

(26) 応力スペクトルを考慮した合成桁橋におけるスタッドの疲労安全性照査

VERIFICATION FOR FATIGUE SAFETY OF STUD IN COMPOSITE GIRDER BRIDGES IN CONSIDERATION OF STRESS SPECTRUM

平城弘一* 神原康樹** 武藤和好***
By Hirokazu HIRAGI, Yasuki KANBARA, Kazuyoshi MUTOH,
谷垣博司**** 文 兌景***** 松井繁之*****
Hiroshi TANIGAKI, Teagyeong MOON and Shigeyuki MATSUI

Studs in composite girder bridges are mainly subjected to random horizontal shear stress by vehicle loads. To design the studs appropriately, it is necessary to consider fatigue strengths. However, the studs designed by the present design specification in Japan are omitted to be checked against fatigue, because it is considered that the studs have too sufficient margin for fatigue.

Therefore, it is demanded to derive a rational fatigue design method for the stud in composite girder bridges. In the paper, the fatigue safety of the studs in standard composite girder bridges proposed by the Ministry of Constructions was investigated with the simulated stress spectrums due to actual vehicle loads.

1. まえがき

わが国における頭付きスタッドを使用した合成桁橋の建設は、昭和35年頃から始まり、国の内外で実施された研究の成果を参考にし、福岡県および東京都において3橋がほぼ同時に試験施工された。その後、昭和40年6月改訂の「鋼道路橋の合成桁設計施工指針」において、新しくスタッドに関する条項が設けられて以来、合成桁のずれ止めにはスタッドが施工の容易さから、飛躍的に使用実績を伸ばしている。昭和40年初頭から昭和50年前半に建設された単純支持のプレートガーダーはごく小スパンのものを除いて、すべてがスタッドを用いた合成桁であると言ってよいほどである¹⁾。

ところで、合成桁橋におけるスタッドは、桁端を除いて活荷重により発生する変動応力が支配的であるため、疲労問題が設計上クリティカルな要因となる。しかしながら、現行の道路橋示方書では、スタッドに関する設計値（許容せん断力）は、疲労に対しても安全側の評価をしていると判断されているため、スタッド

*	工博	摂南大学助教授	工学部土木工学科	**	工修	駒井鉄工(株)	橋梁設計部
***	工修	(株)酒井鉄工所	橋梁設計部	****		大阪大学	工学部土木工学科
*****	工博	大阪大学助手	工学部土木工学科	*****	工博	大阪大学教授	工学部土木工学科

に対する疲労安全性の照査が省略されている。この種の合成桁の供用年数は最も古いもので35年間となっているが、現在のところ、実構造でのスタッドの疲労破壊が報告されていないものの、スタッドは活荷重用により、疲労破壊を起こす可能性を含んでいる。

本研究の目的は、近い将来、合成桁の設計手法が限界状態設計法に移行するであろうことを予想して、合成桁橋におけるスタッドの疲労設計法を確立することである。本文はモンテカルロ法を用いて実働の活荷重列を再現し、スタッドに作用する水平せん断力のスペクトル解析を行い、建設省標準橋梁（活荷重合成桁）について、スタッドに関する疲労安全性を照査した結果について述べるものである。

2. スタッドの疲労安全性照査法の流れ
- 2.1 一般
- BS5400, Part10では、疲労安全性を照査する方法として、次の3種類が規定されている²⁾。
- ①被害計算を行わない照査
 - ②単一車両による被害計算(ずれ止めは対象外)
 - ③応力スペクトルによる被害計算

本論文では、スタッドの正確な疲労安全性の評価を行うため、さらに、わが国では疲労照査のための標準車両が現行示方書に規定されていないので、応力スペクトルによる被害計算に従って行うものとした。図-1に疲労照査検討のためのフローチャートを示す。

