

大スパンスラブの沈下事故と振動障害について

磯 畑 脩

§ 1. はじめに

近来、鉄筋コンクリート建物が設計、施工、設備等の面で著しく変化しつつある中で、床板スラブにおいても小梁を回避した40m²級の大スパンのものが数多くつくられるようになった。しかるに、これらの中のあるものが施工後数年の間に、次に述べるところの大たわみと振動障害をもたらしている事実が、最近やっと表面化するに至った。本報告は、障害の実態調査をあからさまにする一方、類型化しつつあるこの事故をでき得るならば未然に防ぐために、その問題点を究明する目的もあってまとめたものである。

§ 2. 大スパンスラブ障害の実態調査

2.1 障害の実態

大スパンスラブの沈下事故が典型的な問題点としてとりあげられたのは、昭和38年、札幌市における北大・大野教授による調査である¹⁾。この調査によると、「当時10年以内に札幌市に建設された鉄筋コンクリート建物のうち、完成後2、3年で小梁のない大きなスパンの床スラブに著しい大たわみが生じたものが5例ある」。

同報告書では、これらの調査結果を設計、実験等の面から検討し、損傷の主な原因として、

- ・(有効スパン/スラブ厚)の大きい場合のスラブ余力の低下
- ・スラブコンクリートの乾燥収縮による引張元応力大
- ・収縮応力による周辺キレツの発生
- ・スラブのたわみフロー

をあげており、「北海道だけの問題でない可能性が濃い」としている。

当研究所が扱った調査の範囲は札幌、仙台、東京にわたっており、そのような大たわみ事故と同時に振動障害を伴っているのが特徴で、この種の典型的なD建物の場合

合は、次のような状況である(建物の規模、その他詳細は表-1、図-1参照)。完成後8年以内に、ほとんど全階全スラブにわたり、周辺ハンチ仕上面に大きなひびわれ(5mm前後)が生じ、かつ、スラブ中央はいずれも16~46mmに及ぶ大たわみを生じてきた。このため調査当時では、ロッカーなどの背の高い事務什器のすえ付けが不整で、またその上を歩行すると、わん曲しているのが感ぜられる。振動障害として調査したのはこの大たわみが生じた後で、前面道路の車の振動伝播にもまして、床上を歩くだけでも人体に感ぜられるほどである。

鉄筋コンクリートの建物では木造建築と違い、このような状態は居住者に極度の精神的不安を及ぼすことが、これまでの一般の振動調査に共通して認められている。

ひとたび、このような事故が生じた場合、床板スラブはその機能上、補修するに上下階も併せてある期間は居住者とその業務に著しく支障を与えるのは明らかであり補修自体がやっかいな仕事となるであろう。ゆえに、大スパンスラブは施工段階ではむしろ、設計の当初から十分考慮してかからねばならないのが現状である。

2.2 調査結果

当研究所が扱った事故調査は昭和40年6月現在で5例あり、他にこれらと同じような設計の床板スラブについて、その施工直後でまだ積載の無いうちに調査したものが2例ある(ただし、これらは健全なスラブである)。はじめは特殊な事故例として調査していたものが、2例、3例と重なるにつれて調査を典型的に進めてきた結果、現在では、次のような調査方法によって問題点を究明すべく資料を集めてきた。

- (1) 施工当初の状況とその後の履歴調査
- (2) 強度試験(載荷試験、コア採掘またはシュミットハンマーによるコンクリート試験)
- (3) ひびわれ調査
- (4) 耐力の検討
- (5) 配筋調査

