

[108] 衝撃をうける鉄筋コンクリート構造物の配筋方法の研究

正会員 ○竹 田 仁 一 (防衛大学校土木教室)

佐 山 光 紀 (防衛大学校土木教室)

千 原 和 人 (防衛大学校土木教室)

河 村 隆 (防衛大学校土木教室)

1. ま え が き

衝撃をうける鉄筋コンクリート構造物には静荷重の場合と異なる応答を生ずるので、これらの応答に対応する鉄筋補強が必要になる。勿論、衝撃の速さが小さい場合は静荷重と同様の応答（準静的応答とよんでいる）が発生し、速度が大きくなるに従い、衝撃に特有の応答（衝撃的応答とよぶ）が加わってその割合いを次第に増すが、通常の場合、両者がともに発生するので、補強鉄筋もそれらの両方に対応しなければならない。準静的応答は構造物のバネ的性質にもとづく弾塑性応答であり、通常の鉄筋コンクリート構造物の設計手法が準用される。ただし、後に述べるように鉄筋とコンクリートのそれぞれに対する速度効果を考慮に加える必要がある。

構造物の衝撃的応答は準静的応答とは全く異なり、衝撃で発生した応力波による応答である。これらを対象とした鉄筋補強の系統的研究はまだ報告されていないが、従来、経験にもとづく一つの配筋（多数の剪断補強筋を挿入する）方法が採用されて来た。

この研究は衝撃をうける鉄筋コンクリート版の合理的配筋方法を開発することを目的として行なった基礎研究であり、従来の慣用方法についても検討を行なった。

2. 無筋コンクリート版の衝撃応答

無筋コンクリート版およびモルタル版の衝撃実験において、版には二様の破壊が発生することが確認された²⁾。衝撃直後瞬間的に裏面剝離（scabbing）がおり（写真1(a)）、その後緩やかに曲げ破壊が生ずる。前者が衝撃的応答であり、ときには表面破壊ともなう。後者は準静的応答である。これらのことは版の各所で測定した歪波記録（図-1）から知られた。

この実験は版に直接衝撃を加えるのではなく、版の中心に先端を石膏で接着されている銅柱（ $4\text{cm} \times 4\text{cm} \times 130\text{cm}$ ）の他端に衝撃を加えた。版は直径 35cm の円孔をもつ厚銅板に中心を合わせて添わせ、設置した衝撃端で発生した

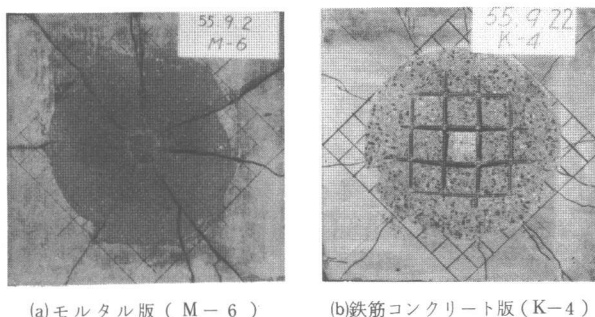
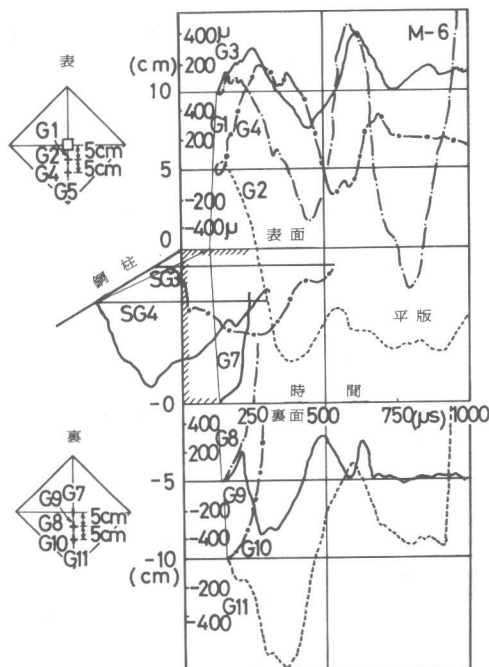


