 6 ローゼ橋の鋼重 (S53-H13)
(データ数 : 283, $\sigma=1.026$, $\rho=0.648$)

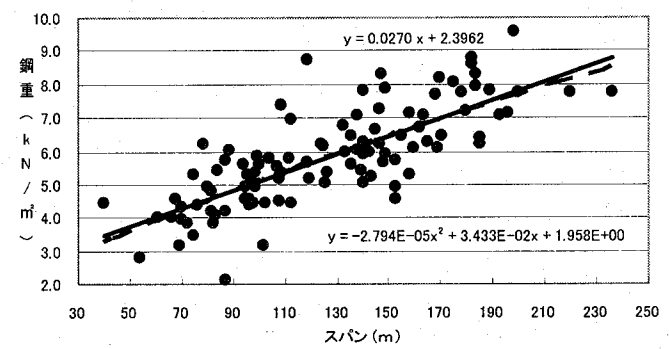


図 3 7 ニールセン橋の鋼重 (S53-H13)
(データ数 : 106, $\sigma=0.926$, $\rho=0.759$)

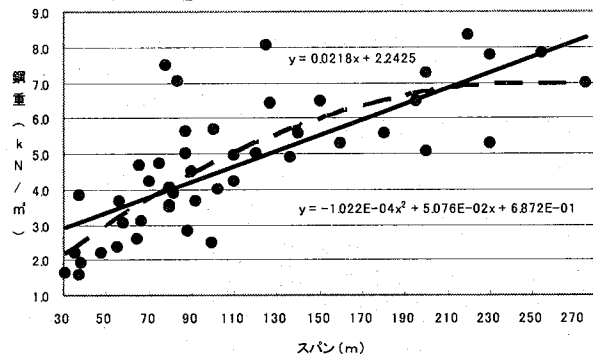


図 3 8 アーチ橋の鋼重 (S53-H13)
(データ数 : 47, $\sigma=1.223$, $\rho=0.731$)

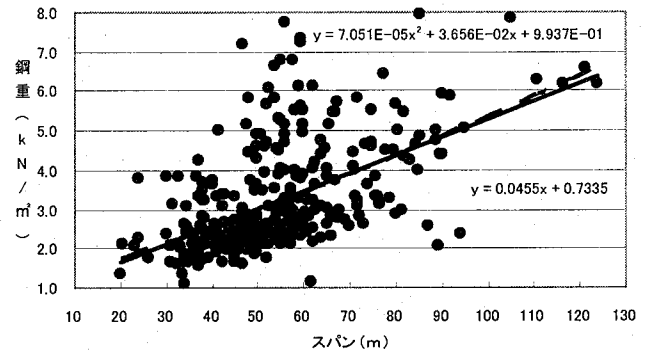


図 3 9 ラーメン橋の鋼重 (S53-H13)
(データ数 : 347, $\sigma=1.120$, $\rho=0.538$)

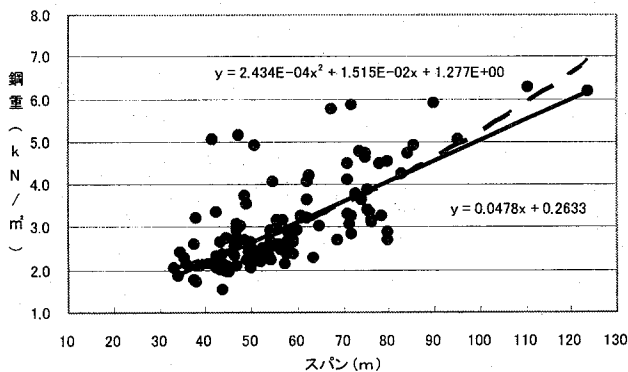


図 4 0 πラーメン橋の鋼重 (S53-H13)
(データ数 : 129, $\sigma=0.708$, $\rho=0.710$)

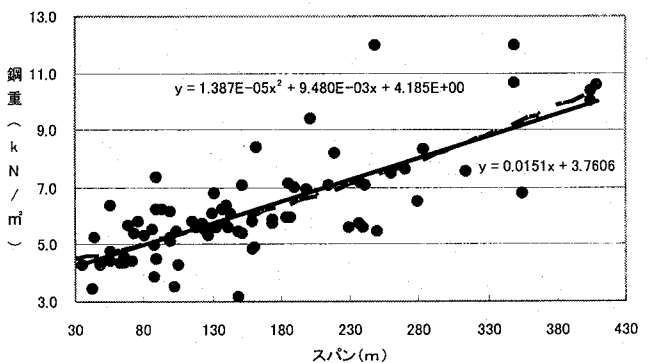


図 4 1 斜張橋の鋼重 (S53-H13)
(データ数 : 78, $\sigma=1.169$, $\rho=0.761$)