2.2 荷重用

(A)活荷重モデル

活荷重モデルとして、建設省が実測した「一般国道³⁾」および大阪大学が実測した重車両が頻繁に通行する「臨海国道⁴⁾」

を選定した。車種数はともに8種である。表-1と-2に一般国道型と臨海国道型の測定値をそれぞれ示す。

(B)活荷重列の生成

活荷重列の生成は、モンテカルロシミュレーション手法を用いて行った。なお、シミュレーション

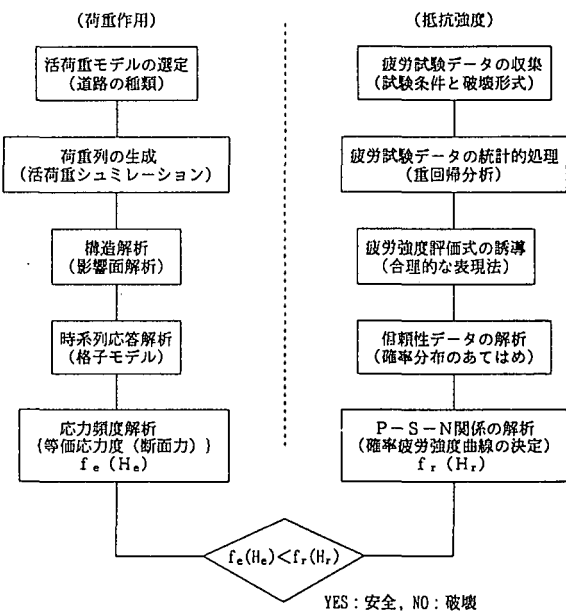


図-1 スタッドの疲労照査検討のためのフローチャート

表-1 自動車荷重モデル（一般国道：建設省の実測データ）

車 種 分 類	総重量の特性値 (tonf)					混入率 (%)	軸 数	軸 重 算 定 式		
	分布形	μ	σ	最大値	最小値			第1群	第2群	第3群
1:乗用車類	LN	1.30	0.36	2.00	0.80	55.10	2	0.501W+0.030	0.499W-0.030	—
2:小型トラック類	LN	3.60	1.35	8.00	1.00	12.40	2	0.231W+0.760	0.769W-0.760	—
3:中型トラック類	LN	6.20	2.50	15.00	2.00	13.10	2	0.182W+1.380	0.818W-1.380	—
4:大型トラック類	LN	17.00	6.30	40.00	5.00	10.30	3	0.109W+3.220	0.891W-3.220	—
5:大型トラック・ミキサー類	LN	20.00	9.80	50.00	5.00	3.00	3	0.081W+3.600	0.919W-3.600	—
6:タンクローリー類	LN	16.00	7.00	40.00	5.00	1.70	2	0.107W+3.010	0.893W-3.010	—
7:セミトレーラー類	LN	30.00	12.00	70.00	8.00	3.40	4	0.024W+4.190	0.360W+0.700	0.616W-4.890
8:大型バス類	LN	13.80	2.40	25.00	5.00	1.00	2	0.376W-0.464	0.624W+0.464	—

表-2 自動車荷重モデル（臨海国道：大阪大学の実測データ）

車 種 分 類	総重量の特性値 (tonf)					混入率 (%)	軸 数	軸 重 算 定 式		
	分布形	μ	σ	最大値	最小値			第1群	第2群	第3群
1:乗用車類	LN	1.30	0.36	2.00	0.80	37.20	2	0.501W+0.030	0.499W-0.030	—
2:2軸車類	LN	10.20	6.66	50.00	2.00	19.20	2	0.296W+0.680	0.704W-0.680	—
3:後クゲム3軸車類	LN	22.40	14.71	70.00	7.00	21.50	3	0.105W+3.410	0.895W-3.410	—
4:前クゲム3軸車類	LN	20.00	13.08	50.00	7.00	12.50	3	0.178W+2.740	0.415W-1.270	0.407W-1.470
5:セミトレーラー4軸車類	LN	34.80	22.97	90.00	10.00	3.80	4	0.057W+5.050	0.295W-0.020	0.648W-5.030
6:タンクローリー4軸車類	LN	27.40	18.84	100.00	9.00	1.30	4	0.332W+1.700	0.668W-1.700	—
7:セミトレーラー5軸車類	LN	48.90	32.84	110.00	14.00	2.10	5	0.042W+4.110	0.377W+1.190	0.581W-5.300
8:セミトレーラー6軸車類	LN	59.10	40.96	110.00	14.00	2.40	6	0.023W+4.960	0.237W+2.550	0.680W-7.510