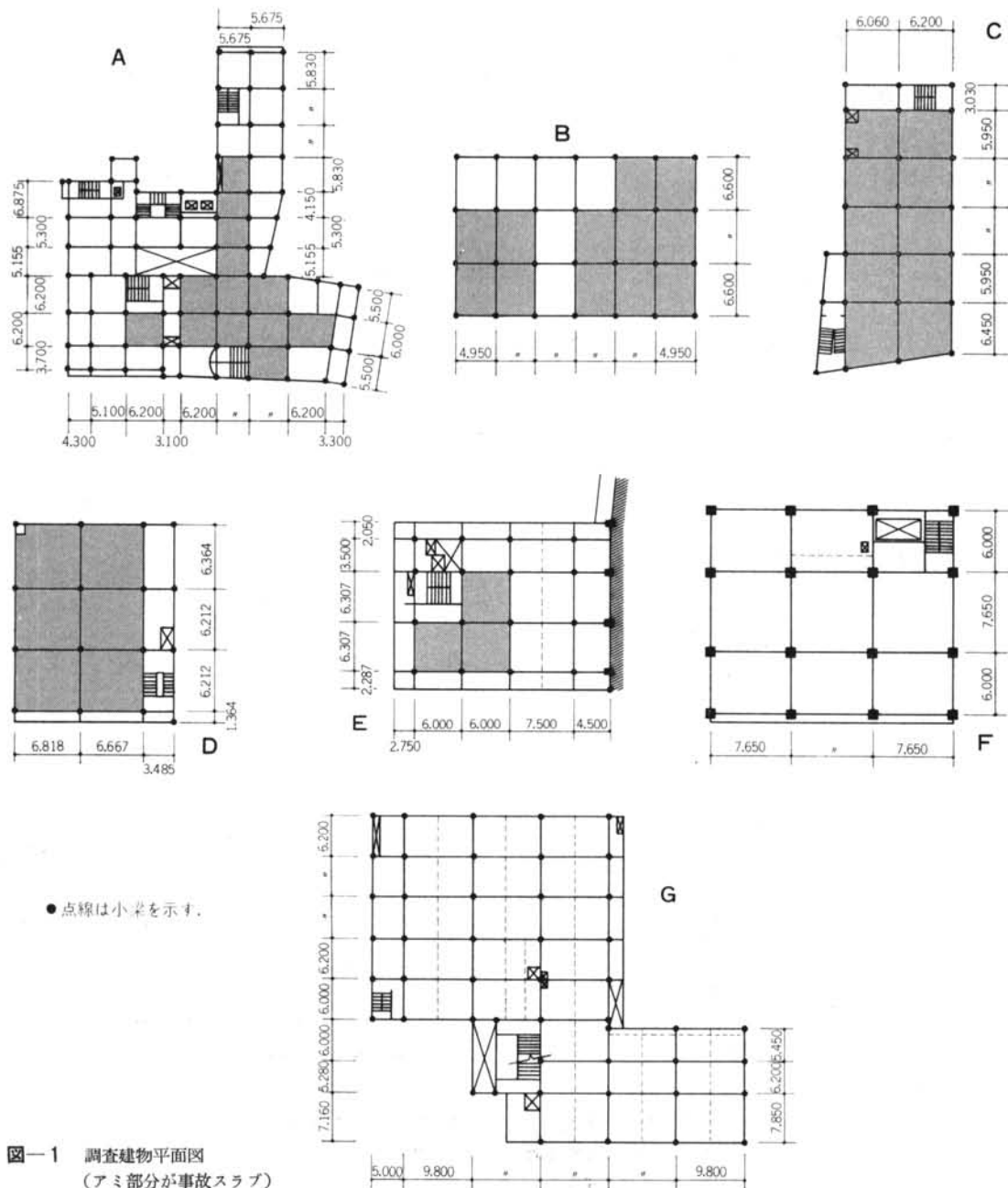
(6) 振動調査

(1), (4)は設計部, (2), (3)は担当現場が多く実施しているが, 研究所は総括的にこれらを扱っており, 特に(6)に重点をおいている。(6)は振動障害の調査であって, 床板振動の実情を測定して障害程度を表示し, 防振対策の資料として提供している。調査方法および床板振動の特徴は §4 にて述べる。

以上の調査結果を要約したのが, 表-1 と 図-1 であ

り, B建物以外は当社の設計・施工, Bは他社の設計で当社の施工である。A～Eは調査の順序になっており, A, Eの調査期日はそれぞれ昭和37年11月, 39年6月である。F, Gは施工直後に調査した健全なものである。

調査建物のほとんどは完成後年数が経過しているため特に施工状態については, 乏しい資料と当時の施工担当者の記憶によったもので, 納得のゆかぬ点が若干あったけれども, 確信のもてる事項のみを明記しておいた。



仮 称	A	B	C	D	E	F	G
規 模	SRC8F(B2)	SRC10F(一)	RC3F	SRC5F(B1)	SRC8F(B1)	SRC9F(B1)	SRC9F(B1)
所 在 地	仙 台	東 京	東 京	札 幌	東 京	東 京	名 古 屋
用 途	売 場	事 務 室	事 務 室	売 場	売 場	事 務 室	事 務 室
施工時期(昭)	28~32年	38年	34年	28年	31年	39年	40年
設 計 荷 重	DL 470 LL 300	DL 210 LL 300	DL 340 LL 300	DL 390 LL 300	DL 330 LL 400	DL — LL 300	DL 330 LL 300
ス ラ ブ 寸 法 (梁 心)	6,200×6,200 5,300×6,200	4,950×6,600	5,950×6,200	6,380×6,670 6,380×6,820	6,000×6,300	7,650×7,650	4,900×7,150
ス ラ ブ 厚	135	105	120	135	150	150	120
有効スラブ厚比	1/43, 1/38	1/44	1/47	1/43	1/38	1/48	1/38
ハ ン チ	あ り	な し	端180, 長300	端270, 長450	な し	テーパハンチ	な し
コンクリート (骨 材)	C150	LC 120 (榛 名)	C180 (相 模 川)	C150 (石狩・当別)	LC 120 (榛 名)	C210 (安 倍 川)	C210
配 筋	主9,13φ—180 (中)	主9φ—100 配9φ—150	主9,13φ—120 配9,13φ—120	主9,13φ—160 配9φ—160	主9,13φ—180 配9,13φ—200	—	主13φ—120 配13φ—220
床 仕 上 げ	フローリング ブロック	塩ビタイル	緑甲板張	リグノイド, 人研	フローリング ブロック	塩ビタイル	塩ビタイル
測 定 振 動 数 C.P.S.	10.0~12.0 16.0	12.0(推定)	10.7	13.3~ 15.8	8.0~ 9.4	17.4 21.2	17.6~19.7
沈 下 量 mm ($\frac{\text{沈下量}}{\text{短辺スパンの } 1/2}$)	25~47 (9.4~15.2 $\times 10^{-3}$)	20~27 (8.0~11.0 $\times 10^{-3}$)	10~54 (3.0~16.8 $\times 10^{-3}$)	16~46 (5.0~14.4 $\times 10^{-3}$)	15~36 (5.0~12.0 $\times 10^{-3}$)	な し	な し
ひ び わ れ	下面中央に曲 げひびわれ 上面は不明	下面中央0.1~ 0.3mmの曲げ ひびわれ 仕上塩ビタイル には異常なし	下面中央, 端 部上面に0.1~ 1.0mmの曲げ ひびわれ	仕上面周辺で 顕著, 上面ハ ンチ端のコン クリート面	上面端部, 下 面中央にある 模様	な し	な し
沈 下 時 期	5年以内	1年以内	4年以内	8年以内	2年以内	—	—
シュミットハンマ ーによるコンクリ ート推定強度 kg/cm ²	156~283 (抜取平均195)	180以上	180弱	105~160	54~129	—	300 (スラブ, 柱梁) 260 (スラブ平均)
養 生	不 明	真空工法(外気 0°~15.3°C) サポート存置期 間は18日	サポート存置期 間は28日 (晴, 時々曇)	杉丸太支持 存置期間不明	1層の打上りは 14日, 上層では 7日~10日	—	—
載 荷 履 歴	不 明	不 明	不 明	over load が あったと推定さ れる	正常であることを 確認	—	—
備 考	・数期にわたっ て増築	・Fc _r =96 ・Fc ₂₈ =169 ・事故スラブの 一部は普通コ ンクリート ・配筋に全く余 裕なし	・用途変更 ・Fc ₂₈ =288 ・ミシン(100 kg), プレス (400kg)等を 設置	・現場練コンク リート ・仕上厚で中央 は周辺より1 cm程度厚い	・急増築 ・コンクリート 管理不十分 ・私鉄ターミナ ルとして震源 を有する	・Fc _r =163 ・Fc ₂₈ =215 ~245	・載荷試験から 求めたEは 233,000kg/ cm ²