写真-1. 版の衝撃実験で発生した裏面剝離の例

図-1 モルタル版衝撃実験における入射歪波（SG3, SG4）と透過歪波（G1～G11）（M-6, 衝撃速度 8.9 m/s の場合）

応力波（歪波）は鋼柱中を伝播し、一部が版に透過し残りは反射されて鋼柱中を逆進するが、再び他端で反射される。そこで衝撃がまだ続いていれば発生応力波は反射波とともに進行しその一部がまた版中に透過する。版の中でも反射がおこり、表面波も誘起される。このような応力波の伝播、透過の結果として図のような歪波記録が得られる。図の水平軸は時間軸であると同時に鋼柱および版に貼ったゲージの位置あるいは版表面の中心（鋼柱との接合点）を表わしている。時間の原点は鋼柱上のゲージSG3に歪波先端が到達した時点をとっており、それぞれのゲージの測定した歪波はその時間軸上に引張りを(+)として画いている。

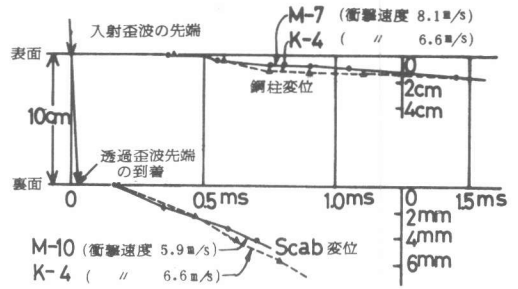


図-2 鋼柱の変位と版の剝離部分 (scab) の飛しょう

この試験体の場合は放射線方向のクラック（これは表面から裏面まで通っている）が丁度ゲージの位置に発生しているので、図からこのクラックの発生と進展を明瞭に追跡することができる。まづ、版の中心に歪波が到達してから150 μ s以内に裏面に放射線方向のクラックが発生する（G7, G8, G10の引張出力が急増することから）。しかし、このクラックはまだ表面では見られない。表面ではむしろG4からG2へと周辺から中心に向かって進展するが、G2に到達するのはかなり遅く、1ms以降であることが知られる。その以前（約400 μ sで）裏面ではG11付近に円周方向のクラックが発生し、裏面剝離が開始されることも知られる。このことはまた、図-2から確かめることができる。コンタクトゲージによって測定した裏面の剝離部分 (scab) の変位図から、それは歪波が版に到達した後約160~180 μ sの時点で飛しょうを開始することがわかる。しかし、この図に示すように版中心に接着されている鋼柱の変位が計測できる大きさに達するのはそれより200 μ sも遅い。従って、裏面剝離は鋼柱の変位によって発生するのではなく応力波によるものであることが明瞭になる。むしろ、表面の放射線方向クラックの完成が鋼柱の進行に伴う版中心の変位のためと推定することもできる。

これらの現象の発生時点は衝撃速度、版の厚さなどによって変化するが、何れの場合も裏面剝離は極めて早い時点で発生し、周辺割れなど版の変位の増大による破壊はかなり遅い。²⁾ 写真1(a)、図-1の場合は版厚が厚い（10cm）ので周辺割れは起こっていない。

3. 各種の配筋をもつ鉄筋コンクリート版の衝撃応答

無筋コンクリート版の衝撃実験によって明らかになった二種の応答に対する鉄筋補強の方法を研究するため、各種の配筋（図-3）をもつ鉄筋コンクリート版およびモルタル版を製作した。モルタルおよびコンクリートは表1の配合で、鉄筋はSD-35:10D, 6D, SR24:6 ϕ である。試験体は製作後28日間水中養生の後、気乾状態で地下室に保管し、材令3ヶ月以上で実験を行なった。平均の静的圧縮強度はモルタル 587 kg/cm², コンクリート kg/cm²である。

二種の応答のうち比較的遅く発生する準静的応答は、変形速度に大小はあるものの通常の弾塑性応答と同じであるからそれに対する配筋は通常の配筋方法を準用することができる。従って、この実験では衝撃的破壊（応力波による破壊）を防止する方法の研究に主眼を置いた。試験体の配筋方法のうち、(I), (II), (III)および(IV), (V)はそれぞれ引張鉄筋およびスターラップによる裏面剝離防止

