

フォークリフトの走行する倉庫床の研究 (その1)

高橋 久雄 林 好正
小柳 光生
観音 延平 羽石 充
(本店 建築設計第三部) (本社 建築本部 設計第三部)

A Study of a Storehouse Slab Travelled by Forklifts (Part 1)

Hisao Takahashi Yoshimasa Hayashi
Mitsuo Koyanagi
Nobuhira Kannon Mitsuru Haneishi

Abstract

This report is on investigations of the actual state of damage to a storehouse slab travelled by forklifts, and on studies of the causes of the damage. It was ascertained that the slab had been damaged due to fatigue as in the cases of highway bridges. Since damage due to fatigue will lead to reduction in structural strength, it is necessary to consider the problem of fatigue caused by repeated passes in design of a floor slab on which forklifts will travel. Abrasion resistance tests of surfacing materials and bond fatigue tests of reinforcing steel and concrete were performed with the purpose of obtaining design data. The bond fatigue tests used D13 reinforcing steel with bonded lengths of 15 cm. Ten thousand cycles of loading were applied and the loading stress was about 80 percent of bond strength.

概 要

フォークリフトの走行する倉庫床の損傷実態調査を行ない、その原因を検討したところ、道路橋などの損傷と同じく疲労による損傷を受けていることが分った。疲労による損傷は、構造耐力の低下をもたらすため、フォークリフトの走行する床スラブ設計にあたっては、くり返し走行による疲労問題を考慮する必要がある。設計資料を得る目的で、仕上げ材の摩耗性能試験および鉄筋とコンクリートの付着疲労試験を実施し、その概要を示した。付着疲労試験は、D13鉄筋、付着長15cmの片引き法とし、載荷応力は付着強度の0.8倍前後、繰返し回数は1万回前後の限定された試験であり、この結果から繰返し回数と付着性能劣化の関係を検討した。

1. まえがき

フォークリフトの走行する倉庫床の損傷に対する苦情が近年非常に多くなっている。一般的に、建築物の設計では高頻度の繰返し荷重に対して特に考慮することが少なく倉庫床の設計においても同様である。一方、現在の流通機構の進展に伴い、流通センター的な性格をもつ倉庫が要求されることも多く、その場合積載設計荷重はそれほど大きくないが、頻繁にフォークリフトが走行するという使われ方がされている。

フォークリフトの走行する倉庫床の損傷の原因として、このような設計条件に対する配慮不足やその倉庫の実情を適切に設計及び施工に反映させるための資料不足など

があげられよう。

本研究報告では、フォークリフトの走行する倉庫床設計・施工のための資料を得る目的で、倉庫の床使用状況と損傷の実態調査、仕上げ材の摩耗性能試験、鉄筋とコンクリートの付着繰返し疲労試験を実施したので、これらの結果を中心に報告する。

2. 実態調査

2.1. 損傷の実態

フォークリフト走行などで損傷したと思われる倉庫床について数例の調査を行なったので、その損傷状況を示す。

(1) スラブ上面の場合

車輪走行により、スラブ表面のセメント質が摩耗のため消失し、骨材が露出してくる。また車輪走行を受けるスラブ周辺に大きな曲げひび割れが発生し、たわみを生じる。また進行方向と直角に表面ひび割れが発生し、そのひび割れなどにより拡大してくる。さらに傷みがひどくなるとスラブ上面で部分的にコンクリートが圧壊、剝離し陥没という現象も生じる。

(2) スラブ下面の状況

スラブ中央部に、曲げひび割れが発生し、さらに配筋ピッチに合わせて格子状にひび割れが拡がり、そのひび割れ部からコンクリート粉末もしくはコンクリート片が落下してくる。なおこの落下現象はフォークリフト移動荷重の繰返し作用によってひび割れ面がこすられるために起こると思われる。

