

疲労解析に基づいたプレキャストRC版舗装の 構造設計法の開発

北口航¹・西澤辰男²・水倉一夫³

¹学生会員 石川工業高等専門学校 環境建設工学専攻 (〒929-0392 河北郡津幡町北中条タ1)

E-mail : s053206@ishikawa-nct.ac.jp

²正会員 工博 石川工業高等専門学校教授 環境都市工学科 (〒929-0392 河北郡津幡町北中条タ1)

³正会員 プレキャストRC版舗装協会 (〒951-8133 新潟市川岸町1-53-3)

本研究では、プレキャストRC版舗装の特徴を考慮した構造設計法の開発を目的としている。この設計法では、通常のコンクリート版の疲労に加えコンクリート版の下面にひび割れが発生した後も、鉄筋が疲労するまでは供用可能であるとした2段階の期間を考えた。3DFEMによって計算された応力に疲労曲線を適用して疲労解析を行い、版厚とコンクリートの疲労度の関係および鉄筋量と鉄筋の疲労度の関係を求めた。これらの結果に基づく構造設計法を提案し、具体的な設計例を示した。この考え方をプログラム化し、設計条件および版厚を入力することにより必要な鉄筋量を求めるソフトウェアを開発した。

KeyWord: precast reinforced concrete pavement, fatigue analysis, 3DFEM, steel bar, design method.

1. まえがき

プレキャストRC版舗装 (PRCP) は、工場で製作されたRC舗装版を路盤の上に敷き並べて構築するコンクリート舗装の一種である¹⁾。現場での養生期間を必要としないので、写真-1のように主にトンネル舗装の補修など早期開放が必要な場所に使用されている。RC版は工場で製作されるため安定したコンクリートの品質を確保できること、上下面に配された鉄筋の効果も期待できることから、重交通下の高耐



写真-1 トンネル内のPRCP

久性舗装としての適用が可能と思われる。しかしながら、PRCPには便宜上通常のコンクリート舗装の設計法が準用されていることから、前述の特徴が十分に考慮されていない。このようなことから、PRCP固有の構造設計法の確立が望まれている。本論文では、PRCPの構造的な特徴を活かした構造設計法の考え方を提案し、構造設計プログラムを開発した。

2. プレキャストRC版舗装の構造と設計法

(1) 構造

RC版の標準舗装構成は図-1に示すとおりである。路盤の上に密粒度アスファルト中間層を施した後



図-1 PRCPの構造

RC版を敷設し、その後、中間層面とコンクリート版との間にグラウト材を注入する。設置するRC版の標準版の寸法は1.5m×5.0m、厚さは20cmと25cmがある。コンクリート版は目地によって連結されている。鉄筋は図-1に示されるような形で配筋されている。施工箇所としては、工期短縮、耐久性に優れるといった特徴からトンネル内舗装として利用されていることが多い。

これまで施工されたプレキャストRC版舗装の挙動を調査した結果によれば、多くの破損は目地段差およびRC版中央に表面から発生する横ひび割れであった²⁾。当初の設計においては、目地に荷重伝達装置を設けず、路盤にはアスファルト中間層がなかった。このため目地におけるRC版のたわみが大きくなり、目地付近の路盤が損傷して、空洞が発生する。目地付近に空洞があると、そこに交通荷重の作用によって、版の表面に大きな引張応力が発生することが3DFEM解析によって確認された³⁾。このような調査結果およびFEM解析を踏まえて、重交通道路における設計では、目地の荷重伝達を高めるようにダウエルバーを設置すること、およびアスファルト中間層を設けることが標準とされている¹⁾。

(2) 構造設計法

舗装の要求性能としては、設計期間内に疲労によるRC版の横ひび割れが生じないこととする。したがって構造設計としては、交通荷重による縦自由縁部の曲げ応力を用いたRC版の疲労解析を行う。また、RC版の下面が疲労破壊を起こしひび割れが発生しても、そのあとは鉄筋が疲労するまで舗装は供用できるものとする⁴⁾。本研究で提案するPRCP構造設計法の最大の特徴は、RC版下面の疲労と、その疲労破壊が生じた後の鉄筋の疲労の2段階を考えることにある。すなわち、図-2のようにRC版底面にひび割

