

(26) ウレタン付きスタッドの疲労強度と乾燥収縮応力低減効果

Fatigue strength of the urethane-wound stud and its reduction effect of tensile stress owing to shrinkage of concrete

武藤和好*, 平城弘一**, 松井繁之***, 石崎 茂****

Kazuyoshi Muto, Hirokazu Hiragi, Shigeyuki Matsui, Shigeru Ishizaki

* (株)酒井鉄工所 橋梁設計部 橋梁設計課 課長補佐 (〒590-0831 大阪府堺市出島西町 3-1)

** 工博, 摂南大学助教授, 工学部土木工学科 (〒572-8508 大阪府寝屋川市池田中町 17-8)

*** 工博, 大阪大学大学院教授, 工学研究科土木工学専攻 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

**** (株)酒井鉄工所 技術開発部長 (〒590-0831 大阪府堺市出島西町 3-1)

From the static tests, it has been clarified that the urethane-wound studs have high restorable performance rather than usual headed studs and slab clamps. The next problem is to investigate the fatigue strength of the flexible studs. Then the influence of the flexible studs to cracks of slabs owing to shrinkage and temperature is important. In this paper, fatigue strength of the flexible studs are reported from the results of push-out tests, beam tests and slab tests. Furthermore, the effect of the flexible studs to reduce tensile stress in concrete slab due to drying shrinkage by concrete is discussed with FEM analysis on simple and flexible composite girder models.

Key Words: flexible stud, fatigue strength, shrinkage strain and stress

1. まえがき

我が国の鋼桁橋には、コンクリート床版が主桁の一部として挙動することを期待するか否かという設計計算上の仮定によって、合成桁・非合成桁という構造区分が存在する。そして、床版と鋼桁をつなぐ連結材には、この構造区分に応じてスタッドジベルとスラブアンカーが使い分けられている。非合成桁に用いられるスラブアンカーは、床版と鋼桁の相対位置の確保のみを期待されているが、実際には、鋼桁の曲げ変形に伴う水平せん断力を伝達しており、非合成桁であっても合成桁に近い挙動を呈することが分かっている。そして、近年、非合成桁橋のスラブアンカーが疲労破壊を起こしていることから、理想的な非合成挙動が期待でき、かつ疲労耐久性に優れた連結材の開発が望まれる。

著者らは、床版を鋼桁に柔軟に固定する連結材として、通常の頭付きスタッドの根元部に、緩衝材として発泡ウレタンを巻き付けた「柔スタッド」を考案した。この適用によって、

- ① 非合成桁橋における理想的な非合成挙動
- ② 繰り返し作用する水平せん断力に対して、広範囲の柔スタッドで抵抗するずれ止め機構の実現
- ③ 負曲げによるRC床版の引張力や、乾燥収縮あるいは

温度差によるひびわれ問題に起因する、プレストレスしない連続合成桁橋の性能低下・耐久性低下の解消などの効果が期待できる。

これまでの研究では、この柔スタッドを用いた押抜き試験体およびはり試験体に対して静的載荷試験を実施し、基本性状を確認してきた^{1)~3)}。本研究では、より実橋に近い状態での性状を確認するため、まず、押抜き試験体、はり試験体、および、RC床版試験体を実施した疲労試験結果を報告する。つぎに、床版の乾燥収縮ひずみを鋼桁が拘束するために発生するコンクリートの引張応力度が、柔スタッドによってどの程度低減されるかを計算した結果を示す。

2. ウレタン付きスタッドの基本性状

これまでの静的載荷試験から得られた、ウレタン付きスタッドの基本性状は次のとおりである。

(1) 押抜き試験結果

- 1) ウレタン付きスタッドは、通常のスタッドと同程度のせん断耐力を有し、ずれ剛性は約 1/2 になる。また、柔スタッド 2 本(φ19)とスラブアンカー 1 本(φ16)の静的耐力がほぼ等しい。

表1 押抜き試験体

タイプ	ずれ止め (スタッド)	ウレタン高さ, 厚さ(mm)
PS19-N	φ19x120	なし
PS19-20	φ19x120	20, 9
PS19-30	φ19x120	30, 9
PS19-40	φ19x120	40, 9
PS16-N	φ16x120	なし