表—1 調査結果

2.3 考察

以上の調査結果を検討すると、A～Eの共通事項として次の点が考えられる。すなわち、設計の面から、

- (1) スラブ寸法が大きく、短辺でも少なくとも5m以上はある。したがってスラブ面積は 30m^2 以上ある
- (2) 小梁のない一枚スラブである
- (3) スラブの所要固有振動数の推定値は15～18 C.P.S. (C.P.S.=振動数/秒)であって、防振設計上好ましい数値でない
- (4) (有効スパン/スラブ厚)は設計規準ぎりぎりであって、いわゆる薄肉スラブに属する
- (5) 床仕上材の曲げ剛性が期待できない

となり、設計荷重、用途、配筋量、ハンチ等については共通点は見出せないが、配筋量に余裕のないものがある。

これに対し、施工面からは資料不足のため共通事項を見出すのに困難である。あえて要点をあげるならば、コンクリート打設工程であって、明らかに急いだものがある(E)。Dの場合も所在地、用途、施工時期に、現場担当者の談話を顧慮すれば、同様であろうと推測される。コンクリート打設工程に無理があると、養生、管理面に悪影響を及ぼすことは明白であろう。

一方、現状は次のとおりである。

- ・スラブの固有振動数(実測)は8～13 C.P.S.程度であり、高々16 C.P.S.である。これは床板コンクリートの曲げ剛度が低下したとみるよりも、ひびわれ等に基づくスラブ周辺拘束度の変化が直接影響したとみられる。
- ・ひびわれは仕上面はむろん、スラブコンクリートに及んでいることが認められる。ただ、これまでの調査では、ひびわれ付近の床仕上げを研ってみるか、天井仕上げを一部外してのぞく程度であるから、全面的な分布は不明である。
- ・床板の中央部のたわみは周辺に対して5cm前後に達しており、(たわみ/短辺スパン)について考えると、 $5 \sim 8 \times 10^{-3}$ である。なお、わん曲の発覚はこのたびの調査から、 3×10^{-3} 前後と推定できる。

考えられる事故要因はいずれの場合も大体同じで、次の点があげられてきた。

- (1) セメントの異常凝結、コンクリートのsettlingによる早期ひびわれ
- (2) コンクリート打設時期の気象条件
- (3) コンクリート打設方法、養生方法
- (4) 型枠支柱存置期間
- (5) 施工中の載荷、完成後の荷重履歴
- (6) 振動障害に対しては明らかに、固有振動数の不足

次章では、以上の事項を顧慮して、事故あるいは障害の問題点を設計、施工、材料の面から分析してみる。

§3. 大スパンスラブ障害の問題点

3.1 設計上の問題点

元来、床板は面に垂直な荷重を受ける薄板のことであって、梁、壁体に剛接された場合は周辺固定された平板板として取扱われる。この場合の理論値と設計値の比較は図-2²⁾のようになり、「周辺最大負曲げモーメント M_{y1} は理論値より低く(正方形板のときは1/1.24)、中央正曲げモーメント M_{x2} では若干高い」。

さらに、周辺曲げモーメントの分布の相違については、「板の破損がある幅に対する平均曲げモーメントが一定値に達したとき生ずるという事実によって裏付けられている」という点に基づいている(鉄筋コンクリート構造計算規準)。