写真一1, 2に典型的な疲労損傷の状況を示すが、これは次節に述べるB建物被害例であり、かなり損傷が進行した状態である。

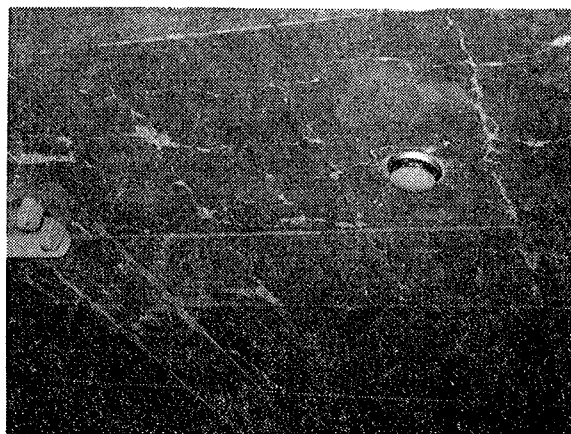
これらの損傷は道路橋における疲労損傷と同じ現象であり、コンクリート構造物の疲労障害として特有のものと言えよう。この疲労破壊は道路橋の場合車輪荷重による押抜きせん断破壊であると指摘されている¹⁾。

また、積荷などの持続荷重により過大なたわみを生じた床版の場合、建物使用上支障をきたすことはあっても構造耐力上の劣化は余り起こらないことが載荷実験などから確認されているが、今回のようにフォークリフト走行による繰返し荷重を受ける場合は疲労劣化により構造耐力上もかなり劣化することが予想される。そのため、疲労損傷の恐れのある場合、早期に補強を施すとともにその補強方法は疲労問題に十分対処し得る方法を選定しなければならない。

2.2. 損傷した建物調査および分析結果

これまで調査した建物のうち類似のスラブ形状として比較しやすい3例についてスラブの諸元および応力計算結果を整理し、表一1に示す。なおこの表中、フォークリフトによる最大モーメントは、一方向連続支持として下式から求まると考える。

$$M_p = \frac{1}{8} p \cdot l_x / b \quad \dots\dots\dots(1)$$



写真一1 スラブ下面：格子状のひび割れ



写真一2 スラブ上面：局所的な圧壊

$$b = \frac{2}{3} \left(l_x + \frac{s+a}{2} \right) \quad \dots\dots\dots(2)$$

P: フォークリフト荷重, l_x : 短辺スパン (スパン中心間距離), b: 有効幅, S: 仕上げ層厚, a: 載荷面の幅

この時、有効幅 b は、建築学会鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 (1979, P. 88) の式を採用しております。また a として車輪間隔 90 cm を取っている。

またこの表から、フォークリフト荷重による応力と設計荷重による応力は同程度もしくは設計荷重の方がやや大きいという結果を示しているが、実際にはこれらのスラブはフォークリフト走行によってかなりの損傷を受け

損傷建物	構造	スパン(m)		スラブ厚 t(cm)	短辺端部上端筋	自重 D(Lkg/m ²)	積載荷重 L(Lkg/m ²)	フォークリフト荷重 P(ton)	有効幅 b(m)	自重による応力			フォークリフトによる応力			設計荷重による応力			フォークリフト+自重)応力		
		l_x	l_y							M(kg·m)	σ (kg/cm ²)	f(kg/cm ²)	M	σ	f	M	σ	f	M	σ	f
A	S造	3.5	6.2	15	13φ-@200	360	750	2.8	2.63	335	8.9	481	465	12.4	667	1033	27.5	1482	800	21.3	1147
B	RC造	3.7	6.0	12 (値出713.5)	13φ-@200	324	500	3.0	2.77	346	11.4	495	502	16.5	719	880	29.0	1260	848	27.9	1214
C	S造	2.7	7.5	15	ダブルD13,D10-@150	360	1000	4.0	2.10	219	5.8	316	643	17.1	928	827	21.9	1193	862	22.9	1244

表一1 損傷建物スラブの諸元および応力計算結果

ている。このような損傷を生じた理由としては、一つにはフォークリフトの頻繁な繰返し走行による疲労劣化があげられる。

床スラブの使用状況は、A、C建物スラブの場合、特に頻繁にフォークリフトが走行しており、A建物についてメモーション測定装置を使い通行頻度を調査したところ、最も頻度の高いと思われる対象スラブ上の通行頻度は年間40～50万回と予測された。同一スラブでもその走行位置は多少異なると考えて、1/3を乗じて年間15万回程度が得られる。B建物の場合も同様に10～20万回/年の走行が予想される。