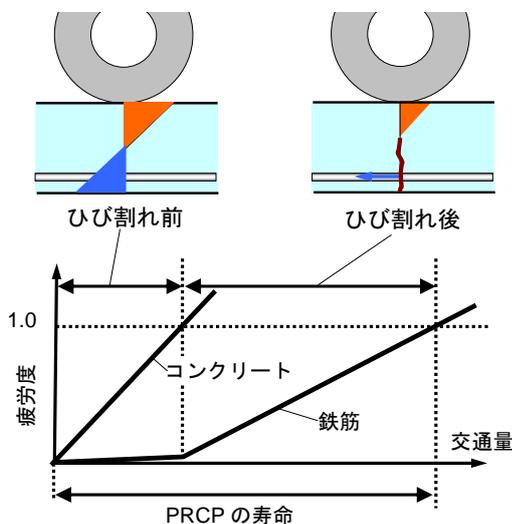


図-2 PRCPの設計寿命

れが発生するまでの期間をT1（ステージ1）、RC版底面にひび割れが発生した後、鉄筋が疲労破断するまでの期間をT2（ステージ2）とすれば、PRCPの全設計期間Tは $T = T1 + T2$ となる。

3. 構造解析法

(1) 载荷実験

構造解析モデルとして3次元有限要素法(3DFEM)を用いる。ステージ1においては鉄筋の応力は小さく疲労はほとんど無視できると仮定している。このような仮定が妥当かどうか、実際にトンネル内で施工されたPRCPにおいて载荷実験を行い、実際の挙動の把握およびモデルの検証を行った⁵⁾。

载荷実験を実施した現場は、一般国道7号朝日トンネル内に施工されたRC舗装版上である。その舗装構造と測定計器の概要を図-3に示す。荷重としては25tfレッカー車（全重28.0tf、前軸14.13tf、後軸13.12tf）および10tfトラック（全重22.26tf、前軸4.1tf+2.44tf、後軸7.9tf+7.84tf）の左車輪を路肩側自由縁部に沿って走行させた。それぞれの車輪がひずみゲージ位置に来たとき、車両を停止させ、その時点のひずみを計測した。

(2) 計算モデル

载荷実験を解析するために図-4に示すような

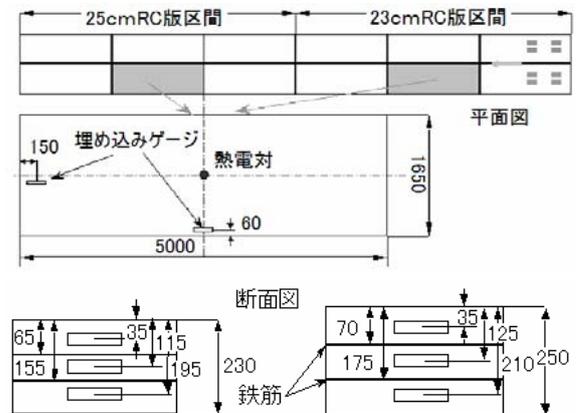


図-3 RC版の計器配置

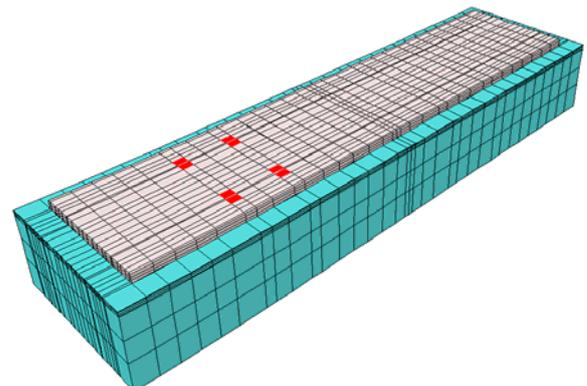


図-4 解析に用いた3DFEMモデル

3DFEMモデルを用いた。コンクリート版の弾性係数およびポアソン比はそれぞれ30000MPa, 0.2とした。路床の厚さは200cmで、その弾性係数およびポアソン比は80MPa, 0.35である。またセメント安定処理路盤層は厚さ15cmとし、弾性係数の影響をみるため、その値を600MPaおよび10000MPaの2種類とした。ポアソン比は0.35である。目地の荷重伝達を表すばね係数は水平方向, 垂直方向それぞれ98N/mm³とし、路盤とコンクリート版は水平方向には付着がないとした。荷重はタイヤ接地面を長方形等分布荷重に置き換えて、ひずみを測定した時の車両位置に作用させた。

(3) 解析結果

解析結果を図-5 および 6 に示す。これらの図は、各車輪が自由縁部のひずみゲージ位置に作用したときに計測されたコンクリート版内の深さ方向のひずみ分布である。コンクリート版内の埋め込みひずみゲージと鉄筋に貼り付けたゲージによって計測されたひずみを同時に示している。

実測ひずみは、コンクリート版上側が圧縮ひずみ、底面側がほぼ同じ値の引張ひずみ、版厚中央のひずみはほぼ0という典型的な曲げひずみ分布を示している。鉄筋のひずみはコンクリート版のひずみ分布