10. 骨組み橋の鋼重

10.1 アーチ系橋の鋼重

アーチ系の橋として、ランガー橋、トラストランガー橋、ローゼ橋、ニールセン橋、そしてアーチ橋のそれぞれの鋼重を図34～38に示す。これらの橋を含めこれ以後に示す骨組み橋はいずれもデータ数が多くないので、昭和53年～平成13年度までの全データを含んでいる。

この内、ランガー橋、ローゼ橋、ニールセン橋はデータ数が割合多くよい推定式が得られているが、トラストランガー橋とアーチ橋はデータ数が少ない。特に、アーチ橋についてはかなりばらつきが大きく、鋼重の推定に当たっては注意を要する。

10.2 その他の橋の鋼重

ラーメン橋の鋼重分布を図39に示すが、ラーメン橋の構造には変化があるので、鋼重の分布にもばらつきが大きい。しかし、データ数が多いのでそれなりに回帰直線は得られている。標本標準偏差はかなり大きな値になっている。πラーメン構造の橋を、図39から抜き出してまとめたものを図40に示す。特に比較図として示していないが、πラーメン橋の平均鋼重はラーメン全体よりはやや小さい。

図41にRC床版の斜張橋に対する鋼重分布を示す。データ数はそれほど多くはなく、また標本標準偏差もかなり大きい、スパンとの相関性の高い回帰直線が得られている。

10.3 各種骨組み橋の鋼重比較

以上ここに示した各種骨組み橋の鋼重平均である回帰直線の比較を図42に示す。この図をみると、橋の種類によって変化の多い比較になってい

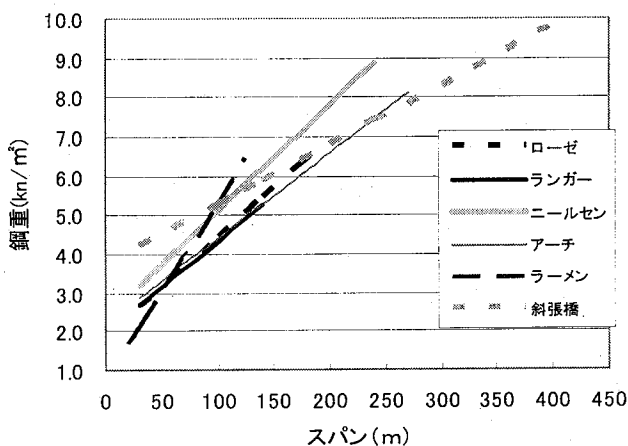


図42 各種骨組み橋の鋼重比較

る。ニールセン橋は、他の形式に比べて重いことがわかる。斜張橋は適用スパンがもっとも大きく、スパンの小さい範囲では鋼重が大きい、スパンが大きくなると他の形式より有利となっている。

ローゼ橋とランガー橋はほぼ等しい。ラーメン橋はスパンが大きくなるにしたがって鋼重の増加が著しい。以上のような傾向は、前の調査¹⁾と同様な結果となっている。

11. 鋼重の偏差値による評価

ある橋の特徴を鋼重の面から評価する方法として、正規分布を仮定した偏差値による方法が提案されている¹⁾。偏差値とは、ある確率分布を平均値50、標準偏差10の正規分布としたときの分布位置を表す指標である。このようにして、鋼重分布のどの辺に位置しているか、よりその構造物の特徴を知ることができる。偏差値を求める式は次のように表される。

$$H = \frac{X - \bar{X}(L)}{\sigma} \times 10 + 50 \quad (1)$$

ここに、 H : 偏差値, X : 鋼重, $\bar{X}(L)$: 鋼重の平均値, L : 支間長 (スパン)