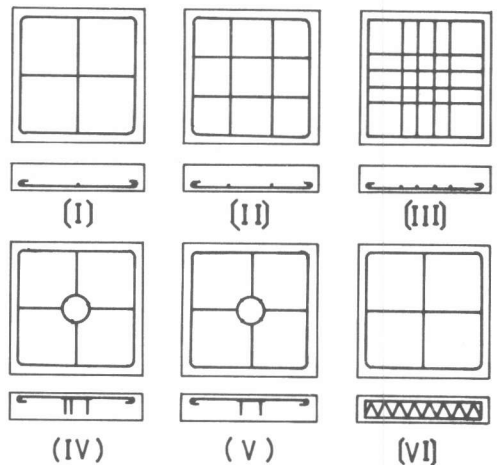


図-3 試験体配筋図

効果を検討するもので、鉄筋径およびかぶりを変えた数種の試験体を作製した。(Ⅳ)はいわゆる組鉄筋を挿入した場合である。

実験で得られた各点の歪波記録の例を図4に、裏面剝離の状況を写真1(b)に示した。図4から知られるように、無筋版の場合と比較して明らかに異なるのは表面に大きな引張歪が現われないことである。しかし、表面にクラックが入らないわけではなく、この例の場合もゲージ列の近くを放射線方向のクラックが通っている。クラックが表面ゲージ列を貫通した場合の記録を検討すると、表面クラックの発生はかなり遅く、2～3 milli-sec 後であることが知られた。つまり、準静的応答によるクラックである。

一方、裏面の歪波は図で見られるように無筋版の場合と大きな変化はなく、歪波が裏面に到達した直後放射線方向のクラックが発生し、200 μ s 以内に裏面剝離の縁が形成される。これは鉄筋入り版のすべてについて認められた。またこのことは図2でも明らかであり、裏面剝離の発生する時点は無筋の場合と殆ど同一であることが知られる。従って、これらの試験体の、特に(Ⅰ)～(Ⅲ)では鉄筋は裏面剝離の発生を防止することは勿論、剝離を遅らすことも出来なかったことになる。しかし、剝離部分が鉄筋にはさまれて飛散しなかったり、外見上剝離部分を縮少し、または剝離を一部分のみに留めたものもあった。特に組鉄筋を入れた(Ⅳ)の場合にこの傾向が多く認められた。しかし、子細に調査すると通常剝離する部分には既に微細なクラックが多数入っており、この実験の配筋方法によっては応力波による破壊を完全に防止することはできないことが知られる。それだけでなく、内部クラックが鉄筋面から発生している(あるいは終っている)場合が数多く見られたので、鉄筋がクラックアレストとして働くにせよ発生源として働くにせよ、その存在は応力波破壊に対して必ずしも有利ではないと考えられる。この実験では、版に透過した歪波の主波長は鉄筋径にくらべてかなり長いので、歪波の分散によって鉄筋界面のコンクリート中に過大の応力を発生させるとは考えられない。従って鉄筋表面から延びているクラックの発生には鉄筋界面の先在クラックが強く関与しているものと推定される。

図-4はスターラップの裏面剝離防止効果を検討するため版の面に垂直に異形鉄筋(Ⅳ)では3本、(Ⅴ)では4本を挿入した試験体の実験結果であるが、スターラップに貼り付けたゲージG20, G21はかなり大きな引張歪を記録しており、これらの歪が急増する時点は2msより遅いことが知られる。実験後の破壊形を調査しても(Ⅳ)と(Ⅴ)は裏面剝離の範囲が広く、しかも、剝離部分の周辺が薄くなっており、それが強制的に引きはがされたいわゆるspallingであることが認められた。これらのことから、(Ⅳ)、(Ⅴ)の試験体のスターラップはかなり効果的に働いており、剝離部分の飛散の開始を遅らせていることが知られる。しかし、上にも述べたように応力波によるクラックの発生そのものを防止することはできない。

表-1 試験体用モルタルおよびコンクリートの配合

	水セメント 比	単位重量 (kg/m^3)			
		水	セメント	細骨材	粗骨材
モルタル	0.50	341	682	1173	
コンクリート	0.50	208	416	703	920

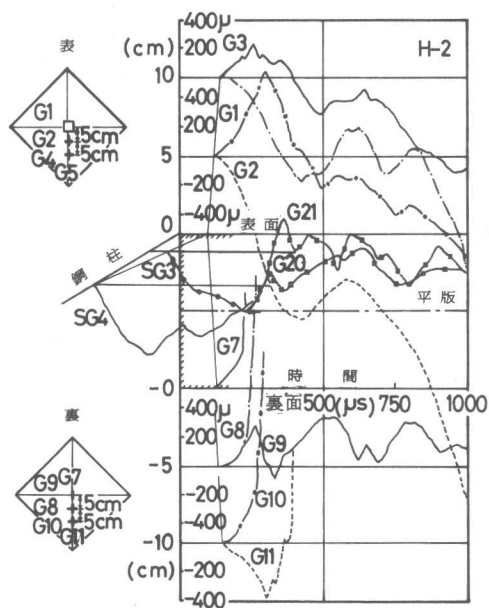


図-4 鉄筋入モルタル版の衝撃実験における入射歪波(SG3, SG4)と透過歪波(G1～G21)(H-2衝撃速度6.6m/sの場合。配筋は(Ⅴ))