表-3 活荷重列生成の種別

対 象	交通量と生成条件
一 般 国 道	台数/1時間 走行
	500台/hr 24 自由
	600台/hr 24 自由
	600台/hr 100 自由
臨海地域 (重車両)	600台/hr 100 渋滞
	600台/hr 24 自由

で用いる疑似乱数によって、自動車重量に現実性のない値が発生することも予想されるので、表-1と-2に示すような最大・最小値を設定した。さらに、活荷重列の生成は、表-3に示すように、通行台数、生成時間および走行条件を変化させて5種類とした。表-4と-5には一般国道の代表的な生成された活荷重列の重量特性と臨海国道のものをそれぞれ示す。これら生成された荷重特性は、表-1と-2の活荷重モデルとよく一致していることが分かる。

(C)構造解析

(1)解析モデル

今回対象とした活荷重合成桁は、建設省標準設計によるものである。スパンは25m, 30m, 33m, 35m, 40mおよび44mの6種類とした。道路分類は幹線道路、幅員構成は歩道がなく、車道幅員は8.5m, のものを選定した。車両の通行位置と4本主桁の配置を図-2に示す。

(2)影響面解析

スタッドに作用する水平せん断力を求めるための影響面解析法として、今まで一般的であった完全合成理論に従う解析法と、ずれを許容した不完全合成理論に従う解析法で行うことにした。なお、不完全合成理論に用いるバネ定数は、残留ずれが0.050mmおよび0.075mmに相当する2種類のものを用いた⁵⁾。一例として、完全合成および不完全合成のスタッド1本に作用する水平せん断力に対する影響面を図-3と-4に示す〔スパン長33m(中桁L/2)〕。これらの図より明らかなように、不完全合成理論に対する影響面の方

表-4 生成された活荷重列の重量特性（一般国道：建設省の実測データ）

車 種 分 類	発生台数 (台)	混入率 (%)	発生重量の特性値 (tonf)			
			平均値	標準偏差	最大値	最小値
1:乗用車類	15892	55.2	1.292	0.323	2.000	0.800
2:小型トラック類	3521	12.2	3.597	1.304	8.000	1.020
3:中型トラック類	3832	13.3	6.152	2.436	15.000	2.000
4:大型トラック類	2946	10.2	16.818	6.240	40.000	5.000
5:大型ダンプ・ミキサー類	873	3.0	19.884	9.330	50.000	5.000
6:タンクローリー類	515	1.8	16.231	7.151	40.000	5.138
7:セミトレーラ類	941	3.3	29.660	11.324	70.000	8.792
8:大型バス類	280	1.0	13.945	2.601	24.518	8.648
全 車 種	28800	100.0	5.689	8.018	70.000	0.800

表-5 生成された活荷重列の重量特性（臨海国道：大阪大学の実測データ）

車 種 分 類	発生台数 (台)	混入率 (%)	発生重量の特性値 (tonf)			
			平均値	標準偏差	最大値	最小値
1:乗用車類	10663	37.0	1.292	0.324	2.000	0.800
2:2軸車類	5580	19.4	10.090	6.407	50.000	2.000
3:後方デム3軸車類	6221	21.6	22.179	13.346	70.000	7.000
4:前方デム3軸車類	3571	12.4	19.390	11.168	50.000	7.000
5:セミトレーラ4軸車類	1105	3.8	33.770	19.859	90.000	10.000
6:タンクローリー4軸車類	403	1.4	29.025	19.148	100.000	9.000
7:セミトレーラ5軸車類	603	2.1	47.754	26.260	110.000	14.000
8:セミトレーラ6軸車類	654	2.3	54.112	28.720	110.000	14.000
全車種	28800	100.0	13.559	16.568	110.000	0.800

