

プレキャストPC版舗装における 圧縮ジョイントの荷重伝達機構

赤嶺文繁¹・八谷好高²

¹正会員 工修 運輸省港湾技術研究所土質部滑走路研究室前研修生 (㈱ピー・エス) (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

²正会員 工博 運輸省港湾技術研究所土質部滑走路研究室長 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

空港エプロンにおいて用いられているプレキャストプレストレストコンクリート (PPC) 版舗装の新形式目地として開発した圧縮ジョイントの荷重伝達機構を明らかにした。この圧縮ジョイントは目地をまたいで設置した緊張材により目地部に圧縮力を与えて2枚のPPC版を接合する構造を有しているため、せん断力と曲げモーメントが伝達される。この機構の3次元FEMによる数値解析モデルとして、前者についてはせん断ばね、後者については目地部上縁と緊張材位置に配置した水平ばねを用いた。これらの妥当性ならびにモデルの力学定数について試験舗装に対する載荷試験によって検証した。

Key Words: precast prestressed concrete slab pavement, compression joint, load transfer, numerical analysis, experimental pavement

1. はじめに

空港エプロンに用いられているプレキャストプレストレストコンクリート (PPC) 版舗装は、工場製作のPPC版を現場に運搬して路盤上に敷設したのち、隣り合う版を連結する構造を有する。PPC版の連結には、供用開始後破損が生じた場合にその版のみを交換できるように、丸鋼を円弧状に加工したスリップバー、すなわちホーンジョイント鉄筋による方法が従来より用いられている¹⁾。しかし、この方法によるPPC版舗装にはポンピング等連結方法に起因すると考えられる破損が見られるようになってきた。

ホーンジョイント方式は構造上それ自体の工夫による改善が難しいことから、荷重伝達機構そのものを変える新たな荷重伝達装置として、ホーンジョイントが伝達可能であるせん断力に加えて曲げモーメントも伝えることのできるものを開発する必要があると考えた。具体的には、緊張材を2枚の隣り合う版をまたいで配置して連結部に圧縮力を導入する方式、すなわち圧縮ジョイントである (図-1)²⁾³⁾。この方式では緊張材をアンボンド形式で用いているので、破損版を交換するときには緊張力を解放するだけでよく、健全版が再利用可能となる。なお、圧縮力を与えてPPC版を連結する方式は過去にも用いられている⁴⁾⁵⁾が、PPC版本体に与えるプレストレス力と同

等の圧縮力を用いて全体を1枚版と考えている点、部分的な交換はできない点等、今回の方式とは異なったものである。

本研究では、新しい連結方式による目地の荷重伝達機構をPPC版舗装の構造設計に資する形でモデル化し、その妥当性を試験舗装により検証している。

2. 荷重伝達機構の数値解析モデル

(1) コンクリート舗装の目地における荷重伝達機構

無筋コンクリート舗装の構造設計においては、自由縁部応力を目地での荷重伝達を考慮して低減することにより目地部応力を求める方法に代わり、目地を適切にモデル化した2次元有限要素法(FEM)を用いて構造解析を行って応力を計算する方法が試みられてきている⁶⁾。この場合の目地の荷重伝達機構のモデル化には従来より1次元ばね要素が用いられており⁷⁾、スリップバー目地であっても曲げモーメントの伝達はほとんど認められないとの実験結果に基づいて空港舗装においてはこの方法が踏襲されてきている⁸⁾。