上にあり、コンクリート版と鉄筋が一体化していて平面保持の状態にあることが確認できる。これは通常の鉄筋コンクリートの力学が適用できることを意味している。また、荷重が大きいにもかかわらず鉄筋のひずみは非常に小さいので、鉄筋の応力も小さい。このことから、コンクリート版のひび割れ前の鉄筋疲労は非常に小さく無視できるといえる。

3DFEMによる解析結果も同様な曲げひずみ分布を示している。路盤の弾性係数の影響はわずかであった。トラック荷重に対しては、計算値は実測値を大きく上回る。これはトラック荷重に対してレッカー車荷重は小さいため、発生したひずみが小さくひずみゲージの応答が良くなかったことが考えられる。荷重の大きなレッカー車に対しては、23cm版の上下面のひずみ以外で計算値と実測値はおおむね一致している。また実測値よりも計算値が大きい値を示しており、設計においては安全側にあると言える。このようなことから設計時の応力算定において3DFEMモデルは適用可能であると考えられる。

4. 疲労解析法

(1) RC版

RC版の疲労解析は通常のコンクリート舗装の場

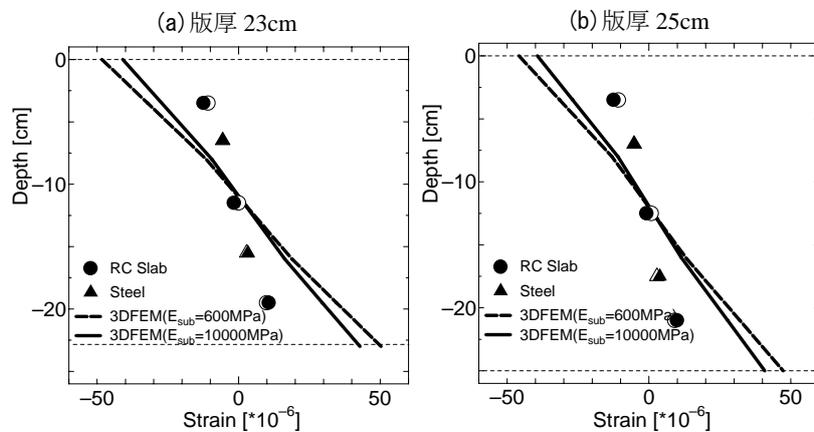


図-5 トラック荷重によるひずみ分布

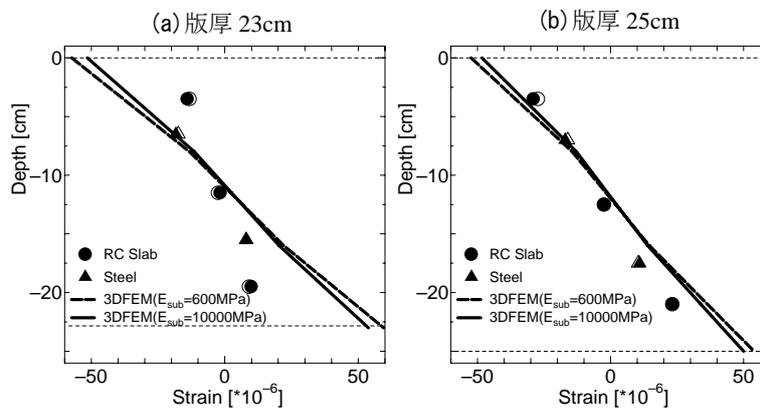


図-6 レッカー車荷重によるひずみ分布

合と同様である⁶⁾。ただし、応力解析には3DFEMを用いる。その際、RC版の鉄筋は無視する。温度応力は(1)式の岩間の式を用いる⁶⁾。温度応力 σ_t はRC版の長さによって決まるそり拘束係数 C_w 、コンクリートの熱膨張係数 α 、コンクリートの弾性係数 E 、RC版上下面の温度差 Δt から求める。

$$\sigma_t = 0.35 \cdot C_w \cdot \alpha \cdot E \cdot \Delta t \quad (1)$$

(2) 鉄筋

ひび割れ後においては、引張側のコンクリート部分の剛性は無視し、引張力は鉄筋が受け持つとする。その際、引張側の鉄筋が降伏せず圧縮側コンクリートも弾性範囲にあると仮定し、中立軸から圧縮縁までの距離 x および、版厚からかぶりを除いた有効高さ d から、単位幅当たりの等価断面2次モーメント I_e は次式となる⁷⁾。