表-6 構造解析（準立体解析）の種類

合成理論	ずれ定数(kgf/cm)
完全	∞
不完全	① 2.725x10 ⁵ (at $\delta'=0.050$ mm)
	② 2.299x10 ⁵ (at $\delta'=0.075$ mm)

δ' :鋼とコンクリートの間に生じる残留ずれ量

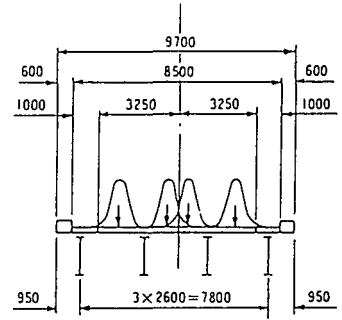


図-2 幅員構成と主桁間隔

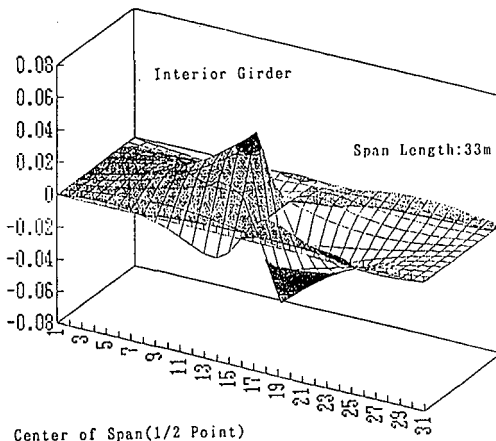


図-3 完全合成理論の影響面（中桁）

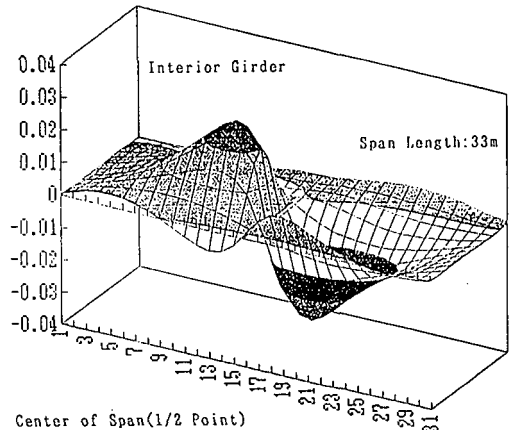


図-4 不完全合成理論の影響面（中桁）

が応力の再配分によって、完全合成理論のものより滑らかな曲線で描かれていることが分かる。

(D)時系列応答解析

(C)で求めた影響面の走行レーン上に、(B)で生成した活荷重列を走行させて時系列の応答値を求める。

(E)応力頻度解析

(D)で求めた時系列のランダムな応答値は、疲労試験で得られるS-N関係図と関係づける必要がある。そこで、線形被害則と称されるマイナー則を適用するために、レインフロー法により水平せん断力の変動範囲に対する頻度分布を求める。一定応力範囲に変換された等価水平せん断力 (H_e) は次式によって算出する。