これに対して、連続鉄筋コンクリート舗装の横ひび割れではひび割れ幅が0.1mm以下であれば曲げモーメントは伝達されることが明らかになっており⁹⁾、これを解析

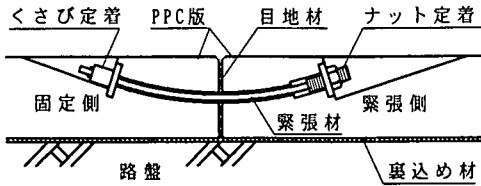


図-1 圧縮ジョイント

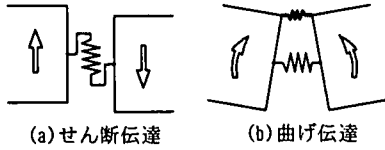


図-2 圧縮ジョイントの荷重伝達機構のモデル化

に取込むために西澤らは連続鉄筋コンクリート舗装の横ひび割れにおける荷重伝達機構をせん断、曲げおよびねじりの3種類の線形ばね要素でモデル化し、ひび割れ平行方向、直角方向の応力に対しては、それぞれ、せん断ばね、曲げばねが大きく影響することを示している⁹⁾。また、過去に用いられた連結方式によるPPC版では、連結部近傍での荷重に対して連結部にはせん断と同時に曲げが作用することも認められている⁹⁾。

(2) 圧縮ジョイントの荷重伝達機構のモデル化

今回考案した圧縮ジョイントは、目地部に圧縮力を与えていることから、上記の連続鉄筋コンクリート舗装等で明らかになった点をさらに積極的に利用していると考えられ、せん断力に加えて曲げモーメントを伝達できることが明らかである。そのため、荷重伝達機構のモデル化に当たっても両者を表現することが必要になる。コンクリート舗装の構造解析には従来より2次元FEMが用いられてきたが、今回は連結部近傍の応力状態を詳細に検討する必要があるため、データの入出力ならびに処理の容易さを考慮して市販の3次元FEMプログラムを使用することにした。

せん断力の伝達は、従来より用いられているスリッパ目地では、ダウエル作用によって行われるため、スリッパ設置位置に設けられた1個のばね要素によりモデル化が可能であった。ところが、圧縮ジョイントでは、連続鉄筋コンクリート舗装の横ひび割れと同様に、接触面、すなわちPPC版端面の摩擦によってせん断力が伝達されるため、緊張材設置位置のみではなく、目地に沿って分布する複数のばねによるモデル化を考えた。さらに、緊張材による圧縮力は緊張材定着部から目地に向かって広がり、目地ではある幅の範囲に分布するものと考えた。

曲げモーメントの伝達は、上記のように、2次元FEM

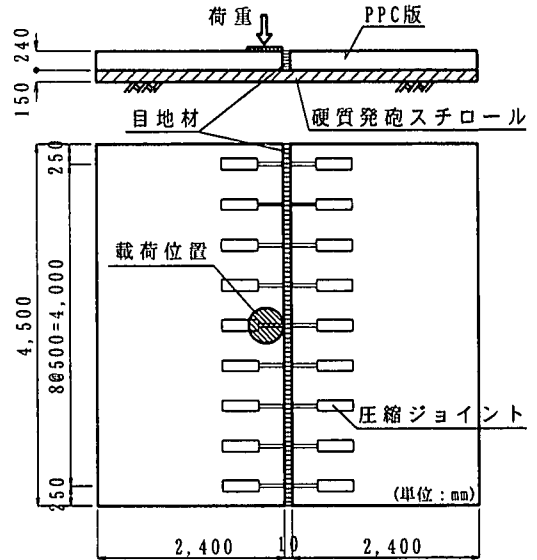


図-3 試験舗装

では曲げばねによりモデル化できる。しかし、3次元FEMではこの方法が不可能なため、圧縮ジョイントが曲げモーメントに対してコンクリートの圧縮と緊張材の引張で抵抗する構造となっていることを考えて、それぞれを水平ばね要素で表現する方法を試みた。すなわち、目地に沿って上縁に配置した剛性の高い水平ばねでコンクリートの圧縮力を、さらに緊張材設置箇所において緊張材深さに配置した水平ばねで緊張材の引張力を考慮することにより、目地近傍での荷重時における曲げモーメント(正のモーメント)の伝達機構を再現できるものと考えた。