(a) 短辺方向



(b) 長辺方向



・太線ハッチ——理論値
・細線——設計規定

図-2 床板曲げモーメント図

ここには特にスラブ端部の曲げ拘束度について細則はないが、おおそ大梁、隣接スラブの振り拘束がどの程度あるか、実際設計上、またこの後考察を進めるうえにも、知らねばならない重要な点である。

当面の大スパンスラブのうち、 $6\text{m} \times 6\text{m}$ 正方形スラブについて計算した結果を示すと図-3のようになるが、これによると、調査スラブのほとんどは $\bar{k}_s=0.8$ 以上の拘束度になっている($\bar{k}_s=0$ のとき単純支持、 $\bar{k}_s=1$ のとき完全固定)ことがわかり、小スパンよりも大スパンの方が、または、厚肉よりも薄肉の方が、スラブ周辺の拘束度が高い。

よって、大スパンスラブは荷重状態の如何によらず周辺固定板として考えてよさそうであるから、事故床板中央下面のひびわれは周辺固定度の低下に追従して発生する性質のものであることが図-3も考慮していえよう。

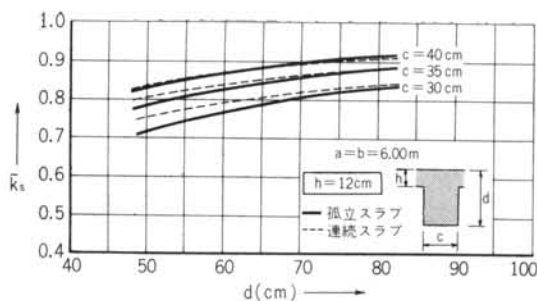


図-3-(a) スラブ端部拘束度 (h=12cm)

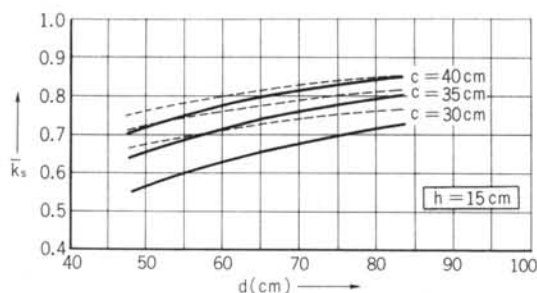


図-3-(b) スラブ端部拘束度 (h=15cm)

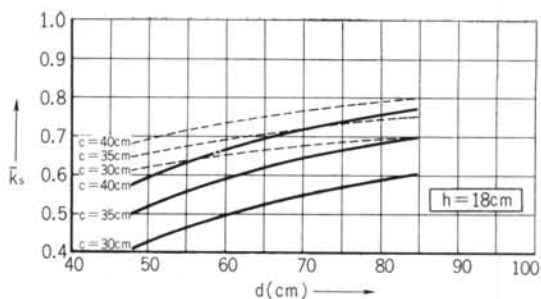


図-3-(c) スラブ端部拘束度 (h=18cm)

鉄筋コンクリート床板スラブの設計規準は戦後2回改正されており、表-2 に示すような事項がそうである。

特に、有効スラブ厚比が33年で1/50であったものが、37年では元の1/40に改正されているが、これは大スパンスラブの沈下事故が学会に報告されたからである。

調査建物を設計時期と対応させて表の右欄に記すが、()内の数値は、有効スラブ厚比を表わしている。A, Dは明らかにスラブ厚制限を超えているが、スラブハンチが付いており、これを考慮して設計したものと思われる。

改正年度	スラブ厚	スラブ配筋	設計曲げモーメント	調査建物
昭和22年	8cm以上、有効せいは、短辺有効スパンの1/40以上	主筋：8φ以上、あき200以内 配筋筋：8φ以上、あき300以内	$M_{x1} = -\frac{1}{12} w l x^2$ $M_{x2} = -\frac{1}{24} w l x^2$ $M_{y1} = -\frac{1}{24} w l x^2$ $M_{y2} = -\frac{1}{16} w y l y^2$	A (1/43) D (1/43) E (1/38)
昭和33年	8cm以上、全厚は短辺有効スパンの1/50以上	主筋：9φ以上、あき200以内 配筋筋：9φ以上、あき300以内かつ、全厚の3倍以内	M_{x1} M_{x2} M_{y1}	B (1/44) C (1/47)
昭和37年	8cm以上、全厚は短辺有効スパンの1/40以上	同上	$M_{x1} = -\frac{1}{12} w l x^2$ $M_{x2} = -\frac{1}{18} w l x^2$ $M_{y1} = -\frac{1}{24} w l x^2$ $M_{y2} = -\frac{1}{36} w l x^2$	

表-2 鉄筋コンクリート床板スラブ設計規準要綱

る。表からわかるように、B以外はスラブ厚に余裕がない。なお、B、Eは軽量コンクリートである。

スラブ断面については、次のように考えられる。

鉄筋コンクリートスラブ配筋は、他の曲げ材に比べ鉄筋径が小さいため、施工精度は低いであろう。設計上からは、スラブ配筋はつりあい鉄筋比以下として設計されるから、たとえ同一施工度でも、梁に比べれば、主筋位置が断面耐力に及ぼす影響の大きいことが容易に推測される。たとえば、主筋の所定位置からの上下の移動量を δ 、有効スラブ厚を d とすれば、設計上の曲げ耐力の低下は δ/d 程度で表わされ、多くの場合 $d=10\text{cm}$ 前後であるから、 δ の効果(すなわち、施工精度)は108%(δ はcm)のorderとなり、これは極めて大きい。