表2 はり試験体

タイプ	ずれ止めの種類と 配置間隔(mm)	ウレタン高さ, 厚さ(mm)
BS2-N	スタッド φ19x120, @450	なし
BS2-30	スタッド φ19x120, @450	30, 9
BS4-N	スタッド φ19x120, @225	なし
BS4-30	スタッド φ19x120, @225	30, 9
BC4	スラブアンカー φ16, @435	なし

表3 RC床版試験体

タイプ	ずれ止め	ウレタン高さ, 厚さ(mm)
SS19-N	スタッド φ19x120	なし
SS19-30	スタッド φ19x120	30, 9
SS19-50	スタッド φ19x120	50, 9
SS19-60	スタッド φ19x120	60, 9
SS16-N	スタッド φ16x120	なし
SC16	スラブアンカー φ16	なし

- 2) ウレタン付きスタッドは、ずれに関する大きな復元性能を有し、かつ、荷重-ずれ関係には、せん断力が一定の状態ですれが進行する「流れ領域」が存在する。
- 3) 多段配置した柔スタッドの1本あたりの静的耐力は、1段配置した場合の耐力の80~85%程度となる。また、相対ずれの性状は、載荷初期はほぼ同じであるが、ずれの流れ領域を過ぎると若干の違いが現れる。

(2) はり試験結果

- 1) ウレタン付きスタッドが重ねばりに近い不完全合成の挙動を示すのは、載荷荷重が実橋における通常の車両通行状態（供用荷重レベル）に相当する値となった時であり、柔なずれ止めとしての挙動は、供用後比較的早期の段階で期待できる。
- 2) 押抜き試験結果と同様に、柔スタッドを用いたはりの復元性能は、通常のスタッドやスラブアンカーを使用したものよりも優れている。
- 3) はりの曲げ耐荷力は、スタッド根元部のウレタンの有無に関係なく、ほぼ同じである。

3. 疲労試験結果と疲労強度

3.1 試験体の種類と試験方法

表1~3に疲労試験を実施した各試験体の種類とずれ止めの種類や間隔を、表4に使用したコンクリートの特性値を示す。押抜き試験体の形状は図1に示すもので、日本鋼構造協会の試験方法(案)に従った4)。押抜き疲労試験は全て頭付きスタッドに関して、ずれ制御の載荷方法で行い、ウレタンの有無と高さがパラメータである。

図2に示すように、はり試験は主桁作用による水平せん断力に対する疲労強度を調べるものである。実験のパラメータは、ずれ止めの種類と間隔、ウレタンの有無であり、荷重範囲を一定にして実施した。RC床版試験体は、図3に示すように、鋼桁上フランジに見立てた鋼板にずれ止めを溶植し、ハンチを有するRCはりを打設したものである。これは、輪荷重の通行によって生じる床版の曲げ作用に対する疲労強度を調べるものであり、ずれ止めの種類とウレタンの有無をパラメータとし、変位制御による疲労試験とした。

3.2 試験の結果と考察

(1) 押抜き試験

図4にスタッド背面位置（H形鋼のフランジ内面）の

表4 コンクリートの特性値

試験体	fc' (N/mm ²)	Ec (N/mm ²)
押抜き	33.3	2.79x10 ⁴
はり	29.8	2.75x10 ⁴
床版	29.8	2.75x10 ⁴