$$I_e = \frac{1}{3}x^3 + (d-x)\frac{1}{2}x^2 \quad (2)$$

この等価断面2次モーメントと等しくなるようなコンクリート版の等価断面厚 h' (圧縮側のコンクリートと引張側の鉄筋による曲げ剛性を、コンクリート単体に置き換えた厚さ)は次式のように計算できる。

$$h' = \sqrt[3]{12I_e} \quad (3)$$

h' を用いて3DFEM構造解析を行い、交通荷重による単位幅当たりの断面モーメント M を求める。求めた断面モーメントから次式によって鉄筋応力 σ_{sp} を計算する。

$$\sigma_{sp} = \frac{M}{pjd^2} \quad (4)$$

ここに、 p は鉄筋比、 $j = (1 - k/3)$ 、 k は中立軸比である。

鉄筋の疲労解析は、まず(3)式の換算版厚を用いた3DFEM解析によって曲げモーメントを計算し、(4)式から輪荷重による鉄筋の荷重応力 σ_{sp} を計算する。次に、次式によってRC版上下面の温度差による単位幅当たりの温度モーメント M_t を計算する。等価断面厚 h' は実際の版厚 h よりも小さくなるので、コンクリート版に作用する温度モーメントがひび割れ部にも作用するとして、安全側の版厚 h を用いた。そして(4)式から温度による鉄筋の応力 σ_{st} を計算する。

$$M_t = \frac{\sigma_t h^2}{6} \quad (5)$$

合成応力 $\sigma_{sc} = \sigma_{sp} + \sigma_{st}$ を鉄筋の疲労曲線⁸⁾に適

用して許容繰返し数求め、疲労度を計算する。

5. 疲労解析結果

(1) 構造断面

RC舗装版は、厚さ20cm、23cm、25cm。主鉄筋は $\phi 13\text{mm}$ を6本、 $\phi 10\text{mm}$ を2本長手方向に上下に配筋した場合の鉄筋比0.005を最大として、鉄筋量

表-1 設計において設定した材料定数

項目 (単位)	値
コンクリートの弾性係数(MPa)	30,000
コンクリートのポアソン比	0.2
コンクリートの熱膨張係数($^{\circ}\text{C}$)	0.00001
コンクリートの曲げ強度(MPa)	4.4, 4.9, 5.4
鉄筋の弾性係数(MPa)	210,000
アスファルト中間層の弾性係数(MPa)	5000
アスファルト中間層のポアソン比	0.35
粒状路盤の弾性係数(MPa)	600
粒状路盤のポアソン比	0.35
路床の弾性係数(MPa)	80
路床のポアソン比	0.35

表-2 交通区分ごとの輪荷重分布

荷重(tf)	荷重区分				
	N ₃	N ₄	N ₅	N ₆	N ₇
1	100	4706	6190	9929	19995
2	50	339	816	1905	4836
3	10	180	539	1109	3603
4	5	89	260	613	1959
5	4	47	136	328	1009
6	3	30	73	192	657
7	2	25	33	94	365
8	1	12	16	38	162
9	0	7	7	17	72
10	0	5	3	8	37
11	0	3	2	6	38
13	0	0	0.3	3	7
15	0	0	0.2	1	2
合計	175	5443	8075.5	14243	32742

表-3 トンネル部RC版の温度差の頻度分布

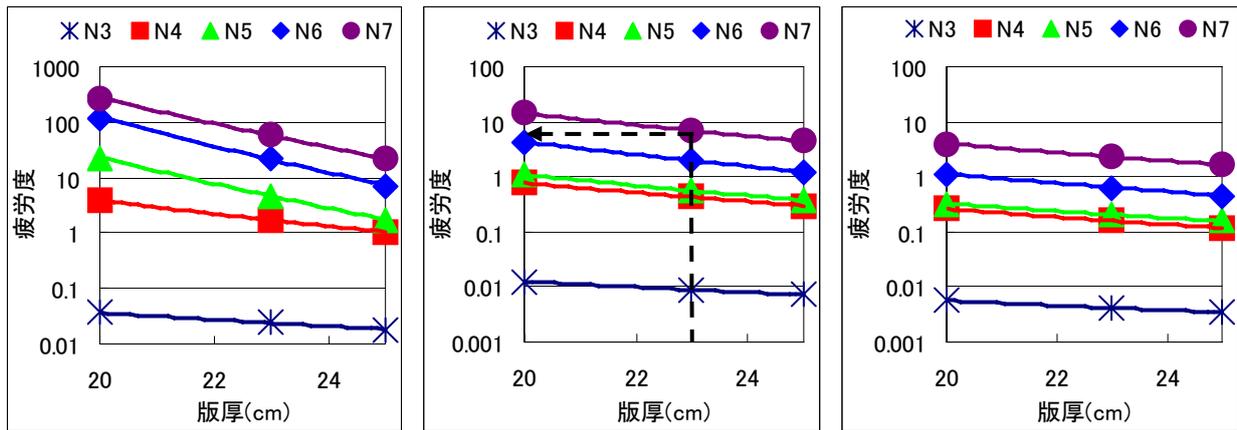
温度差 ($^{\circ}\text{C}$)	RC版の厚さ	
	23cm	25cm
3.5	0	0.003
2.5	0.017	0.022
1.5	0.157	0.187
0.5	0.315	0.290
-0.5	0.268	0.263
-1.5	0.166	0.164
-2.5	0.069	0.063
-3.5	0.009	0.008