図-2は、今回考案した圧縮ジョイントにおける荷重伝達機構モデルの模式図である。なお、せん断ばね、水平ばねとも節点同士を連結する形で導入している。

3. 載荷試験

試験舗装は図-3に示すように、剛性基礎の上に設置した硬質発泡スチロールからなる路盤上に幅4.5m、長さ24m、厚さ240mmのPPC版を2枚敷設し、圧縮ジョイントで連結した構造である。このときのPPC版、路盤の弾性係数は、それぞれ23.6kN/mm²、2.5N/mm²、ポアソン比は0.21、0.1である。これらは室内試験によって求めたが、路盤の弾性係数については、路盤が剛性基礎の上に設置された硬質発泡スチロールで構成されていることから、後述の載荷試験で得られたたわみから逆算することにより推定した。PPC版敷設後目地にセメントミルクを充填し、十分に硬化してから圧縮力を与えた。ここでは、緊張材間隔を0.5、1.0、1.5mの3種類とし、1本あたりの緊張力を0から構

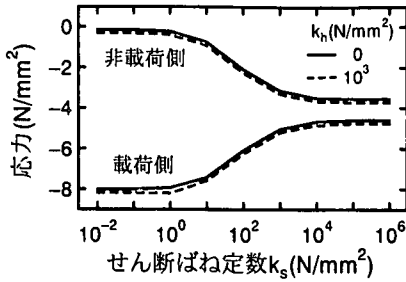


図4 ばね定数が目地平行応力に及ぼす影響

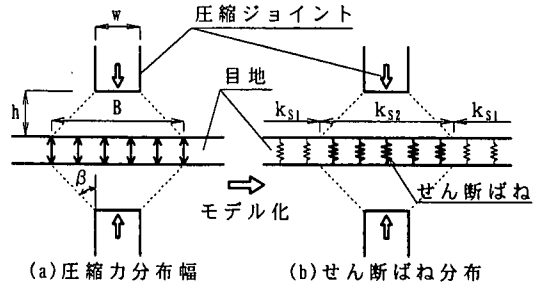


図5 圧縮力分布幅

造上許容できる200kNまで50kN刻みで変化させた。

所定の緊張力を与えた後、目地近傍に直径450mmの鋼製載荷板を硬質ゴムを介して設置して、最大300kNまで荷重を加えた。この荷重の大きさは設計航空機B-747の主脚荷重を一車輪に置き換えた荷重（等価単車輪荷重）に相当しているが、緊張力を与えない場合は200kNまでとしたので、解析の対象としては主としてこのときのデータを用いている。そのときの舗装の応答として、目地平行と直角方向におけるたわみ分布ならびにPPC版表面ひずみを測定した。

解析には上記のように3次元FEMプログラムを使用した。具体的には、PPC版、路盤とも8接点ソリッド要素を用い、両者は完全に付着しているものと考え、路盤底面は完全固定としてモデル化した。PPC版と路盤の寸法および材料定数は載荷試験と同じとし、目地には図-2で示した荷重伝達モデルを使用した。なお、荷重は載荷版とほぼ等面積となる1辺400mmの正方形分布荷重とした。

4. 荷重伝達モデルにおける定数の同定

以上に述べた圧縮ジョイントの荷重伝達モデルにおけるばね定数を載荷試験結果ならびに数値解析に基づいて同定する。

(1) せん断ばねと水平ばねの独立性

圧縮ジョイントのモデル化において用いたせん断ばね、水平ばねの独立性について、構造設計上重要な目地平行方向PPC版応力に着目して検討した。具体的には、上記の解析モデルを使用し、水平ばねがない場合と実際に近いと考えられる場合の2条件に対して、目地単位長さ当りのせん断ばね定数 k_s を $10^2 \sim 10^6 \text{ N/mm}^2$ まで変化させて解析した。水平ばねがない場合、実際に近い場合では、後述の上縁部水平ばね定数 k_h として $0, 10^3 \text{ N/mm}^2$ を、緊張材深さの水平ばね定数 k_p はいずれに対しても式(4)による 61.5 N/mm^2 を用いた。載荷重は200kNとした。解析で得られた目地中央におけるPPC版上縁の目地平行方向最大応力を図-4に示す。この図から、水平ばねの有無によって