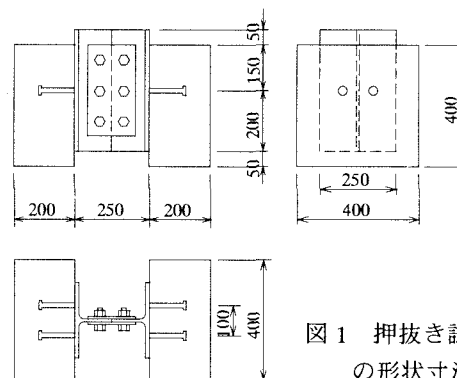


図1 押抜き試験体の形状寸法

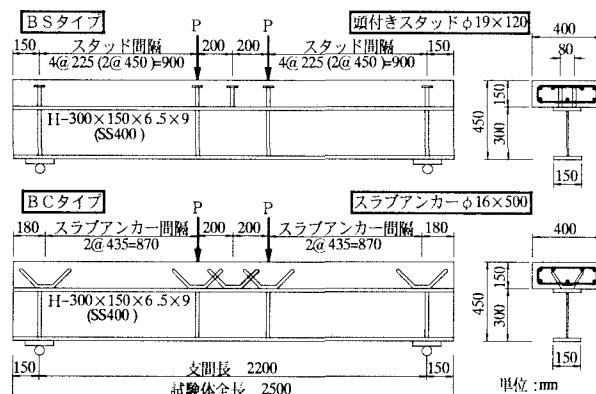


図2 はり試験体の形状寸法

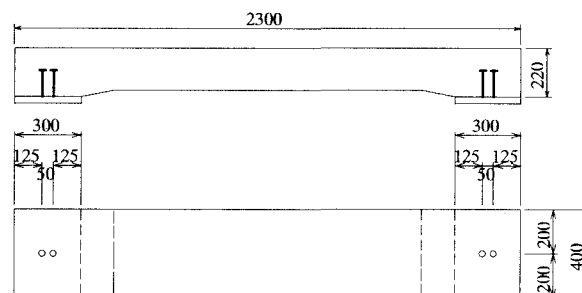


図3 RC床版試験体の形状寸法

ひずみと繰り返し回数との関係の一例を示す。この図より、スタッドのせん断力を示すひずみの急変する回数が、4本のスタッドではほぼ同時であることが分かる。したがって、スタッド背面のひずみが0に急接近した回数が、スタッドが疲労破断に至った繰り返し回数であると推定できる。

このように推定した破壊回数とずれの関係を表5に示す。この表より、通常スタッドよりも柔スタッドのほうが疲労耐久性に優れており、ウレタン高さ3cmの場合が最も有利であることが分かる。これは、繰り返し荷重に対して大きなずれを許容するようなずれ止め配置を行っても、ウレタン高さ3cmであれば疲労破断が生じにくいことを示している。そして、静的押抜き試験の結果から、柔スタッドのずれ定数は通常スタッドのその約1/2であるが、疲労試験で制御したずれ範囲は通常スタッドの7.5倍であり、両者の積に相当する分担せん断力の比較においても、柔スタッドの有利性がうかがえる。

(2) はり試験

はり試験は、荷重範囲 ΔP を105 kN (5 kN~110 kN)として実施した。図5および6に、支間中央点のたわみの変動範囲と繰返し回数との関係を示す。ずれ止め間隔が225mmの場合(図5)は、通常スタッドとウレタン付きスタッドの間に顕著な差が見られず、たわみの変動範囲はほぼ一定である。しかし、ずれ止め間隔が450mm程度の場合(図6)では、通常スタッド、柔スタッド、スラブアンカーの間に明確な相異が現れている。

通常スタッドの場合は、10万回未満の比較的早期の段階でたわみの急増が現れ、スタッドが破断している。これに対して、柔スタッドは100万回を超えてから最初の急増が確認できる。つまり、柔スタッドでは、鋼桁と床版の接合面に作用する水平せん断力を、広域の連結材が共同して柔らかく伝達するずれ止めシステムになるため、応力集中が生じにくいといえる。なお、スラブアンカーを用いた試験体では、たわみに顕著な変化が見られない。また、支間中央点における鋼桁下フランジのひずみや桁端部における床版と鋼桁のずれも同時に測定したが、たわみの性状とほぼ同様の傾向であった。

試験後に床版を取り除いて観察したところ、通常スタッドと柔スタッドで疲労亀裂の発生と進展個所に違いが見られた。通常スタッドでは、フランジ側の溶接止端部から亀裂が発生し、この部位の熱影響部に沿って進展するものであったが、柔スタッドでは、スタッド軸側の溶

表5 ずれ範囲と破壊回数

タイプ	ずれ範囲 $\Delta \delta$ (mm)	破壊回数 ($\times 10^6$)
PS19-N	0.04	13.08
PS19-20	0.30	5.46
PS19-30	0.30	25.12
PS19-40	0.30	8.57
PS16-N	0.30	0.70