この効果は、スラブ耐力よりもむしろ曲げ変形、したがって、周辺ひびわれ発生に不利であろう。この結果、スラブ周辺拘束度が低下した場合、振動障害を併発する可能性は十分ある。

スラブ耐力そのものは弾性設計上あまり問題とされないが、鉄筋コンクリートのように脆性材料と考えられるものでは、次の点が指摘されている³⁾。

「鉄筋コンクリートスラブの鉄筋比がつりあい鉄筋比以下として最大主歪説を床板破壊に適用すると、

固定辺では、 $(1-\nu^2)|M_1| \leq |M_s|$

正方形板中央では、 $(1-\nu)|M_1| \leq |M_s|$

M_1 : 主応力による抵抗モーメント

M_s : 板と同厚、同鉄筋比をもつ梁の降伏モーメントとなり、変形の拘束、したがって、ポアソン比 ν の影響が板全面にわたって且これの影響が更に多いことに注目される」。さらに、「破壊は変形が直接的原因であって、応力は間接的である」。

もし、あらゆる意味で健全なスラブであれば、床板そのものは設計上十分安全であろう。しかしながら、大たわみを生じた床板では、床板耐力、あるいは余力があるかどうかは、コンクリートが健全でつりあい鉄筋比以下の配筋であれば、変形(曲率変化)の大きな位置、すなわち、スラブ周辺の上端鉄筋の付着如何にかかるであろう。そして、端部ひびわれが生じている場合は、付着分布がスラブ内側へ移行しているから、上端筋の定着長さが十分あるかどうかが重要になってくるのである。

筆者らがある建物取壊し現場で実施したスラブ振動試験によれば、スラブ周辺の上端鉄筋付近のコンクリート組織を破壊することによって、固有振動数が低下することを認めた。また、鉄筋付近のコンクリートの破壊が不完全(したがって、付着は健全)であれば、振動数がほとんど低下しない事実も認められた。

他方、薄肉スラブ(有効スラブ厚比が1/40以下)が小スパンの厚肉スラブに比べて、耐力上、余力が期待できないことが実験的に示摘されている⁴⁾。すなわち、大スパンスラブは理論上平板に近く、厚肉スラブは板としての耐力以外に、「一種のアーチ作用が存在する」と考えられている。

3.2 施工上の問題点

調査建物の場合、当時の工事記録も施工状況もほとんど不明に近く、施工上の問題点として言及するのは困難である。しかしながら、大スパンスラブといえども普通の小スパンスラブに比べ、施工面に本質的な相違があるとは思われない。したがって、スラブ施工という範囲でこの問題を考察しようとするならば、関係事項は、

(1) 配筋の管理

(2) 養生法と養生期間

にわけられよう。

第一の事項については、3.1に述べたように、配筋精度は構造上極めて重要である。特に9 ϕ 、13 ϕ 筋ではフックの抗力があり期待できないから、端部上面筋の定着長さは十分に必要である。

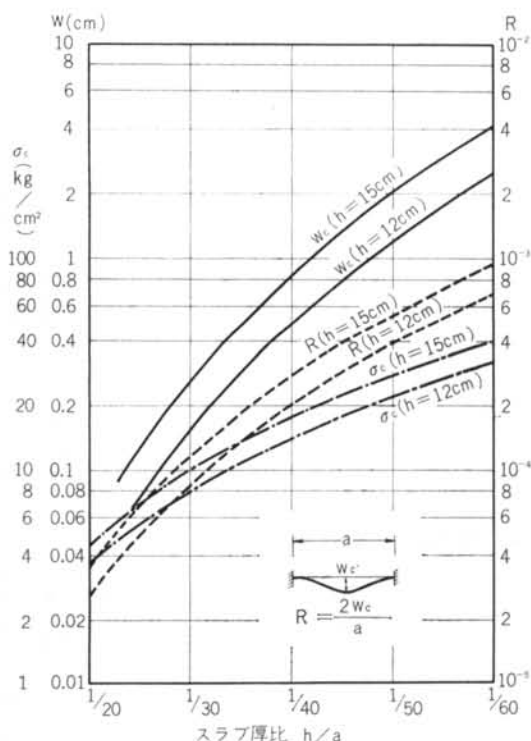
第二の事項については、事故調査の結果、養生期間に問題があるように思われる。大スパンスラブの場合、強度のない間は曲げ剛性も小さく、弾性変形が大きいであろう。したがって、まず第一にセメント、左官用砂、間仕切ブロック、パネル、パイプ等の比較的長期の取込集積がなされるならば、応力からではなく変形から、端部上面にひびわれが発生するかもしれない。