参考に、コンクリート舗装道路の床版設計における曲げ引張強度の疲労曲線²⁾を、図-1に示すが、この図から例えば20万回の繰返しの場合、静的曲げ強度の0.6倍とかなり小さく曲げ耐力を見込んでいることがわかる。

このため設計にあたってはフォークリフトのタイプや走行回数などを把握し、その使用条件に応じて各種許容応力度を低減させる必要がある。圧縮強度、曲げ強度、押抜きせん断強度などの疲労曲線については土木の分野で多くの実験研究が行なわれており、かなりのデータが見られる。

しかし、鉄筋とコンクリートの付着疲労の問題を取扱った研究は少ない³⁾。今回の被害調査から、コンクリートスラブ下面で主筋にそったひび割れが発生し、鉄筋との付着が消失し、コンクリートがもろくなり、剝離・剝落を起こしている傾向があり、他のコンクリート強度劣化に比べて、付着強度の疲労劣化の方が大きい恐れが考えられた。そのため、付着疲労に関する実験を行ない、第4章にその実験概要を示す。

その他の問題点として、有効幅の取り方が不明確な点もそのフォークリフトによる応力の把握を困難にしていると思われる。今回は静的集中荷重における有効幅の計算式、(2)式を用いているが、ひびわれを有する移動荷重の場合、有効幅は(2)式よりも小さい可能性があるが本文では検討しない。

なお、下地躯体の他に仕上げ材の良否によってもその作業能率は大きく影響を受けるので、3章では各種の床仕上げ材の耐摩耗性を評価するために、基礎的な摩耗試験に行ない、その概要を示す。

3. 仕上げ材の耐摩耗性試験

3.1. はじめに

倉庫床、工場床などのフォークリフト、重車輻の輪荷重による重摩耗を受ける床では、ひび割れ、表面層の剝離摩耗などその損傷は著しい。摩耗、衝撃などの外力から構造躯体を保護する上で床仕上げ材の役割は重要であ

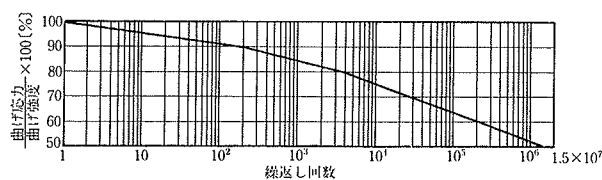


図-1 曲げ強度の疲労曲線

る。床仕上げ材の選定に当たっては、コンクリート下地との接着性、耐摩耗性が高いことその他に、輪荷重を緩衝させるために、ひずみ吸収能力があり、且つ仕上げ層厚が大きいことに留意する必要がある。しかしながら、これらの劣化外力に対する仕上げ材の耐久性を評価する手法が確立されていないのが現状である。ここでは、床仕上げ材の耐摩耗性だけを検討しており、あくまで各種床仕上げ材の摩耗の一面をとらえたものである。各種の床仕上げ材が市販され、それらのカタログには耐摩耗性に関するデータが記されているが、その評価方法はまちまちであり、比較検討することが困難な場合が多い。従って各種の床仕上げ材の耐摩耗性を評価するために、同一の試験方法で実施した。

3.2. 試験概要

(1) 試験方法

ASTM C 779「Standard Test Method for ABRASION RESISTANCE OF HORIZONTAL CONCRETE SURFACES, PROCEDURE A-REVOLVING DISKS」に準じて摩耗試験を行なった。

150 rpm の電動モーターによって直径 30 cm の円板が 12 rpm で回転し、円板に取付けられた直径 6.3 cm の 3 箇の摩耗輪が 280 rpm で自転する。この摩耗輪が供試体上面をドーナツ型に摩耗する。摩耗時間、15分、30分、60分、90分、120分、180分毎に摩耗深さを測定した。