を減らしていった。RC版の寸法は幅1.5m,長さ5.5mとする。目地にはダウエルバーを配し、ある程度の

荷重伝達を確保する。路盤は15cmの粒状路盤とする。長期間の供用で目地付近にコンクリート版と路

表-4 明かり部RC版の温度差の頻度分布

温度差 (°C)	明かり部温度差小			明かり部温度差大		
	RC版の厚さ					
	20cm	23cm	25cm	20cm	23cm	25cm
19	0	0	0	0	0.0012	0.003
17	0	0	0	0.003	0.009	0.0108
15	0	0.0006	0.0012	0.012	0.0168	0.0192
13	0.0042	0.0072	0.0096	0.024	0.024	0.024
11	0.0168	0.0192	0.0222	0.036	0.03	0.03
9	0.036	0.045	0.051	0.042	0.045	0.048
7	0.066	0.066	0.066	0.06	0.06	0.06
5	0.084	0.09	0.093	0.072	0.075	0.075
3	0.117	0.12	0.123	0.117	0.114	0.114
1	0.276	0.252	0.234	0.234	0.225	0.216
-1	0.246	0.244	0.24	0.18	0.168	0.164
-3	0.144	0.138	0.134	0.132	0.132	0.128
-5	0.01	0.0176	0.0252	0.08	0.088	0.088
-7	0	0.0004	0.0008	0.008	0.012	0.0192
-9	0	0	0	0	0	0.0008

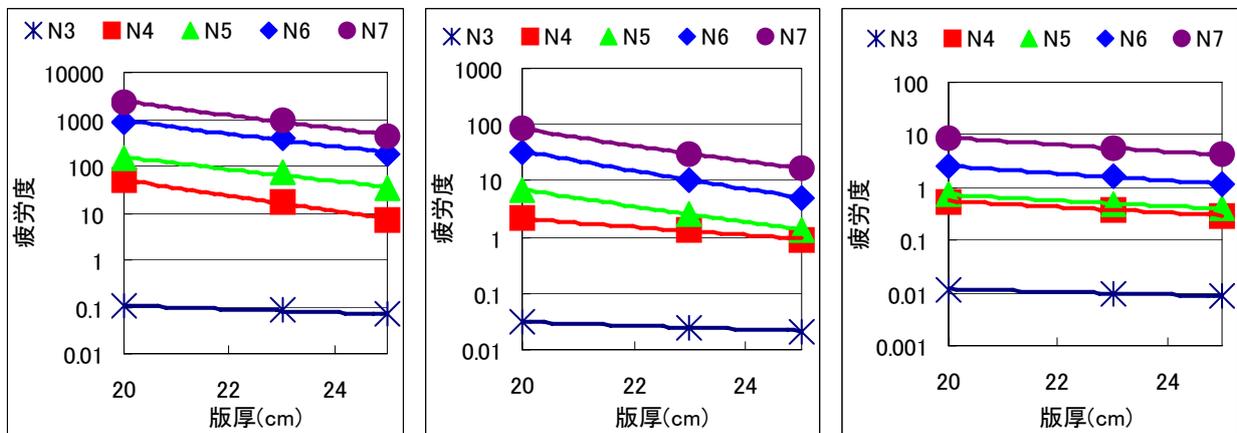


(a) 曲げ強度 4.4MPa

(b) 曲げ強度 4.9MPa

(c) 曲げ強度 5.4MPa

図-7 温度差小でのRC版の疲労度と版厚の関係



(a) 曲げ強度 4.4MPa

(b) 曲げ強度 4.9MPa

(c) 曲げ強度 5.4MPa

図-8 温度差大でのRC版の疲労度と版厚の関係

盤との間に厚さ4cmのアスファルト中間層を設ける。路床はCBR6%の材料で路床を構築する。

各層の材料定数は表-1に示すとおりである。解析期間は20年と仮定した。疲労解析に使用した荷重頻度分布と温度差頻度分布を表-2、表-3および表-4に示す。温度差頻度分布は明かり部温度差大、明かり部温度差小、トンネル部の3種類を用いた。ここでの温度差は、表面温度が高い場合を正として、RC版表面の温度とRC版底面の温度の差として定義されている。交通量としては普通道路の交通区分であるN₃からN₇までを対象とした^{6,9)}。これらの分布はわが国の実測によるものである。