$$H_e = [\sum (H_i)^m \cdot h_i]^{(1/m)} \quad (1)$$

ここで、 H_i :作用水平せん断力、 m : H/Q_u -N曲線の傾きの逆数、

h_i : $(=n_i/N)$ 、 n_i :繰返し回数、 N :全繰返し回数

表-7～表-12に(600台/h、24時間、自由走行)の場合の等価水平せん断力を示す。さらに、これらの結果を比較検討するために、図をもって示すこととした。図-5は、完全合成理論より求めた等価水平せん断力の橋軸方向の変化を示したものである。この図より明らかなように、一般・臨海国道とも等価水平せん断力は、スパン中央に近づくほど大きくなっていることが分かる。これは、桁端では温度差・乾燥収縮による応力を考慮し、スタッドが密に配置され、スタッド1本当たりの作用力が低減されるためである。さらに、臨海国道の等価水平せん断力は、一般国道のものに比べて、相対的にほぼ2倍程度の値を示した。これは、臨海国道の方が一般国道に比べ、大型車両の混入率が高く、総重量の平均値が約2.4倍となっているためである。そこで、他の走行条件〔(500台/h、24時間、自由走行)、(600台/h、100時間、(自由・渋滞)走行)〕との比較においては、それほどの差異は認められなかった。図-6は、不完全合成理論(残留ずれ0.075mm)より求めた等価水平せん断力の橋軸方向の変化を示したものである。この図から明らかなように、不完全合成理論より求めた水平せん断力は、応力の再配分が起こり、桁端を除いて、ほぼ等しい値となっていることが分かる。そして、完全合成理論の値に比べ若干低い値となっている。図-7は、完全合成理論と不完全合成理論の等価水平せん断力を比較したものである。この図から明らかなように、L/8点と3L/8点とは両合成理論の結果が等しいものの、相対的に完全合成理論の値の方が大きい値を示していることが分かる。また、不完全合成理論のバネ定数を変化させた結果については、(一般・臨海)国道とも、顕著な相違がないことが分かった。

2.3 抵抗強度

(A)疲労試験データの収集

国の内外で実施されたスタッドの押抜き疲労試験結果を収集・整理する。

表-11 等価水平せん断力(臨海国道:不完全合成桁①)
(24時間, 600台/h, 自由走行, 単位: kgf)

桁	支間長 (m)	着目点 (L: スパン)				
		桁端	L/8	L/4	3L/8	L/2
中	25	783.0	1694.1	1800.0	2133.9	2075.7
	33	885.8	1610.4	1788.5	1848.1	2237.2
	40	647.6	1615.2	1656.0	1600.7	1558.5

表-7 等価水平せん断力(一般国道:完全合成桁)
(24時間, 600台/h, 自由走行, 単位: kgf)

桁	支間長 (m)	着目点 (L: スパン)				
		桁端	L/8	L/4	3L/8	L/2
中	25	730.7	897.2	1316.7	1301.7	1366.3
	30	679.6	962.2	723.1	642.3	728.1
	33	753.9	780.8	1057.8	1016.7	1606.2
	35	751.9	769.4	1083.0	1048.4	1134.1
	40	658.6	1090.4	1050.0	1215.3	1326.3
外	44	586.0	769.3	967.7	1045.1	946.6
	25	492.6	783.0	938.0	850.3	722.6
	30	599.4	1183.9	1239.0	1166.4	982.8
	33	572.3	692.4	547.8	714.8	907.1
	35	529.0	921.8	845.3	1119.4	639.5
	40	474.9	826.5	882.0	884.1	784.5
	44	427.8	674.5	794.0	693.6	721.3

表-8 等価水平せん断力(一般国道:不完全合成桁①)
(24時間, 600台/h, 自由走行, 単位: kgf)

桁	支間長 (m)	着目点 (L: スパン)				
		桁端	L/8	L/4	3L/8	L/2
中	25	424.2	957.8	906.3	1109.0	1133.0
	33	467.3	783.7	902.1	961.8	1157.2
	40	354.2	798.9	854.7	838.1	831.0
外	25	615.7	605.8	595.8	754.0	715.5
	33	555.5	566.3	635.0	632.0	713.6
	40	490.3	533.7	483.7	468.2	495.0

表-9 等価水平せん断力(一般国道:不完全合成桁②)
(24時間, 600台/h, 自由走行, 単位: kgf)