表6 荷重範囲と破壊回数

タイプ	荷重範囲 ΔP (kN)	破壊回数 ($\times 10^4$)
SS19-N	78.5	54.72
SS19-30	78.5	外側 183.96, 内側 214.97
SS19-50	78.5	外側 28.54, 内側 52.08
SS19-60	78.5	外側 56.67, 内側 82.46
SS16-N	68.6	外側 40.65, 内側 66.53
SC16	78.5	19.57
Pmin は 9.8 kN で一定		

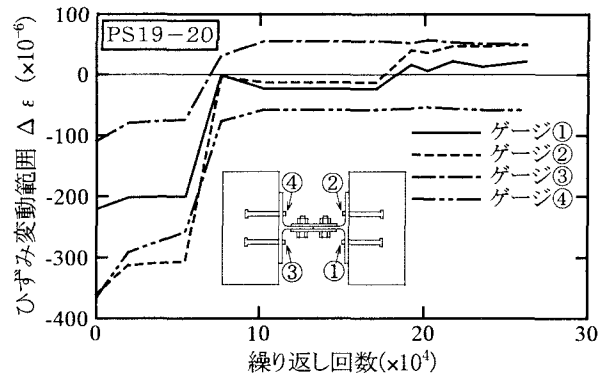


図4 スタッド背面のひずみと繰返し回数

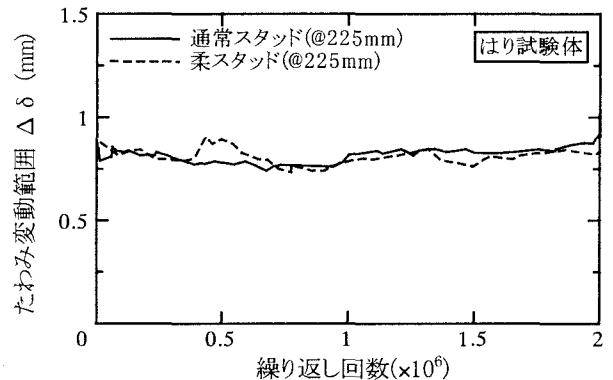


図5 たわみの変動範囲と繰返し回数の関係
(ずれ止め間隔 225mm)

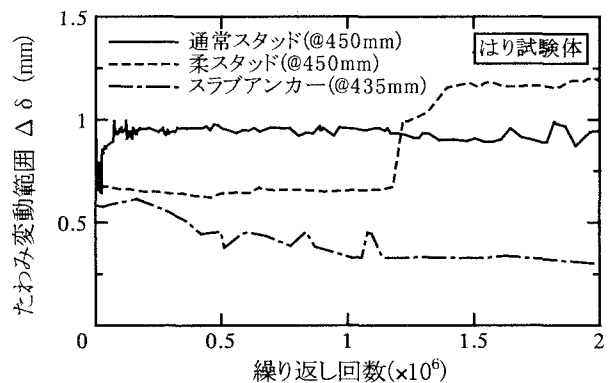


図6 たわみの変動範囲と繰返し回数の関係
(ずれ止め間隔 450mm 程度)

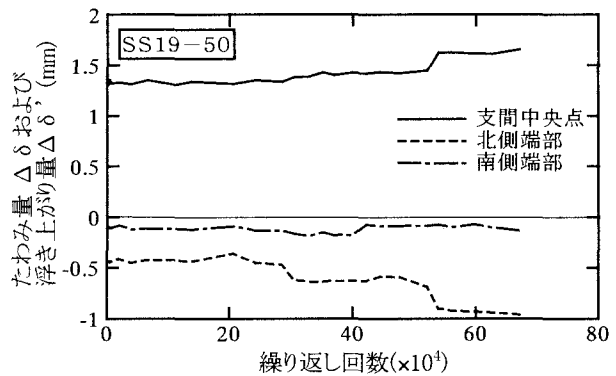


図7 変位と繰返し回数の関係

ばね定数は、完全合成の場合は剛結(1x10⁶kN/cm/本)、柔スタッドでは1133kN/cm/本とし、鉛直方向は全て剛結としたが、実際には、ずれ止め間隔と要素分割から換算した節点ばね定数を用いた。本研究では、スタッドの剛性と間隔の影響を検討するため、①完全合成の場合、②ウレタン高さ3cmの柔スタッドを10cm間隔で配置した場合、③同じく50cm間隔の場合、④同じく100cm間隔の場合、の4ケースについて解析した。