(2) 試験体

試験体の寸法は 300 mm × 300 mm (厚み: 50 mm) で、その種類は下記に示す通りである。

〔試験体 A〕

スランプ 18 cm の軟練りコンクリートの金ごて仕上げ。

〔試験体 B〕

スランプ 8 cm の硬練りコンクリートを高流動化剤を用いてスランプ 12 cm にさせたコンクリートの金ごて仕上げ。

〔試験体 C〕

上記 A のコンクリートを下地材とした散布塗込み型耐摩耗性床仕上げ材“マスタープレート MP 200, 散布量: 10 kg/m²”の金ごて仕上げ。

〔試験体D〕

上記Bのコンクリートを下地材とした散布塗込み型耐摩耗性仕上げ材“マスタープレート MP 200, 散布量: 10 kg/m²”の金ごて仕上げ。

〔試験体E〕

普通セメントモルタル (C:S=1:3) の金ごて仕上げ。

〔試験体F〕

SBR系合成ゴムラテックス“マルチテックス01”を混入したポリマーセメントモルタル (C:S=1:3, P/C=20%, wt) の金ごて仕上げ。

〔試験体G〕

合成ゴムラテックス混入アスファルト舗装材“ノバロード”

〔試験体H〕

アスファルト半剛性舗装材

上記試験体A～Fは20℃, 80% R. H. で湿空養生1日後に脱型し, 20℃, 60% R. H. の恒温恒湿室において1ヶ月間養生した。

3.3. 試験結果および考察

試験結果は図-2に示す通りである。普通セメントモルタルの金ごて仕上げの耐摩耗性は, 普通セメントコンクリートの金ごて仕上げに比べて劣るが, ポリマーで改質することにより, 普通セメントコンクリートの耐摩耗性に近づけることができる。普通セメントコンクリートの金ごて仕上げでは, 堅練りのもの程, 耐摩耗性が高い。散布塗込み型耐摩耗性床仕上げ材によりコンクリート

表面の耐摩耗性を著しく改善することができるが, 下地となるコンクリートの品質の差に余り影響を受けない。

アスファルト系の床仕上げ材は, 散布塗込み型耐摩耗性床仕上げ材に比べてその耐摩耗性は劣るが, 普通セメントコンクリートの金ごてに比べてその耐摩耗性は高い。この種の材料は, 耐摩耗性もある程度期待することが可能で, 而も他の床仕上げ材に比べて仕上げ層の厚みも大きく, ひずみ吸収能力も高いので, 摩耗・衝撃を受ける倉庫床の床仕上げ材として有効なものと思われる。

4. 繰返し荷重による鉄筋とコンクリートの付着実験

4.1. はじめに

今回, 付着疲労特性に関する初歩的な実験として, 約1万回以内での引張加力-除荷の繰返し加力における付着実験を行なったのでその概要を述べる。

4.2. 実験概要

付着試験方法はスラブ部材の曲げ応力状態での付着性状ということ想定して, 図-3に示す試験法を考案した。試験体の形状は150×200×400 mmのコンクリート直方体に鉄筋D13をコンクリート面から鉄筋中心まで3 cm位置に埋込んだもので, 5 cm長さのシーす材を使って付着長を15 cmとした。試験体は同一試験体計13体とし, そのうち4体は繰返し試験に先立ち最大付着強度を求めるための静試験用とした。繰返し試験体計9体は, 最大載荷荷重として付着強度の0.80倍前後を計画し, 最小載荷応力は最大載荷応力の0.2倍程度を計画した。繰返し加力方法は, 200 ton 万能試験機および併設付属低サイクル制御装置を用いたが, この制御装置の速度は1~2サイクル/minであった。なお加力開始は材令8週とし, 繰返し実験は約1ヶ月間を要した。

コンクリート設計強度 $F_c=210 \text{ kg/cm}^2$, 所要スランプ18 cmを設定しており, この時のコンクリート調合, 性質および強度試験結果を, 表-2~表-4に示す。この結果, 4週強度は平均 288 kg/cm^2 であった。骨材は川砂, 川砂利を使用した。