図-7および8はRC版の20年間の疲労度と版厚の関係を示したものである。疲労度と版厚の関係は片対数でほぼ直線の関係があることがわかる。交通量が大きいか、曲げ強度が小さいほど疲労度は大きくなる。また温度差が大きいほど疲労度は大きくなる。RC版の曲げ強度を4.9MPa程度としても、明かり部ではN₅交通まで、それ以上の交通量になる

と25cmの版厚であってもRC版の疲労度が1.0を超えてしまう。すなわちRC版のひび割れを許さないと20年の設計はできないことになる。

図-9および10は鉄筋の20年間の疲労度と鉄筋比の関係である。鉄筋比が大きいかほど疲労度は小さくなる。交通量が多いほど疲労度は大きいが、N₃交通では極端に疲労度は小さい。鉄筋比で表現しているため、RC版厚の影響はわずかである。鉄筋比が0.003より小さいと疲労度は急激に増加することから、この値が1つの目安といえる。ただし、これはRC版下側のみの鉄筋量である。温度差の影響はかなり大きい。

(2) 構造設計例

これらの図を用いてPRCPの構造設計例を示す¹⁰⁾。設計条件として、N₇交通でRC版の曲げ強度を4.9MPa、温度差は小さいとし、RC版厚を23cmとする。設計期間40年として必要な鉄筋比を求める。図-7(b)より23cmのRC版の疲労度は6.8となる。すなわち、20/6.8=2.9年でひび割れが発生する。設計期