これを定量的に考えると、次のようになる。

スラブ型枠支柱を2,3週程度でとりはずす場合を想定して、 $E_c=2.3 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ ^{5) 2)}と仮定し、コンクリート自重によるスラブの最大たわみ w と、それに対応する曲げ撓度 R (短辺半スパンに対する最大たわみの比)、および断面平面保持によって生ずるコンクリート最大曲げ引張応力 σ_e を、周辺固定正方形板について計算すると、図-4の結果が得られる。

これによれば、スラブ周辺上端中央付近のコンクリート引張応力は、スラブ厚 h が12~15cmの場合、スラブ厚比が1/40前後で15kg/cm²程度に達し、自重だけでひびわれ発生の可能性がある。(このときの曲げ撓度は $2 \sim 3 \times 10^{-4}$ となる。因に、鉄筋コンクリート耐震壁実験における初期ひびわれ時のせん断変形部材角は $2 \sim 5 \times 10^{-4}$ といわれている。)⁵⁾

注) 3.3項の $E_{co}\psi_t$ に基づく。



図一4 周辺固定正方形板の自重によるたわみ、応力および曲げ撓度 ($E_c=2.3 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$)

さらに、G建物の調査でわかったことであるが、床板自体、まだ固有振動数が低いために振動しやすく、動的な力を受けやすいことも、ひびわれ発生の原因になりかねない。G建物の場合、仕上モルタル塗厚の効果によって振動が大いに低減する事実は、障害スラブの仕上の曲げ剛性が期待できない点と考え合わせると、振動障害を未然に防ぐ意味から非常に興味深い。

このように、養生期間、いいかえれば型枠支柱の存置期間は重要である。大手施工業者7社についての型枠存置間の実態調査(昭和38年10月～11月)⁶⁾によると、スラブ下の型枠存置期間は、15日以内の現場が38%、20日以内が45% (現行規定では強度と荷重のチェックを条件として21日)、これに対し梁底は、15日以内が21%、20日以内が30%になる (対象現場数は614で全国にわたっている) ことが報告されており、スラブにおいて、2週間以内に型枠支柱を取去る率の多い事実は注目に値する。

3.3 材料、特にコンクリートの問題点

コンクリート材令の極く若い時期とそれ以後の状態、すなわち、

- (1) 異常凝結または settling による早期ひびわれ
- (2) 乾燥収縮とクリープ

の二つが考えられる。

第一の点については、コンクリートの異常凝結が早期ひびわれ(打込み後1～2時間程度)と関連しているといわれている⁷⁾。ひびわれの発生位置と状況は床板、梁、基礎、仕上げ等のコンクリート全面に無法則状、あるいは鉄筋位置の沈みひびわれとして報告されている。

また、ある初期ひびわれの実態調査⁸⁾によると、11の事故例のうち床板が5例あり、そのうちの4例が鉄筋上にひびわれが発生している(分布状態は不明)。このような初期に発見されるひびわれの多くは settling によるものが多いとしている。

以上の調査例や、他の同じ調査例を考えてみるに、それらの事実から、スラブ、特に大スパンスラブについての共通性は見出せない。しかしながら、スラブのひびわれ発生にとって、異常凝結や settling はしばしば生じ得る一要素であると考えられるから、広い意味では事故の要因の一つに入るわけであるが、周辺のひびわれに重点をおくかぎり、乾燥収縮の方が直接関係するように思われる。

鉄筋コンクリートの収縮応力に関する文献⁹⁾によれば、収縮ひびわれについて、「初期発生 of キレツ部分が expansion joint 的效果をもつこと、したがってまた、そのキレツ幅が増々拡大し、他に波及しがたい」と考えられており、これは大スパンスラブの何らかの原因で生じた周辺ひびわれの増大の可能性を意味づけている。

次に、収縮応力を定量的に考察してみる。この場合、コンクリートの弾性係数の材令に伴う変化を考慮する。ただし、コンクリートのクリープによる影響は考えない。

問題を一次元とし、コンクリートと鉄筋の局部的な付着応力変化を無視すると、鉄筋コンクリートの自由収縮による応力は、

$$\sigma_{cl}(t) = \left\{ \frac{aE_s \epsilon_0 p}{np(af - be) + a} \right\} \cdot \phi_t - \left[\frac{aeE_s \epsilon_0 np^2}{\{np(af - be) + a\}^2} \right] \cdot \ln \left\{ \frac{a}{enp} \left(\frac{np}{\phi_t} + 1 \right) \phi_t \right\} \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$\sigma_{sl}(t) = -\frac{\sigma_{cl}(t)}{p} \quad \dots\dots\dots(2)$$

で表わせる。

ここに、

$\sigma_{cl}(t)$: 経過時間 t (週)におけるコンクリートの応力

$\sigma_{sl}(t)$: " 鉄筋の応力

E_s : 鉄筋のヤング係数

n : 鉄筋に対する4週コンクリートのヤング係数比

p : コンクリートに対する鉄筋の断面積比

$\phi_t = \frac{t}{a+bt}$: コンクリートのクリープ係数

$\psi_t = \frac{t}{e+ft}$: コンクリートヤング係数の材令に伴う変化を表わすもので、 $t=4$ (週)のとき $\psi_t=1$ となるような仮定係数^{脚注)}

$\epsilon_0 = \frac{S_n}{\lim_{t \rightarrow \infty} \phi_t}$: S_n はコンクリート乾燥収縮の最終値