変位測定法は, ゲージ式変位計(東京測器製 CDD-10, 感度 $1 \times 10^{-3}/\text{mm}$)を用い, 自由端, 加力端の動きを測定した。

4.3. 実験結果

静試験用4体から8週時付着強度を求めたところ, 平均付着強度は3.58 tonを示し, これは単位面積当りの付着強度: $\tau_{\max}=p/\psi \cdot d=3,580/(4 \times 15)=59.7 \text{ kg/cm}^2$ であった。この時の荷重-自由端めり込み量の動きを図-4にまた破壊状況を一部, 図-5に示すが, すべての試験体に鉄筋にそったひび割れパターンを生じており,

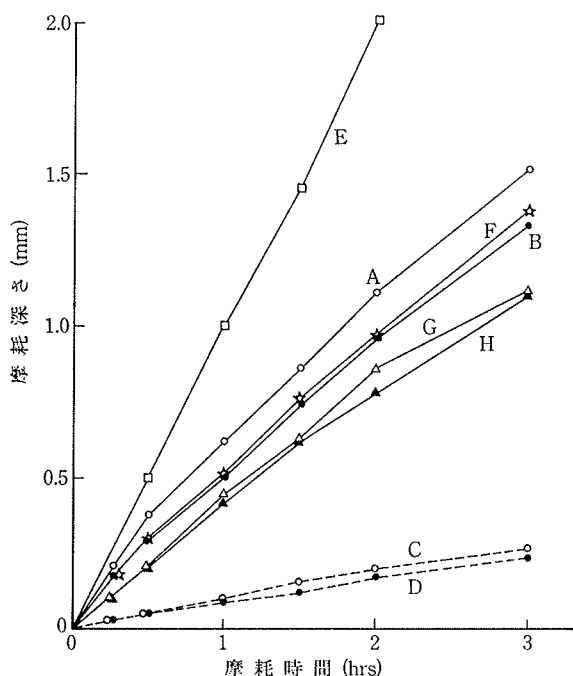


図-2 各種床仕上げ材の耐摩耗試験結果

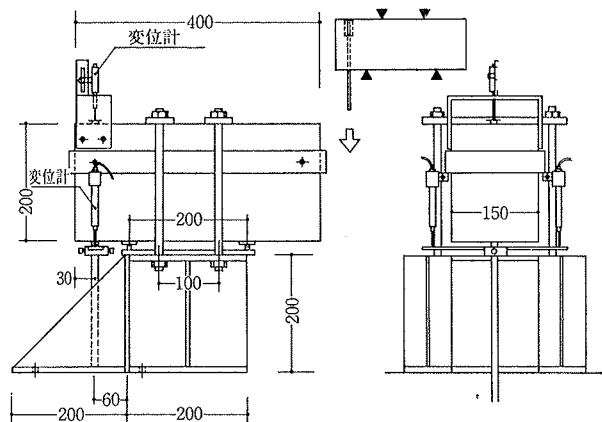


図-3 付着疲労試験の状況(正引張-除荷の繰返し)

種類	セメント	水	砂	砂利	AE剤	水セメント比 W/C	砂率 s/a
重量割合 (kg/m ³)	318	186	788	995	0.064	58.5%	44%

表-2 コンクリートの調合

試験結果			所要条件	
スラブ	空気量	練上り温度	スラブ	空気量
17.1cm	3.6%	17.0°C	18.0cm	4.0%

表-3 練上りコンクリートの性質

材令	4週	8週	13週	備考
圧縮強度 (kg/cm ²)	288	271	281	養生条件: 恒温気中養生
弾性係数 (×10 ⁵ kg/cm ²)	2.50	2.96	2.46	