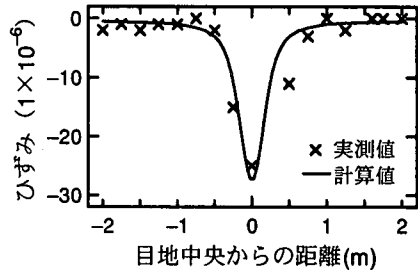


図6 目地直角方向のPPC版ひずみ分布

載荷・非載荷側の目地平行方向応力はほとんど変化していないことがわかり、水平ばねは目地平行方向応力に影響を与えないとみなしていいものと考えられる。

同様の検討を目地直角方向応力に関して行った。この場合、上縁部水平ばね定数と目地直角方向のPPC版応力の関係はせん断ばね定数の値によって若干異なったものになるものの、構造設計上はほとんど影響がないことから、せん断ばねについて考慮しなくてもよいとした。

(2) せん断力の伝達モデル

圧縮ジョイントによるせん断力の伝達は、前述のようにせん断ばねによってモデル化した。この場合、せん断ばね定数に加えて、緊張材周囲で圧縮力の影響によりせん断力の伝達が向上する範囲を定める必要がある。

a) 圧縮力分布幅

圧縮ジョイントによって目地に作用する圧縮力は図-5(a)に示すように、目地に沿ってある幅に分布することから、その分布幅 B を算定する必要がある。ここでは、圧縮ジョイントの緊張材を緊張したときに生じる目地直角方向のPPC版表面ひずみ分布に着目した。緊張材を1本設置してその緊張力を200kNとした場合の、載荷重200kN時における実測値をFEMによる解析結果と合わせて図-6に示す。図-6では、実測値と計算値は、両者の相関係数が0.94であることから、良好な対応をみせており、圧縮力の分布幅はおおよそ800mmであることが推定できる。これは、圧縮力広がり角度 β として既往の研究成果¹⁰⁾である 45° を用い、今回の条件に対して式(1)により計算さ

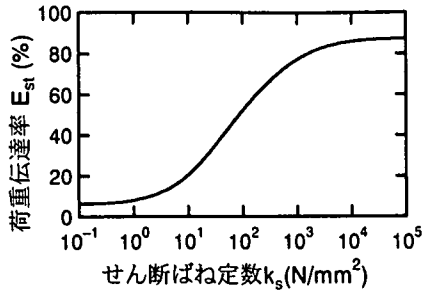


図-7 せん断ばね定数 k_s と荷重伝達率 E_{st}

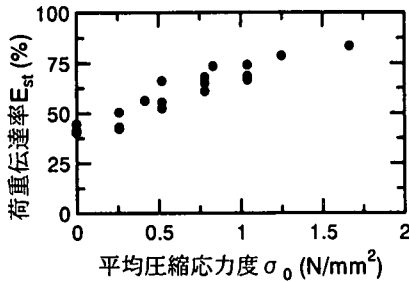


図-8 平均圧縮応力度 σ_0 と荷重伝達率 E_{st}

れる値とほぼ一致することがわかる。

$$B = w + 2h \tan \beta \quad (1)$$

ここに、 B ：圧縮力分布幅(mm)，

w ：支圧板幅(mm)，

h ：支圧板の目地からの距離(mm)，

β ：圧縮力広がり角度。

このことから、圧縮ジョイントを用いた目地は、緊張材の間隔が広い場合、圧縮力が作用する部分と作用しない部分が生ずる結果となる。しかし、圧縮力が作用していない状態であっても目地材の付着やかみ合わせ、また曲げ変形に伴って生じる圧縮域の摩擦によってせん断伝達も行うことが確かめられている。そこで、図-5(b)に示すように、圧縮力の作用しない部分のばね定数を k_{s1} 、圧縮力の作用している部分のばね定数を k_{s2} として、圧縮ジョイントにおけるせん断力の伝達をせん断ばねによりモデル化することにした。ただし、緊張材間隔が500mmの場合はずべてのばね定数は k_{s2} となる。