桁	支間長 (m)	着目点 (L: スパン)				
		桁端	L/8	L/4	3L/8	L/2
中	25	439.3	925.6	894.1	1069.9	1094.0
	33	475.7	774.7	881.5	944.9	1121.7
	40	369.5	795.1	806.4	792.1	785.5
外	25	518.5	629.4	648.3	744.6	704.1
	33	553.8	566.5	632.2	629.4	700.3
	40	493.4	539.7	479.4	459.5	486.2

表-10 等価水平せん断力(臨海国道:完全合成桁)
(24時間, 600台/h, 自由走行, 単位: kgf)

桁	支間長 (m)	着目点 (L: スパン)				
		桁端	L/8	L/4	3L/8	L/2
中	25	1452.4	1848.0	2507.3	2438.4	2614.3
	33	1530.7	1569.8	2000.8	1929.3	3160.6
	40	1330.1	2173.0	2016.6	2334.1	2525.8
外	33	853.5	1160.6	1213.3	1087.3	1529.6

表-12 等価水平せん断力(臨海国道:不完全合成桁②)
(24時間, 600台/h, 自由走行, 単位: kgf)

桁	支間長 (m)	着目点 (L: スパン)				
		桁端	L/8	L/4	3L/8	L/2
中	25	796.8	1640.4	1779.2	2078.9	2020.4
	33	905.5	1591.1	1753.1	1815.5	2170.4
	40	681.1	1605.1	1566.3	1524.1	1506.3

そのとき、試験条件または破壊形式が適合しているかを判断しておかねばならない。

(B) 疲労試験データの統計的処理

一般に、疲労試験結果はバラツキが大きい。この試験データのバラツキの要因および疲労強度に及ぼす影響因子を明らかにするために重回帰分析を行う。

(C) 疲労強度評価式の誘導

(B)で得られた結果より、スタッドに関する合理的な疲労強度評価式を導出する。著者らは、既に既往の試験データに基づき、次式のようなスタッドに関する疲労強度式を誘導している(はり試験結果との適合性もよい)⁶⁾。

$$H/Q_u = 1.28 \cdot N^{-0.105} \quad (2)$$

ここで、H:スタッド1本に作用する水平せん断力の変動範囲 (kgf)、

Q_u :スタッド1本当たりの静的強度

$$\{Q_u = 100 \cdot A_s \cdot \sqrt{(h_s/d_s) \cdot f_c + 1000}\},$$

A_s :スタッド軸部の断面積 (cm²)、

h_s :スタッドの全高 (cm)、

d_s :スタッド軸部の直径 (cm)

(D) 信頼性データの解析

(C)で導かれた疲労強度に関する合理的な表現法をもってしても、試験データのバラツキをなくすることができない。そのため、試験データの確率分布のあてはめを行い、確率論的手法を導入する。

(E) ワイブル分布の解析

通常、疲労試験データはワイブル分布であてはめられることが多い。ここでは、3つのワイブルのパラメータは最尤法により決定した。このように、疲労試験データの信頼性を高めることは、破壊確率を一定値以内に抑えて、疲労に対する安全性の余裕を確保することに帰着する。