表-4 コンクリート圧縮強度試験結果

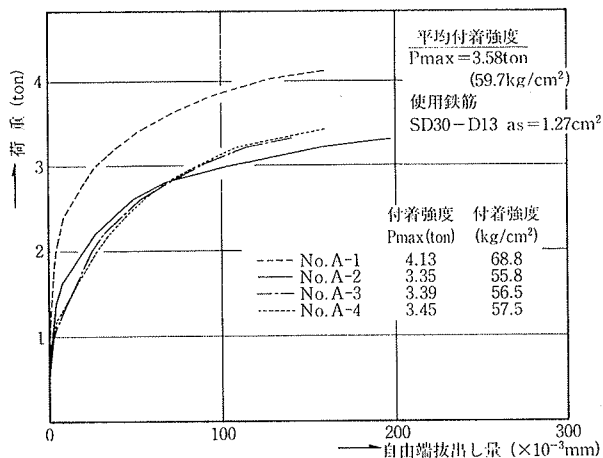


図-4 静的付着試験時の荷重-自由端めり込み量の動き

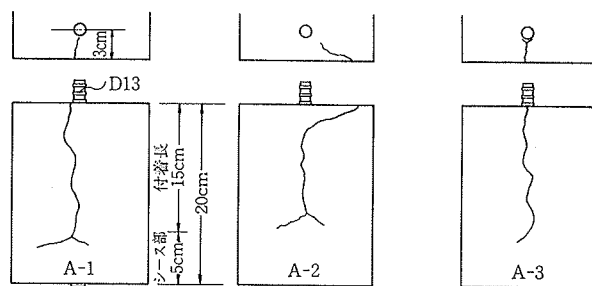


図-5 付着破壊後のひび割れ状況

この状況から付着割裂破壊と思われる。

次に、繰返し荷重による付着試験の結果について述べる。繰返し回数と加力端抜き量の関係を、図-6に、また繰返し回数と自由端めり込み量の関係を、図-7に示す。試験結果から1万回前後の繰返し回数で、試験体9体中5体が付着破壊を起こした。各々の試験体の試験結果について述べる。

(1) No. 1, No. 2 試験体は、荷重幅 0.54~2.72 ton を設定した。この荷重は静的な付着荷重 3.58 ton に対し最大応力比0.75に相当する。試験の結果、No. 1は操作ミスで150回の繰返し中、誤まって破壊時まで加力してしまった。この時の破壊荷重すなわち引抜き耐力は 3.50 ton であった。No. 2は3,000回まで繰返したが破壊まで至らなかったのその後、静加力を行なったところ、その時の最大荷重は 3.91 ton であった。

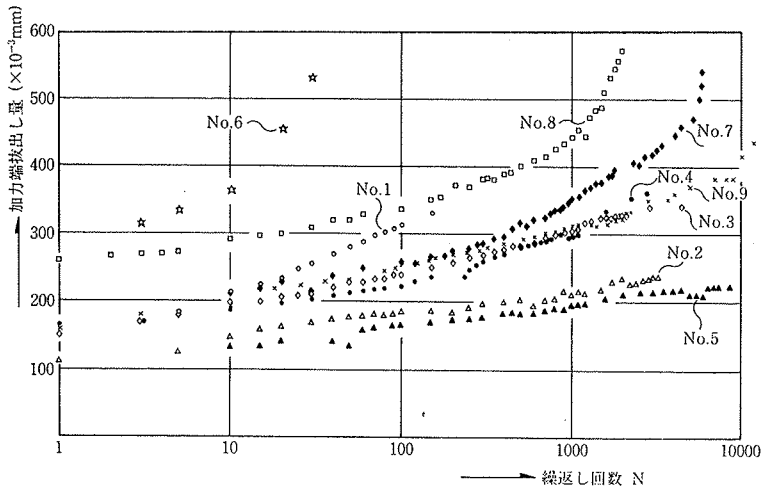
(2) No. 3~No. 5 試験体は、荷重幅 0.6~3.1 ton 程度を設定した。この荷重は、付着荷重3.58 ton に対し、最大応力比0.87に相当する。No. 3, No. 4は3,000~4,000回まで、No. 5は18,000回まで繰返したが、疲労破壊まで至らなかった。その後、静加力を行なったところその時の最大荷重は No. 3, No. 4, No. 5ともに 4.0 ton を上廻っていた。