b) せん断ばね定数

せん断ばね定数の算定方法として以下の方法を用いた。まずせん断ばね定数 k_s を変化させた場合の荷重伝達率 E_{st} をFEMによって計算し両者の関係を導く。得られた結果を図-7に示す(k_s は単位幅当たりのもの)。なお、目地の荷重伝達機能とは本来荷重伝達によるPPC版における

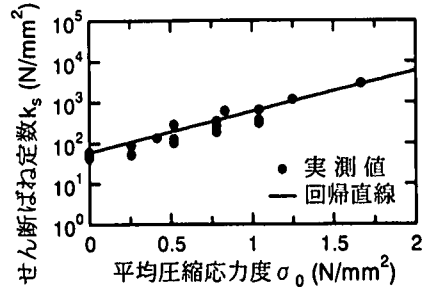


図-9 平均圧縮応力度 σ_0 とせん断ばね定数 k_s

荷重応力の低減程度によって定量化されるべきものと考えられるので、荷重伝達率 E_{st} として、ここでは参考文献(6)でのたわみによる方法を参考にして、載荷側および非載荷側の目地平行方向のPPC版上縁ひずみを ε_1 、 ε_2 とした場合に次式で表されるものを用いた。

$$E_{st}(\%) = \frac{2\varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2} \times 100 \quad (2)$$

次に、載荷試験で得られた各平均圧縮応力度に対するPPC版の目地平行方向ひずみから式(2)を用いて荷重伝達率 E_{st} を計算する。その結果を図-8に示す。ここで、平均圧縮応力度とは各緊張材で導入した圧縮力をその分布面積(分布幅×PPC版厚)で除した値をいう。

そして、両図から E_{st} を媒介にして、平均圧縮応力度とせん断ばね定数の関係が図-9に示すように得られる。

図中の直線はせん断ばね定数 k_s と平均圧縮応力度 σ_0 の関係を回帰したもので、式(3)で表される(相関係数0.98)。この式を用いることにより、平均圧縮応力度 σ_0 に応じたせん断ばね定数 k_s が得られることになる。

$$k_s = 59.6 \times 10^6 \sigma_0 \quad (3)$$

ここに、 k_s ：単位幅当たりのせん断ばね定数(N/mm²)，

σ_0 ：平均圧縮応力度(N/mm²)。

式(3)で示した k_s は図-5(b)で示した k_{s2} に相当し、 k_{s1} は $\sigma_0=0$ N/mm²として式(3)より59.6N/mm²と得られる。