また、鉄筋コンクリートの長さ方向の収縮変形を拘束することによってコンクリートにひびわれを生ぜしめる場合、コンクリートはその最大引張応力時に、ひびわれ位置以外は完全塑性状態に入ると仮定すると、ひびわれ位置の鉄筋応力 σ_{ss} は(1),(2)式を用いて(3)式で表わせる。

$$\sigma_{ss} = \frac{1}{p} \left\{ \sigma_{cc}(t) - \sigma_{cl}(t) \right\} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 $\sigma_{cc}(t)$ はコンクリートの最大引張応力である。

$$\phi_t = \frac{t}{1.5+0.25t} \quad \psi_t = \frac{t}{1.2+0.7t} \quad \text{脚注)}$$

$n=7$, $S_n=5 \times 10^{-4}$, $t=\infty$ について、(1), (3)式の結果を p について表わすと、図-5 のようになる。

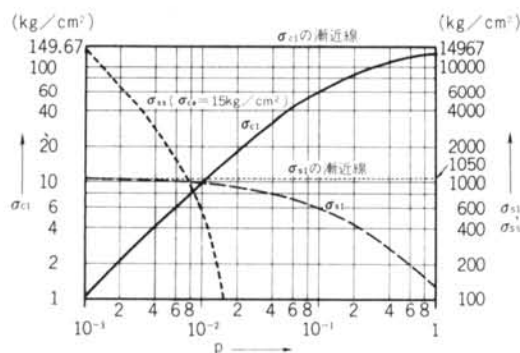


図-5

計算結果に基づいて推論してみると、自由収縮の状態に近ければ、 p が 1 % 以下では収縮だけによってコンクリートにひびわれが生ずる可能性は極めて少ない。変形がある程度拘束され、曲げ応力等が加わってひびわれが生じている部材では、ひびわれ位置の鉄筋はコンクリートの引張耐力に応じた引張力を受けることになる。完全拘束の場合で、 $\sigma_{cc}=15\text{kg/cm}^2$ 程度では、配筋量が 0.3 %

注) コンクリート弾性係数の材令に伴う変化は明らかでないが、強度の増加と同一傾向にあると考えて、(1)式の解を得る途中の積分が容易であるように、この形を仮定した。

$e=1.2$, $f=0.7$ はモルタル強度に関する坂博士の実験式¹⁰⁾に基づく。 t の大きな値に対しては、ヤング係数を大きく評価していることになる。

以下になると降伏応力を超えることになるが、実際にはその前に付着が破壊されることになるであろう。

調査スラブのうち、短辺ひびわれ位置の鉄筋量が最も少ない D 建物の場合でも、 p は 0.6 % 以上あるから、鉄筋応力は長期応力を含めて弾性域にあると思われるが、この点は、ひびわれ付近の鉄筋付着応力と併せて、さらに検討せねばならない問題である。

コンクリートの圧縮クリープについては、文献1)にスラブ事故調査に関連して述べてあり、長期にわたるたわみ進行の要因の一つとしてあげてある。特に、スラブ中央上面は配筋しないので、クリープが進行しやすいことが想像される。

§ 4. 床板の振動試験

ここでいう振動試験とは、床板中央に起振機をすえて行なう垂直方向の強制振動試験である。

床板の固有振動数 f は、

$$f = \frac{\alpha\pi}{a^2} \sqrt{\frac{D}{\rho h}}$$

の形で表わせる。

ここに、

α : 短辺スパン(なお、長辺スパンを b とする)

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} : \text{板の曲げ剛性}$$

ρ : 密度

h : 板厚

α : 板の周辺の拘束度を表わす係数

振動数は弾性係数の増加に対しては増加、密度、スパンの増加に対しては減少の関係にあり、スラブ厚に対しては比例増加する。

α については、単純支持のとき $(1+a^2/b^2)/2$ 、固定のときは $b/a=1$ で 1.823, $b/a=\infty$ で 1.134 となるような値であり、周辺固定にすると、単純支持の場合の 2 倍程度に振動数が高められる。

鉄筋コンクリートスラブの固有振動数は、多くの場合 20 C.P.S. 以上であって、これに対し、事故床板では 8 ~ 15 C.P.S. 程度である。

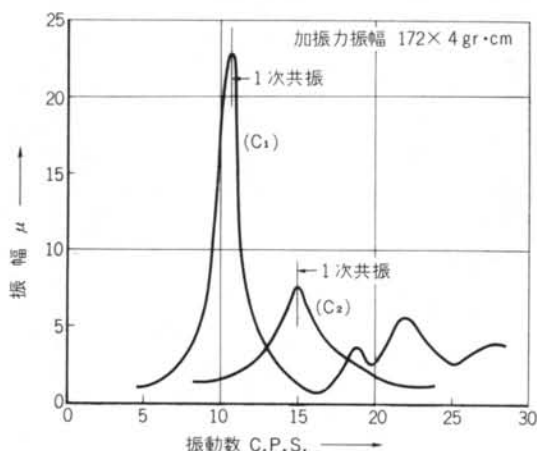
振動試験は、この固有振動数とスラブの振動数—振幅特性を求める目的で行なう。すなわち、電動起振機の回転数を連続的に変化させるときの振動波形を振動計で測定し、ペン書きオシロで記録させる。