R/C床版の乾燥収縮問題では、若材齢期でのコンクリート強度(圧縮および引張)とヤング係数が及ぼす影響が大きく、これらの経時変化を考慮に入れた検討が重要になる。床版コンクリートは、21℃養生で28日強度が29.4kN/mm²(300kgf/cm²)のものを想定し、28日までの材齢に応じた圧縮強度の変化を考慮に入れた⁹⁾。なお、文献⁹⁾および¹⁰⁾に記載の式(3)および(4)を用いて算出したヤング係数と引張強度も、表7に併せて示す。

$$E_c = 4817 \cdot f_c'^{1/2} \quad \cdots \cdots (3)$$

$$f_t = 0.23 \cdot f_c'^{2/3} \quad \cdots \cdots (4)$$

ここで、 f_c' 、 f_t 、 E_c ：それぞれ、コンクリートの圧縮強度(N/mm²)、引張強度(N/mm²)、ヤング係数(N/mm²)。

4.3 解析結果

(1) 自由収縮ひずみ

図10は、自由収縮ひずみの床版の厚さ方向分布の経時変化の一例である。拡散係数、表面係数、そして、表面ひずみの最終値に応じて、分布形状は若干異なるものの、打設後30日未満の若材齢期には、床版表面と版厚中心付近ではひずみ量に大きな違いがある。

(2) 桁システムにおける床版内の応力分布

完全合成桁について、前述の方法により算出した床版の応力分布を図11に示す。最大引張応力度は、支点部にの鋼桁直上位置・床版下面において発生している。柔スタッドを用いた解析ケースにおいても、同様の応力分布となった。

(3) 柔スタッドによる応力低減

図12は、ずれ止めの種類と配置間隔による主桁直上位置での床版下面応力の違いを示したものである。この図より、柔なずれ止めを適切に配置すれば、主桁のほぼ全長にわたって床版の引張応力を低減できることが分かる。また、引張応力が最大となる支点部の鋼桁直上において、

柔スタッド適用による低減の効果も大きい。そして、柔スタッドをスラブアンカーの代用とした場合には、全材齢にわたって応力が最大で約25%緩和される。

図13は、支点部の鋼桁直上における床版下面応力の経時変化を示したものである。図中には、コンクリートの引張強度も併記した。材齢40日付近から完全合成モデルでの発生応力度が引張強度に近い値となっている。

床版内部の作用応力と強度の大小関係は、自由収縮ひずみの算出条件や解析モデルの設定に大きく依存する。本解析は、比較的短い支間長(20m)、29.4kN/mm²という一般的な圧縮強度、理想的な養生下でのコンクリート強度の増加といった、良好な条件を想定した検討である。したがって、床版表面で乾燥が急激に進行する夏季や、コンクリートの品質あるいは養生が不十分なとき、主桁の支間長が大きい場合などは、乾燥収縮ひびわれ発生の

表7 コンクリートの材齢と強度特性

材齢(日)	f_c' (N/mm ²)	f_t (N/mm ²)	E_c (N/mm ²)
6	16.8	1.51	1.97x10 ⁴
10	21.3	1.77	2.22x10 ⁴
20	26.9	2.07	2.45x10 ⁴
30	29.4	2.19	2.61x10 ⁴
40	29.4	2.19	2.61x10 ⁴
100	29.4	2.19	2.61x10 ⁴