(3) No. 6~No. 8 試験体は、荷重幅 0.5~3.2 ton を設定した。この荷重は、付着荷重3.58 ton に対し、最大応力比0.89に相当する。これらの試験体はすべて繰返しによる疲労破壊を生じた。その破壊時くり返し回数は No. 6で30回、No. 7で6,000回、No. 8で2,500回であった。

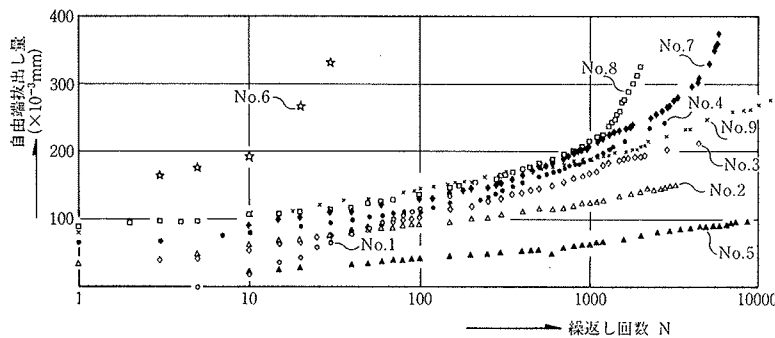
(4) No. 9 試験体は、荷重幅 0.5~2.70 ton を設定した。この荷重は、付着荷重3.58 ton に対し、最大応力比0.75に相当する。この試験体は繰返し回数44,500回で疲労破壊した。

4.4. 実験結果の検討

今回の繰返し試験における上限荷重は 2.7~3.2 ton であり、これは鉄筋 (D13) の応力として 2.1~2.5 ton/



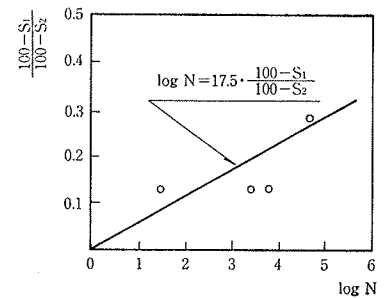
図一六 付着繰返し加力試験時の加力端拔出し量



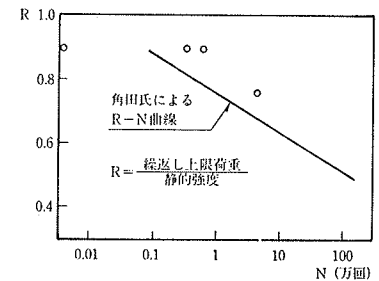
図一七 付着繰返し加力試験時の自由端めり込み量

cm²である。図一六、七の結果から、加力端の拔出し量はだまかに、1回加力時に0.1~0.15 mm、1,000回でその1.5倍、1万回で約2倍の拔出し量となっている。またこの繰返し荷重による加力端拔出し増加の動きは、図一七に示す自由端めり込み量増加量にほぼ等しく、このめり込み量がそのまま加力端での鉄筋拔出しとなっているものと思われる。

次に参考のため大林組技術研究所報 No. 19に掲載している付着クリープ実験結果⁴⁾と比較する。この付着クリープ試験体は、付着長 20 cm、鉄筋 D10 使用であり、コンクリートも多少異なるが加力試験方法は全く同一である。この付着クリープ実験結果から、鉄筋応力 2.0 t/cm²の持続荷重に対して、加力直後で 0.11 mm、10日で 1.5倍、1年で 2.0倍という結果を示した。付着応力は、繰返し試験では 35~40 kg/cm²(上限)であるのに対し、付着クリープ試験では 23 kg/cm²程度と異なるため直接比較はできないと思われるが、拔出しの増加率は付着応力の大きさに関係ないと仮定すれば、1万回繰返しにおける加力端拔出しの伸び率は、1年間持続荷重における拔出しの伸び率に相当すると言える。