(3) 曲げモーメントの伝達モデル

目地直角方向の曲げモーメントの伝達を考慮するため導入した上縁部と緊張材位置に配置した水平ばね定数を定めなければならない。

載荷試験で得られた平均圧縮応力度の変化による非載荷側のPPC版上縁における目地直角方向のひずみを図-10に示す。ひずみは、平均圧縮応力度が増加すると-20～

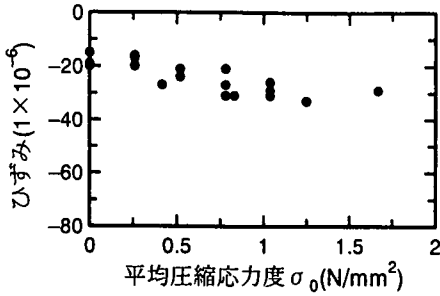


図-10 平均圧縮応力度 σ_0 と目地直角方向ひずみ

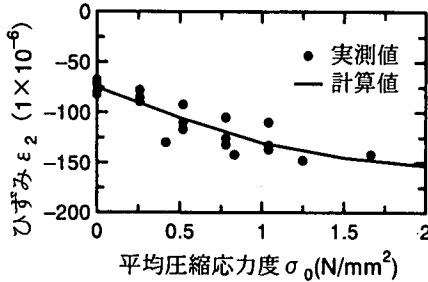


図-11 PPC版目地平行方向ひずみの比較

-30と若干圧縮側に増加する傾向にあるが、ここでは構造設計上の観点からほぼ一定とみなし、水平ばね定数は平均圧縮応力度によらず一定値として取り扱うことにした。

目地部上縁の水平ばねは目地直角方向水平変位を拘束するのが目的であるため、そのばね定数 k_p として剛性の高い値 10^6N/mm^2 を採用した。また、緊張材の引張力を表す緊張材位置の水平ばねのばね定数 k_p は、緊張材軸方向引張力の力学的関係から式(4)のように導いた。

$$k_p = \frac{E \cdot A}{L} \quad (4)$$

ここに、 k_p ：緊張材位置における水平ばね定数(N/mm)、
 E ：緊張材の弾性係数(N/mm²)、
 A ：緊張材の断面積(mm²)、
 L ：目地をはさんだ支圧板間の距離(mm)。

5. 荷重伝達モデルの検証

(1) せん断力の伝達モデル

せん断力伝達モデルの検証を行うために、目地平行方向のPPC版ひずみに注目した。

荷重200kN時の非載荷側目地のPPC版上縁における目地平行方向ひずみの実測値と計算値を図-11に示す。緊

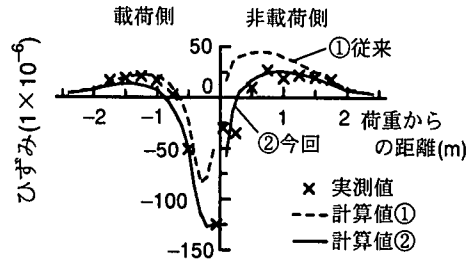


図-12 PPC版目地直角方向ひずみの比較

張力を増加させる、すなわち平均圧縮応力度を増加させると実測、計算ひずみは共に圧縮側に増加し、両者は良好な対応を示している(相関係数0.88)。このことから、4で記述したばねによるせん断力伝達モデルならびにばね定数の算定方法は妥当なものであると考えられる。

(2) 曲げモーメントの伝達モデル

曲げモーメント伝達モデルの検証を行うために、目地直角方向ひずみに注目した。

ここでは、緊張材を1m間隔で5本設置し、1本あたりの緊張力を200kNとした場合の、載荷重200kN時におけるPPC版上縁の目地直角方向ひずみ分布について実測値と計算値を図-12に示す。

従来より用いられているせん断ばねのみを考慮した場合は、曲げモーメントの伝達が行われなかったため、非載荷側に負のひずみ(正の曲げモーメント)が発生していない。これに対して、今回提案した曲げモーメントの伝達を考慮するために水平ばねを配置した場合は、非載荷側にも負のひずみが発生し、実測値と合致する結果になっている(相関係数0.93)。このことから、4で示した水平ばねによる曲げモーメントの伝達モデルとそのばね定数の算定方法の妥当性が検証できたものと考えられる。

6. 結論

本研究ではPPC版舗装の新しい連結方式である圧縮ジョイントのモデル化を行い、その力学定数を同定した。そして、モデルの妥当性を試験舗装により検証した。得られた知見は以下のようにまとめられる。

- (1) 圧縮ジョイントによるせん断力の伝達は、圧縮力が緊張材周辺800mmの範囲内の目地に配置したせん断ばねによりモデル化できる。
- (2) せん断ばね定数は平均圧縮応力度によって変化し、両者は片対数上で直線により表される。
- (3) 緊張材の間隔が広い場合、(1)の範囲外においてもせん断ばねにより荷重伝達が行われる。そのときのばね定数は 60N/mm^2 程度である。