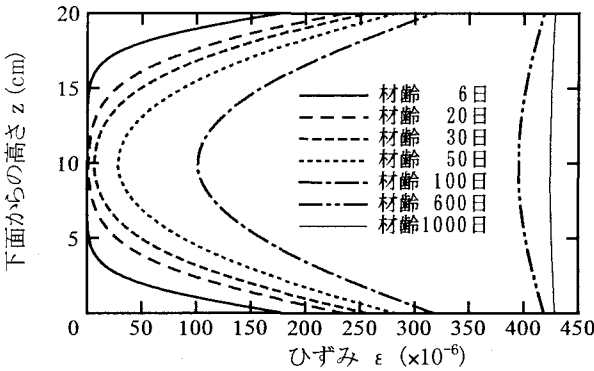


図10 自由収縮ひずみの分布

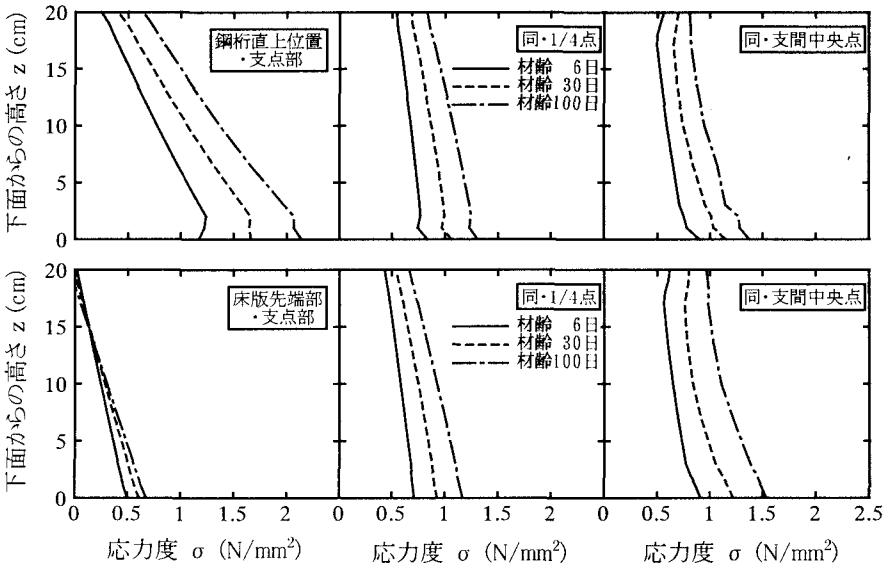


図11 床版内部の応力分布(完全合成桁モデル)