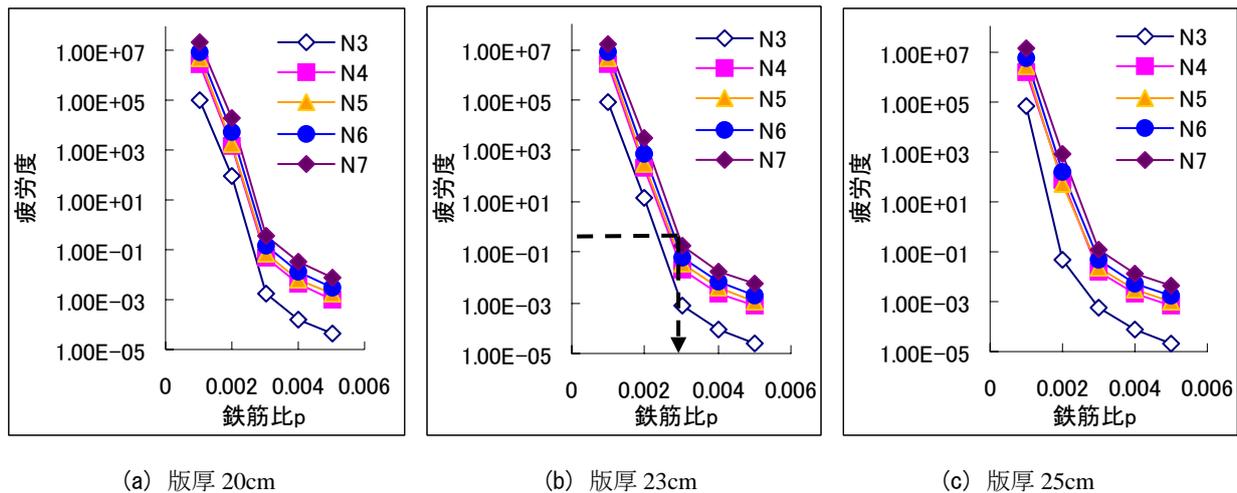


図-9 温度差小での鉄筋の疲労度と鉄筋比の関係

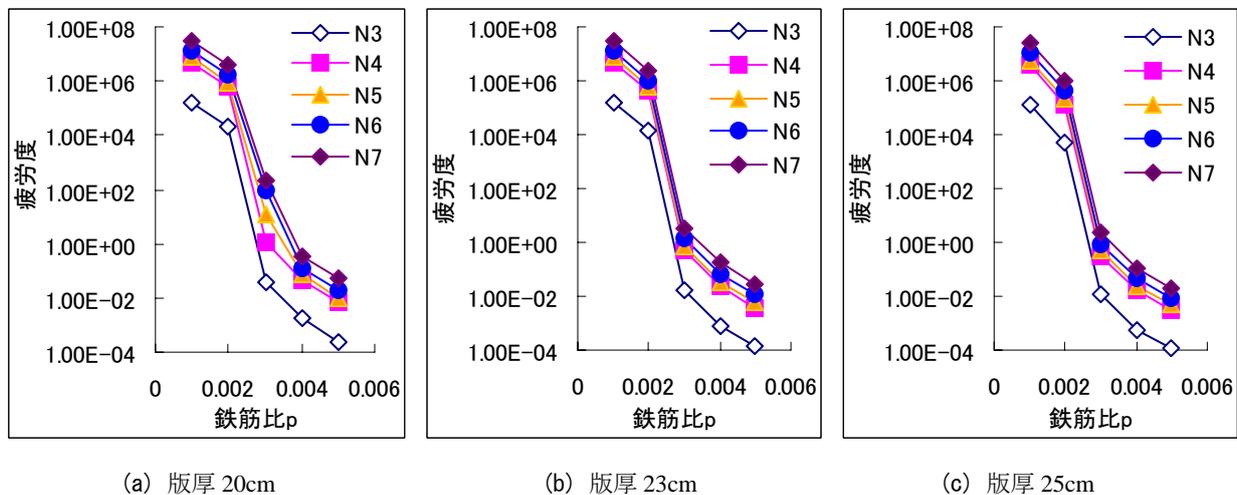


図-10 温度差大での鉄筋の疲労度と鉄筋比の関係

表-5 プログラムの設定可能な条件

設計期間 (年)	自由に設定可能
温度	明かり部温度差小, 明かり部温度差大, トンネル部
交通量	N ₃ , N ₄ , N ₅ , N ₆ , N ₇
版厚 (cm)	20, 23, 25
曲げ強度(MPa)	4.4, 4.9, 5.4
中間層の有無	あり, なし

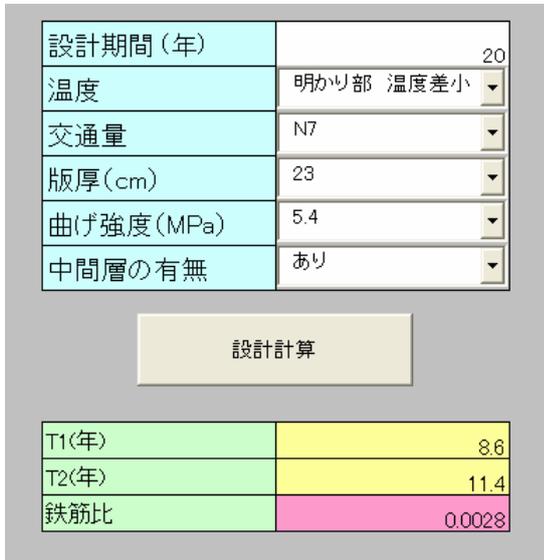


図-11 構造設計プログラム

間は 40 年であるから、 $40 - 2.9 = 37.1$ 年は鉄筋で持たせなければならない。そのための疲労度は $20/37.1 = 0.53$ 以下である。図-9 (b) より疲労度 0.53 となる N₇ 交通に対応する鉄筋比は約 0.0029 である。したがってこれ以上の鉄筋比となるような配筋を行えばよい。ただし、この鉄筋量は下側のみの鉄筋比であることに注意する。

6. 構造設計プログラム

前述した構造設計例と同様の方法を用いて、設定した条件により鉄筋比を計算するプログラムを作成した。図-11 はプログラムの表示画面である。このプログラムは本研究で行った疲労解析の結果に基づき作成されている。設計年数を自由に定めることができるようになっており、その他の各設計条件は疲労解析において設定した条件の中から選択できるようになっている。表-5 に設定可能な条件を示す。設定された各条件からコンクリート版によって供用する期間 T₁、その後鉄筋により供用する期間 T₂、設計期間において必要な鉄筋比を得ることができる。プログラムの計算手順フローチャートを図-12 に示す。具体的には、まず設計期間 T を入力する。その後温度、交通量等の設計条件をリストから選択し設定する。すべて設定し、設計計算ボタンをクリック