調査スラブの振動数—振幅特性の例(C建物)を図-6に示す。曲線(C₁)が事故スラブであり、曲線(C₂)は健全

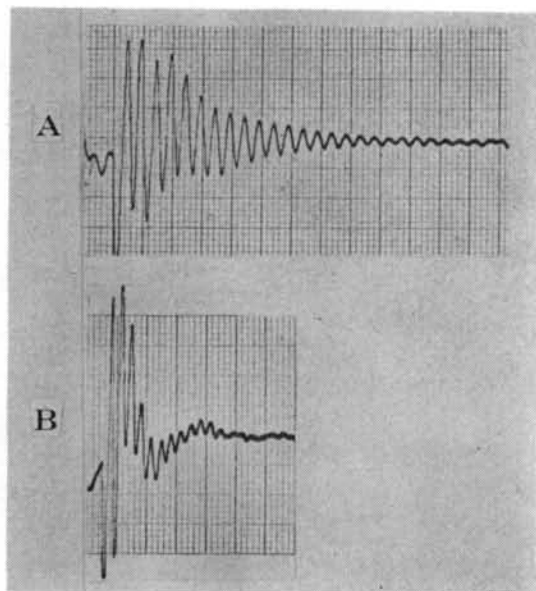
スラブである。

事故スラブの振動数—振幅特性は、必ず曲線(C₁)のように共振時の振幅が大きく、かつ、振動数が低下しており、また、衝撃荷重による振動波形はなめらかで、減衰が遅い。これに対し、健全なスラブの多くは、急激に減衰する。(写真—1参照。写真のAはC₁に、BはC₂に、それぞれ対応する。)

しかしながら、健全スラブでも共振時の振幅が大きく減衰波形のなめらかなものがいくつかあって、この逆は成立しない。これは、薄肉スラブの振動特性であろうと思われる。むしろ、事故スラブと健全スラブの大きな相違は、前者の固有振動数が低下している点にある。



図—6 C建物スラブの振動数—振幅特性



写真—1 衝撃振動波形(ペン書きオシロ)

鉄筋コンクリートスラブの振動数を適確に推定することとは、§1, 2に述べたとおり、あるいはまた、スラブに設置される機械の防振の面から必要なことであるが、

- (1) スラブの(動的)弾性係数
- (2) スラブ周辺の拘束度
- (3) 仕上材および積載の効果
- (4) 小梁がある場合の効果

が振動数に影響する。

これらについては、鉄筋コンクリート床板の振動として、次の機会にまとめるつもりである。

§5. む す び

以上の考察を通じて、スラブ事故の「重要な問題点」として考えられるものをあげると、

- (1) 大スパンスラブ(有効スラブ厚比が1/40以下と考えられる)は薄肉スラブであり、余力が期待できない(文献1)。一方、スラブの多くは、鉄筋の許容応力ぎりぎり設計されている。しかも、施工当初に over load の機会をもっている。
- (2) 事故を生じたスラブの本来の固有振動数は、15～18 C.P.S.程度と推定される。これに対し、電車や自動車から受ける建物の振動は8～15C.P.S.である。これら外力のもつ振動エネルギーがスラブの振動エネルギーに比べ、地盤、建物規模、振動源の距離に応じて無視できない場合がある。さらに、いくつかの悪条件が重なった状態を考えると、大スパンスラブは振動障害を生じやすいといえる。
- (3) 型枠支柱の存置期間の実態は、大スパンスラブに関する限り短いと推定される。これは上記2項目のどちらに対しても非常に有害である。

また、事故を増長する要因として、

- (1) 仕上材の剛性不足と over load
- (2) スラブ周辺部分の配筋不整(特に垂直方向)と定着余長の不足
- (3) 何らかの原因で生じたひびわれのコンクリート乾燥収縮による増長
- (4) スラブ中央部分の圧縮側鉄筋欠如

があげられよう。

以上、過去の調査結果と文献に基づいて問題点をまとめてみたが、事故を徹底的に分析し、未然に防止するためには、類型資料の収集と、今後の研究にまたねばならない。

＜参考文献＞

- 1) 最近散見される鉄筋コンクリート床スラブの大きな撓み：大野和男，土橋由造：建築材料，1963.6
- 2) 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説：1963
- 3) 鉄筋コンクリート板破壊に対する私見：坪井善勝：研報39，1957
- 4) 正方形床板の終局強度に関する実験的一考察：大野和男，土橋由造：論集76(大会)，1962
- 5) 建築学大系18巻：彰国社，1964
- 6) 多層建物のコンクリート工事における型枠支柱に加わる施工荷重と支柱の存置期間について：近藤基樹：竹中技術研究所，1964
- 7) コンクリート工事における早期キレツ発生原因の考察：近藤芳美：論集53，1956
- 8) 現場における鉄筋コンクリートの初期キレツ調査：東大建材研究室：研報24(1953)，同27(1954)
- 9) 鉄筋コンクリート構造の収縮亀裂の類型とそれに対する若干の考察（その2考察）：横尾義貫，角田栄，多屋幹夫：研報34（近畿支部），1956
- 10) コンクリートハンドブック：近藤泰夫，坂静雄：朝倉書店，1957