$$L = \sum_{i=1}^n \ln \{p(\chi_i)\} \quad (3)$$

ここで、L:尤度関数

$p(\chi_i): dP/d\chi_i$ 、

$$P = 1.0 - \exp \{ - [(\chi_i - \chi_0) / \beta]^m \}$$

P:破壊確率、 χ_i :測定値(強度・寿命の偏差)、

m, β, χ_0 : (形状・大きさ・位置)のパラメータ

最尤推定法の結果、ワイブルのパラメータが次のように得られた: $m=18.1934$, $\beta=1.02530$, $\chi_0=-1.00485$ 。

上記の3つのパラメータを用いて、破壊確率2.3%に関するスタッドの疲労強度式として次式が得られる。

$$H/Q_u = 0.86 \cdot N^{-0.105} \quad (4)$$

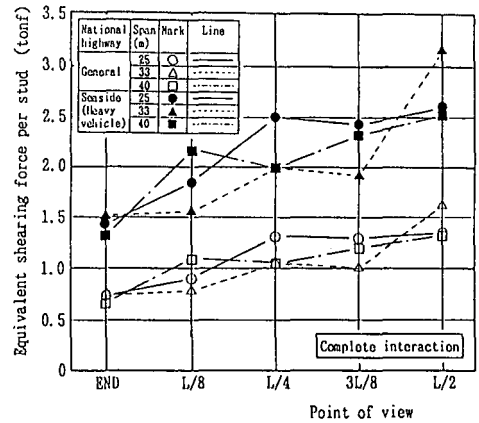


図-5 等価水平せん断力のスパン方向の変化(完全合成)

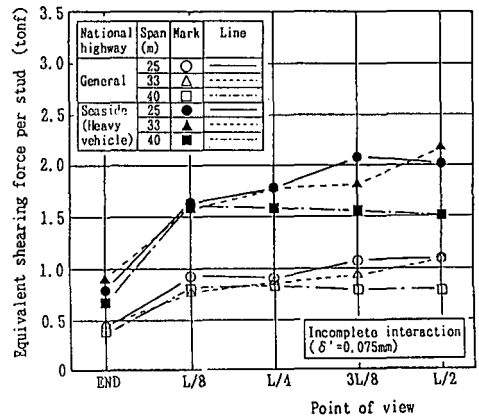


図-6 等価水平せん断力のスパン方向の変化(不完全合成②)

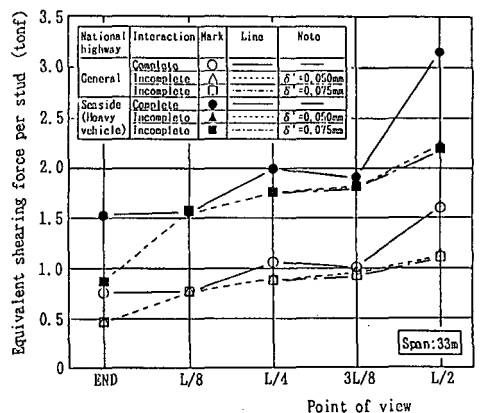


図-7 完全・不完全合成理論による等価水平せん断力の相違

3. スタッドの疲労安全性照査

図-8は、スタッドに関する確率疲労線図(P-H/Q_u-N関係)を示したものである。なお、同図の縦軸はスタッド1本当りに作用する水平せん断力(H)をスタッドの静的強度(Q_u)で除した値であるせん断力比(H/Q_u)で表現されている。ここで、スタッドの静的強度は18.191tonfである。さらに、同図にはスタッドに関する破壊確率2.3%と50.0%の疲労強度式を併記してある。破壊確率2.3%はBS5400の考え方に従っている²⁾。

スタッドの疲労安全性照査は、図-1に示す判別式($f_e/f_r \leq 1.0$ のとき安全)をもって行う。まず、既往の押抜き試験データが超高サイクル領域においても、同じ傾きで同じバラツキを持つものと仮定する。また、設計寿命を50年間とすると、その間に対象橋梁を通過する推定車両台数は $N_r=5.256 \times 10^8$ 台となる($=1200 \times 24 \times 365 \times 50$)。次いで、図-8から車両の推定通過回数(N_r)と破壊確率2.3%の疲労強度曲線との交点を求め、疲労照査用の抵抗強度であるせん断力比(f_r)を得る($= (H_r/Q_u) \times 100$)。本研究では $f_r=10.426\%$ であった。最終的に、荷重作用から算出した等価せん断力比 f_e ($= (H_e/Q_u) \times 100$)と f_r との比(f_e/f_r)を計算することによって、スタッドに関する疲労安全性の照査をしたことになる。そして、破壊確率2.3%で設計寿命50年間におけるスタッドの疲労照査結果を表-13に示す。この表より明らかなように、一般国道では、完全合成理論および不完全合成理論①&②とも、 f_e/f_r 値が1.0より十分小さいことより、建設省標準設計橋梁のスタッドは疲労に対して十分安全であることが確認できた(いずれの活荷重生成の種類もこの範囲内に入っている)。一方、重車両が頻繁に通過する臨海地域の国道では、完全合成理論に従う橋梁のすべてのスパンに対して、 f_e/f_r 値が1.0以上となっていた。また、不完全合成理論①&②に従う橋梁の40mのスパンを除いて、同様に f_e/f_r 値が1.0以上となっていた。このことより、今回解析に使用した臨海国道に架かる建設省標準合成橋梁のスタッドは疲労に対して危険な場合もあることが分かった。