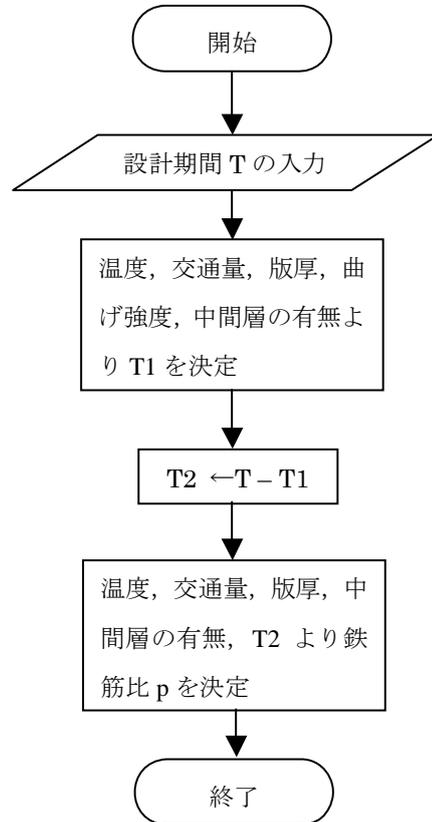


図-12 設計計算の手順

する。プログラムによって各条件から T₁ が決定される。T - T₁ から T₂ が計算され、T₂ と設定条件から必要な鉄筋比 p が決定される。

7. 結論

本研究では PRCP の特徴を考慮した構造設計法を提案することを目的とし、その設計法に基づいたプログラムを開発した。提案した設計法においては、RC 版が疲労する期間 T₁ と鉄筋が疲労する期間 T₂ の合計を設計期間とした。T₁ においては RC 版の疲労解析を行い、T₂ においては RC 版下面のひび割れを考慮して鉄筋コンクリートとして応力を計算して疲労解析を行う。このような考え方を採用することによって、RC 版の構造的な利点を活かすことが可能になる。この考え方に基づいて、RC 版および鉄筋の疲労解析を行い、RC 版の疲労度と版厚の関係および鉄筋の疲労度と鉄筋比の関係を求めた。この

結果から設計期間, 設計条件および版厚を仮定して, 必要な鉄筋量を求める設計手順を提案した. この手順を簡単なプログラムにまとめた. このプログラムによって, さまざまな設計条件に対応した RC 版の設計を行うことが可能になった.

参考文献

- 1) プレキャスト RC 舗装版協会:リバーシブル型プレキャスト RC 版舗装製作・施工要領, 2001.
- 2) 折橋一禎, 南口誠次, 峰村徳男:プレキャスト RC 版の舗装構造と供用性について, 第 8 回北陸道路舗装会議技術報文集 pp.215-220, 2000.
- 3) 山田英雄, 西澤辰男:プレキャスト RC 舗装の応力解析, 平成 15 年度中部支部研究発表会講演概要集, pp.605-606, 2003.
- 4) 山田英雄, 西澤辰男, 池田孝司:プレキャスト RC 版舗装の構造設計法, 第 9 回北陸道路舗装会議技術法文集 pp.27-32, 2003.
- 5) 水倉一夫, 坪内昭雄, 小林隆志, 西澤辰男:交通荷重によるプレキャスト RC 舗装版の力学的挙動, 第 59 回年次学術講演会講演概要集, 5-612, pp.1221-1222, 2004.
- 6) 日本道路協会:舗装設計便覧, 丸善, 2006.
- 7) 大塚浩司, 庄谷征美, 外門正直, 原忠勝:鉄筋コンクリート工学, 技報堂出版, 1989.
- 8) 土木学会:コンクリート標準示方書, 舗装編, 2002.
- 9) 北口航, 西澤辰男:トンネル内プレキャスト RC 舗装の構造設計法の開発, 平成 17 年土木学会中部支部研究発表会講演概要集 pp.541-542, 2005.
- 10) 北口航, 西澤辰男, 水倉一夫:プレキャスト RC 版舗装の構造設計プログラムの開発, 第 10 回北陸道路舗装会議技術報文集 pp.110-113, 2006.

STRUCTURAL DESIGN METHOD OF PRECAST REINFORCED CONCRETE PAVEMENT BASED ON FATIGUE ANALYSIS

Wataru KITAGUCHI, Tatsuo NISHIZAWA and Kazuo MIZUKURA

This study aims the development of a structural design method taking advantage of reinforcement in concrete slab. In this method, the design period is considered an addition of a period for the fatigue of RC slab and a period for the fatigue of steel reinforcement bar after bottom crack in RC slab occurs. Applying stresses computed from 3DFEM analysis to fatigue curves, relationships among fatigue damages in RC slab and reinforcement bar, RC slab thickness and reinforcement ratio were obtained. Using the results, a design procedure was proposed and an example is presented in this paper. A computer software was developed, which gives the reinforcement ratio for a specified design period and design parameters including RC slab thickness, traffic and temperature conditions.