- (4) 圧縮ジョイントによる曲げモーメントの伝達は、目地部上縁と緊張材位置に設けた2種類の水平ばねによりモデル化できる。
- (5) 水平ばねのばね定数は、平均圧縮応力度によらず一定とみなすことができる。

7. おわりに

本研究により圧縮ジョイントを実用に供するためにまず第一に必要な構造解析モデルの開発ができたと考えている。今後は、圧縮ジョイントを用いたPPC版舗装の実荷重条件下での安定性を確認するとともに、その具体的な構造設計法について研究を進める所存である。

謝辞：本研究を進める上で広島大学工学部佐藤良一教授からは有益な助言をいただきました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Sato, K., Fukute, T. and Inukai, H.: Some New Construction Methods for Prestressed Concrete Airport Pavements, *2nd International Conference on Concrete Pavement Design*, pp.149 - 159, 1981.
- 2) 深沢勝一, 八谷好高, 横井聰之, 川守田正路: プレキャストPC版舗装のアンボンドPC鋼材による圧縮ジョイント, 土木

- 学会第54回年次学術講演会講演集第V部, pp.466 - 467, 1999.
- 3) 赤嶺文繁, 八谷好高, 室園正徳: プレキャストPC版舗装における圧縮ジョイントの荷重伝達機能, 土木学会第54回年次学術講演会講演集第V部, pp.464 - 465, 1999.
 - 4) 甲斐一夫, 佐藤良一, 阿部洋一, 熊倉正志: プレキャスト舗装版目地部の純せん断試験, プレストレストコンクリート技術協会第3回シンポジウム論文集, pp.381 - 384, 1992.
 - 5) Kumakura, M., Kondo, S., Kai, K., Abe, Y. and Sato, R.: Development of a Prestressing Method for Joints of Precast Prestressed Concrete Pavement Slab, *7th International Symposium on Concrete Roads, Session 2-3*, pp.83 - 88, 1994.
 - 6) 福手 勤, 八谷好高: コンクリート舗装の目地部における荷重伝達機能, 土木学会論文報告集, 343号, pp.239 - 246, 1982.
 - 7) Tabatabaie, A. M. and Barenberg, E. J.: Structural Analysis of Concrete Pavement Systems, *Journal of ASCE*, Vol.106, TE5, pp.493 - 506, 1980.
 - 8) Nishizawa, T., Matsuno, S. and Fukuda, T.: A Mechanical Model for the Rational Design of CRCP, *3rd International Conference on Concrete Pavement Design and Rehabilitation*, pp. 341 - 350, 1985.
 - 9) 西澤辰男, 七五三野 茂, 小松原昭則, 小梁川 雅: 連続鉄筋コンクリート舗装横ひび割れ部の荷重伝達機能, 第1回舗装工学講演会講演論文集, 土木学会, pp.73 - 80, 1996.
 - 10) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 III コンクリート橋編, 340p, 1996.

(2000. 4. 6 受付)

LOAD TRANSFER MECHANISM OF COMPRESSION JOINT AT PRECAST PC SLAB PAVEMENTS

Fumishige AKAMINE and Yoshitaka HACHIYA

In this paper, a load transfer mechanism of compression joint, which is a new joint system of precast prestressed concrete (PPC) slab pavements used in airport aprons, is described. At the compression joint, PPC slabs are connected with jointing sections using PC strand installed in slabs at a certain interval so that the shearing force and bending moment are transferred between slabs. To analyze mechanical behaviors of PPC slab pavements, 3D FEM was used; the former is modeled as vertical springs and the latter is modeled as horizontal springs. Both the validity of the model and their mechanical properties are verified through loading tests of an experimental pavement.