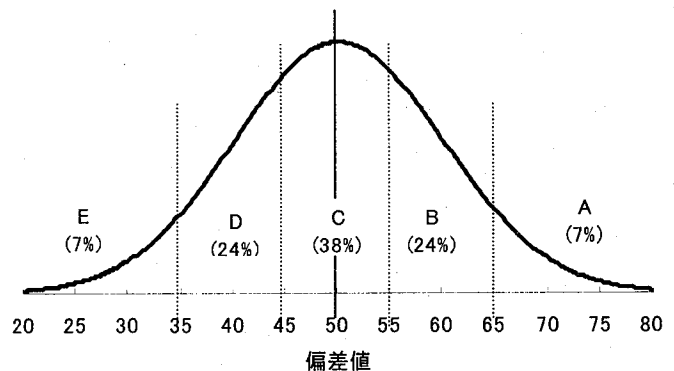


図43 偏差値の正規分布

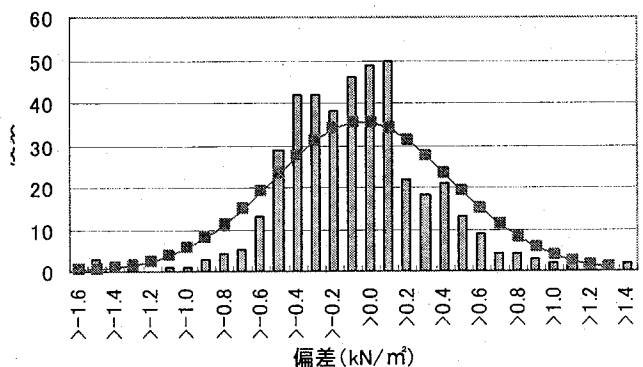


図44 単純鋼桁橋(非合成)の偏差分布

また、標本標準偏差 σ は次の式で与えられる。

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum \{X - \bar{X}(L)\}^2}{n-1}} \quad (2)$$

ここに、 n : データ総数

図4-3に偏差値正規分布の区分分けの例を示す。ここでは、分布を偏差値の大きい方から区分A, B, C, D, Eの5段階に分けている。このように分類すると、区分A(あるいはE)が7%, 区分B(あるいはD)が24%, そして区分Cが38%となる。区分Cはほぼ標準的な橋であり、区分AやEに位置するとかなり特徴を持つ橋、たとえば、曲線橋、水道管等の添加物をもった橋、2次部材を簡略化した橋、等のような構造的に標準ではない要素を含んでいることが推測される。

一例として図4-4に、単純鈑桁橋(非合成)の鋼重分布(図7)において、平均値からの偏差の頻度分布を示す。同図に示した正規分布の曲線との対比から、これらの偏差を正規分布で近似するのはほぼ妥当であることがわかる。

同図にしたがって、偏差値の適用例を考えてみる。たとえば、スパン40mとすれば図7より鋼重平均値は2.77kN/m²、標本標準偏差は $\sigma=0.489$ と得られる。今、ある橋の鋼重が3.05kN/m²であるとすれば、平均鋼重との偏差が約+10%および式(1)から鋼重偏差値は55.7と計算され、図4-3よりほぼ区分CとBの境界に位置することがわかる。このようにして、上に示した偏差値による方法が有効に適用できる。

1.2. 結論

鋼道路橋の鋼重は、設計の初期段階で仮定しなければならない重要事項である。本論文では種々の橋に対する鋼重データを示し、鋼重を仮定する根拠を提供した。具体的な結論として、以下のようにまとめることができる。

鋼重分布のデータからは

- (1) 平成6年の道路橋示方書改訂後のB荷重に対応する鋼重データから平均値(鋼重推定式)と標準偏差を示した。
- (2) これらの平均値と標準偏差から、橋の特徴を考慮して鋼重推定をすることができる。
- (3) 各種桁橋および骨組み橋の鋼重比較を示した。
- (4) 平成6年の道路橋示方書改訂後、鋼重は約10%増加している。

過去の鋼橋の施工実績数の推移からは

- (1) 最近では連続桁橋の施工が単純桁橋よりも増加している。
- (2) 単純桁橋では非合成桁橋が合成桁橋よりも施工数が多い。

謝辞: 本論文で用いたデータのまとめは、北海学園大学社会環境工学科(旧土木工学科)の当麻研究室の卒業生が行ったので、ここに記してこれに携わった学生諸君に深く謝意を表します。

参考文献

- [1] 当麻庄司, 鈴木 巧, 黒田保博: 鋼道路橋の鋼重データに基づく構造的特徴の分析, 土木学会論文集, No. 598/I-44, 359-370, 1998. 7.
- [2] 当麻庄司, 本田明成, 倉真也: 鋼道路橋の新荷重(B荷重)による鋼重増加の統計的分析, 土木学会論文集, No. 619/I-47, 299-303, 1999. 4.
- [3] (社)日本橋梁建設協会: 橋梁年鑑, ~平成15年版(平成13年度完工).
- [4] 松井繁之: 合成桁橋の復権と合成構造の開発と研究, 鋼構造論文集, 1994. 6.
- [5] 鈴木 巧, 当麻庄司, 外山義春: 合成桁橋と非合成桁橋の合理性について, 土木学会第50回年次学術講演会概要集第I部(A), pp. 630-631, 1995. 9.

(2005年9月10日受付)