図一八 圧縮強度疲労寿命算定式と今回のデータの比較



図一九 押抜きせん断実験 R-N 曲線と今回のデータの比較

次に、疲労破壊した No. 6~No. 9 試験体のデータを使って既存の文献資料と比較する。徳光・松下氏は疲労寿命算定式を提案しており、この式は S-N 曲線(耐久性曲線)において、最小応力が増加すれば、疲労強度が増大することを考慮しているもので下式で表わされる⁵⁾。

$$\log N = 17.5 \frac{100 - S_1}{100 - S_2} \dots\dots\dots(3)$$

S₁: 繰返し最大応力比 (%)

S₂: 繰返し最小応力比 (%)

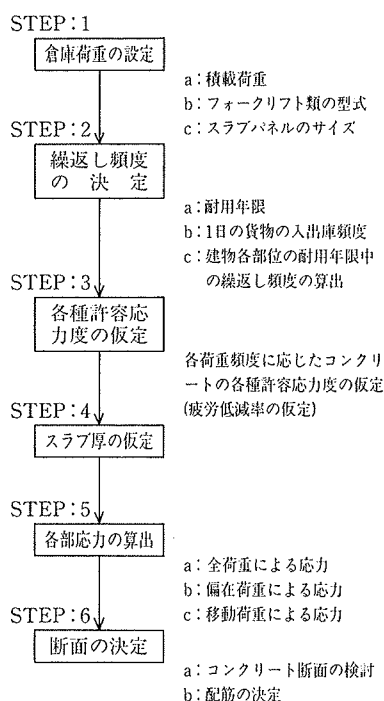
N: 繰返し回数

ただし、上記の式は圧縮強度に関する実験結果から得られたものである。この式と今回の実験で疲労破壊した四つのデータを比較して、図一八に示す。今回の実験データは数少ないため十分な判断はできないが、今回の付着疲労破壊のデータは、この(3)式と特に大きく異なるものではないと言えよう。

また別の資料として、角田氏等の押抜きせん断実験結果から得られた R-N 曲線 (R は繰返し上限荷重と静的強度との比) を図一九に示し、この図中に参考のため今回のデータを記す⁶⁾。

5. 繰返し荷重に対する設計法案

繰返し荷重を考慮した設計手順の参考例を、図一10に示す。ここで、STEP:3の各種許容応力度の仮定に当っては、参考文献に示すような既応の研究論文及び本文3章の実験結果などを参照されたい。なお図一1は曲げ引張強度の疲労曲線であるが、図一9の角田氏の押抜きせん断実験の疲労低減率および、付着疲労に関する今回の実験値が共に図一1を上廻るので、各種の許容応力度に対して一率に図一1の値を用いても、設計上は差支えないものと思われる。



図一10 繰返しを考慮した設計手順

6. まとめ

フォークリフトの走行する倉庫床の損傷実態調査を行ないその設計上の対策を検討した。また設計資料を得る目的で仕上げ材の摩耗性能試験および付着疲労試験を実施し、その概要を示した。付着疲労試験は、試験体数も少なく、また繰返し回数も1万回と限定された条件ではあったが、圧縮強度などの他の強度の疲労劣化と同程度の疲労劣化を示すものと予測された。疲労損傷は構造耐力の大きな低下を招くため、その設計にあたっては十分な配慮が必要である。

参考文献

- 1) 園田恵一郎, 他: 道路橋 RC 床版の疲労破壊特性に関する一研究, セメント技術年報, (昭和53), pp. 463~467
- 2) 日本道路協会編: セメントコンクリート舗装要綱, 丸善
- 3) 大喜多一晃, 他: 鉄筋とコンクリートの繰返し加力下における付着性状に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, (昭和45. 9), pp. 641~642
- 4) 小柳光生他: R.C. スラブの長期におけるひびわれ変形に関する研究(その4), 付着クリープ実験結果, 大林組技術研究所報, No. 19, (1979), pp. 64~68
- 5) 松下博通, 他: 繰返し荷重を受けるコンクリートの疲労強度, コンクリート工学, Vol. 17, No. 6, (Jun. 1979), pp. 13~21
- 6) 角田与史雄, 他: 鉄筋コンクリートスラブの疲労押抜きせん断強度に関する実験的研究, セメント技術年報, (昭和49), pp. 391~394