危険は無視できない。そして、スラブアンカーの場合には支点部の鋼桁近傍からのひびわれ発生の危険が大きいが、柔スタッドを同一間隔で配置すればその危険は小さくなる。

5. 結論

- 1) 押抜き試験より：ウレタン付きスタッドは、大きなずれを繰り返し載荷しても疲労破断に至りにくい、つまり、大きなずれを許容でき、回復性能に優れている。

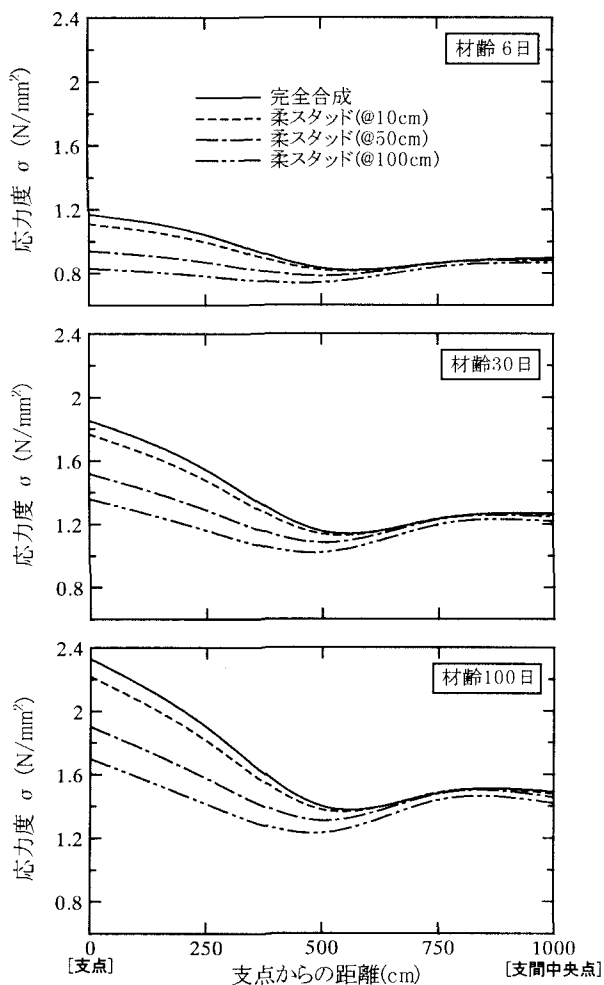


図 12 床版下面の応力分布（鋼桁直上位置）

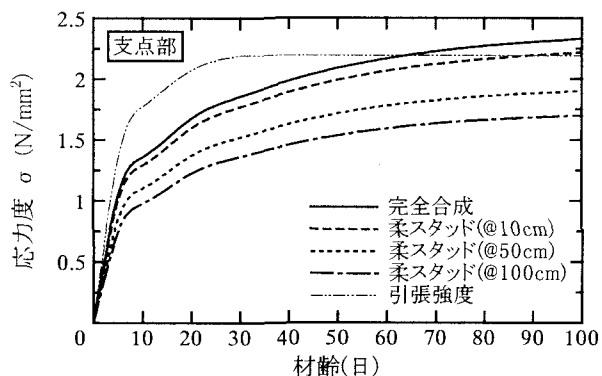


図 13 床版下面応力の経時変化（鋼桁直上位置）

- 2) はり試験より：柔スタッドが応力集中を発生しない弾性合成桁を実現できることを確認した。そのため、疲労の観点からも通常スタッドに比べて有利である。
- 3) 床版試験より：橋軸直角方向の曲げに対して、柔スタッドはスラブアンカーの約 10 倍の疲労強度を有している。したがって、非合成桁のスラブアンカーの代用として適用できる。
- 4) 床版内部のひずみ分布を考慮に入れた乾燥収縮応力解析を実施した。この結果より、床版と鋼桁との連結材に柔スタッドを使用すれば、乾燥収縮による床版の引張応力を完全合成の場合の 75% 程度に低減できる。よって、乾燥収縮ひびわれによる耐久性低下の問題を解消することが可能である。

今後は、複数主桁モデルに関して乾燥収縮ひずみの 2 次元的な分布の影響を考慮に入れた解析を進めるとともに、連続桁における乾燥収縮あるいは活荷重作用による床版応力の低減効果を確認する予定である。

参考文献

- 1) 平城弘一，松井繁之，武藤和好：柔な合成作用に適するスタッドの開発，構造工学論文集，Vol.44A，pp.1485-1496，1998。
- 2) Muto K., Hiragi H. and Matsui S. : Development of Favourable Stud Shear Connectors for Flexible Composite Action, Proceedings of the 5th International Conference on Short and Medium Span Bridges, Calgary, 1998.
- 3) 平城弘一，武藤和好，松井繁之，石崎 茂：柔スタッドの配置が及ぼす押抜きせん断挙動への影響，土木学会第 53 回年次学術講演会講演概要，I-A322，1998。
- 4) 日本鋼構造協会：頭付きスタッドの押抜き試験方法（案）とスタッドに関する研究の現状，JSSC テクニカルレポート，No.35，1996。
- 5) 水元義久，正田正一：R C 床版破損問題とその対応策—コンクリートの乾燥収縮現象よりの検討—，阪神高速道路公団技報，No.2，pp.140-153，1982。
- 6) Pikett G. : Shrinkage stress in concrete, Journal of ACI, Vol.17, No.3-4, 1946.
- 7) 島田 功，田中昭博，豊川 臣：鋼合成桁床版の乾燥収縮応力の解析，第 16 回（昭和 58 年度）業務研究発表会論集，建設コンサルタンツ協会近畿支部，pp.25-32，1983。
- 8) 阪田憲次，蔵本 修：乾燥に伴うコンクリート中の水分の逸散と乾燥収縮に関する研究，土木学会論文報告集，No.316，pp.145-152，1981。
- 9) 日本橋梁建設協会：床版工事設計施工の手引き，1990。
- 10) 土木学会：平成 8 年制定 コンクリート標準示方書，設計編，1996。