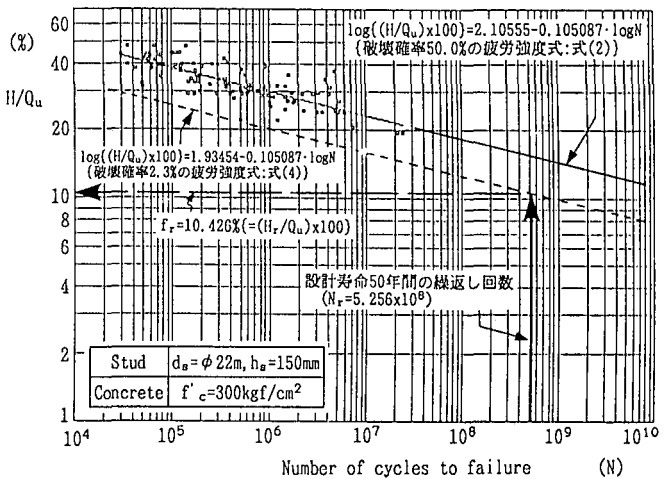


図-8 P-H/Q_u-N関係を用いたスタッドの疲労安全性照査

表-13 設計寿命50年におけるスタッドの疲労照査結果(f_e/f_r 値)

国道	完全合成理論			不完全合成理論①			不完全合成理論②		
	25m	33m	40m	25m	33m	40m	25m	33m	40m
一般	0.434~0.847			0.395~0.612			0.388~0.593		
臨海	1.378	1.667	1.332	1.094	1.180	0.822	1.065	1.144	0.794

$f_e/f_r \leq 1.0$ のとき安全、 $f_e = (H_e/Q_u) \times 100$, $f_r = (H_r/Q_u) \times 100$, $P=2.3\%$

4. 結論

本研究を要約すると次のような結論を述べるができる。

- (1) 一般国道：標準合成桁橋におけるスタッドは、疲労に対して十分安全であることが明らかになった。
- (2) 臨海国道：今回の完全合成理論による照査結果より、すべてのスパンに対して、また、不完全合成理論①&②による照査結果より、スパン40m以外のものに対して、 f_e/f_r 値が1.0以上となることが明らかになった。よって、今解析の臨海国道での標準合成桁橋におけるスタッドは、疲労に対して危険な場合も存在する。

参考文献

1)前田幸雄：合成桁の理論と実際、季刊カラム、No.35, pp.27-33, 1970.
2)BSI:BS5400,Part10.Code of Practice for Fatigue, 1980.
3)建設省土木研究所：限界状態設計法における設計荷重に関する検討、土木研究所資料、第2539号、1988。
4)松井・守屋・谷垣・大野：石津大橋における活荷重特性に関する調査研究、土木学会関西支部年講、I-33、1995。
5)平城弘一：頭付きスタッドの静的および疲労強度と設計法に関する研究、大阪大学博士学位論文、1990。
6)松井・平城・福本：頭付きスタッドの強度評価式の誘導-疲労強度評価式-、構造工学論文集、Vol.35A, pp.1233-1244, 1989。