なお、(I)～(III)の実験で、実験後試験体中の引張鉄筋に残留している歪の分布を実測したところ、裏面剝離に含まれていない領域には殆ど歪が残留していないことが知られた。従って大きな変形は剝離部分にだけ集中し、他の部分はこの変形に加わらなかったことになる。これも鉄筋コンクリート構造物の衝撃応答の特徴をよく示す現象の一つである。

4. 配筋方法の検討

既に述べたように、衝撃をうけるコンクリート版に鉄筋を挿入することによって裏面剝離をある程度減少することができる。しかし、応力波による内部クラック（マイクロクラックではない）を防止するうえで、主配筋は殆ど無力である。従って鉄筋コンクリート構造物の衝撃的応答に対処するための配筋の方針は、それにやや遅れて発生する準静的応答の際、既に発生している内部クラックが過大に拡大し、全体としての破壊に進むのを防止することに切り換えなければならない。

準静的応答が静的載荷と異なるのは変形が高速に進展することである。従って、コンクリートと鉄筋双方の応力・歪曲線が変化し、また、破壊限界も静的なもの³⁾と異なってくる。つまり、速度効果がある。その一例を図-5に示した。これはコンクリートの圧縮強度および鉄筋の上位降伏点応力度の平均歪速度（最大圧縮応力度または上位降伏点応力度までの平均）による変化を示している。これらは、衝撃を与えず、応力波の影響をできるだけ除きたいいわゆる高速載荷実験から求めたものである。高速載荷でも載荷が高速になるに従い、試験体内部には無視し得ない応力波が発生し、また計測上の問題があるので、載荷速度は図-5程度に制限される。この図で見られる速度効果以外の、応力・歪曲線に対する速度効果について、コンクリートと鉄筋との間に顕著な違いがある。図6のように高速載荷では上位降伏点応力が極めて大きくなり、上位降伏点と下位降伏点との差が大きくなる。しかも最大応力度はあまり増大しないので、速度によっては上位降伏点が最大応力度になることがある。このようなコンクリートと鉄筋との間の速度効果の相異は鉄筋コンクリート構造物の準静的応答を複雑なもの⁴⁾としている。

衝撃をうける鉄筋コンクリート構造物の準静的応答に対する配筋は、一応は速度効果を考慮した従来の配筋方法を準用して得られるが、まだ多くの研究が必要である。例えば内部に多数のクラックを持つ構造部材、あるいは⁵⁾剪断梁の準静的応答である。鉄筋とコンクリートとの間のボンド応力に対する速度効果、鉄筋コンクリート構造部材面の高速めり込み等についてもまだデータが不足である。

- 〔参考文献〕 1). 竹田外；コンクリート工学年次講演会1980， 2). 竹田外；セメント技術年報34， 3). 竹田外；ICM-1, Kyoto, 4). 竹田外；Earthquake Eng・Symp・50th Anniv. of Kanto Earthqu. 5). R. J. Hansen et al, J・of ACI, 1962-4

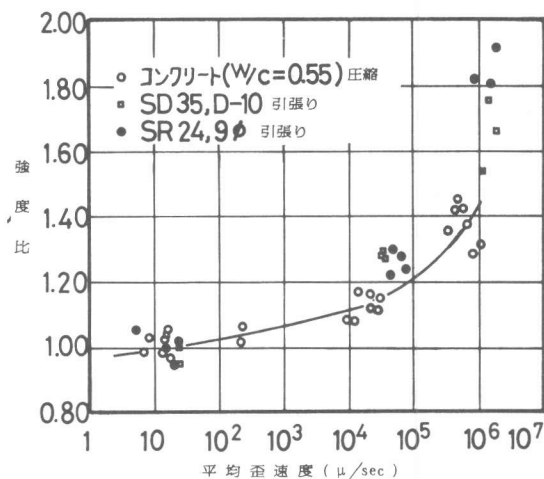


図-5 コンクリートの圧縮強度および鉄筋の上位降伏点応力度と平均歪速度との関係

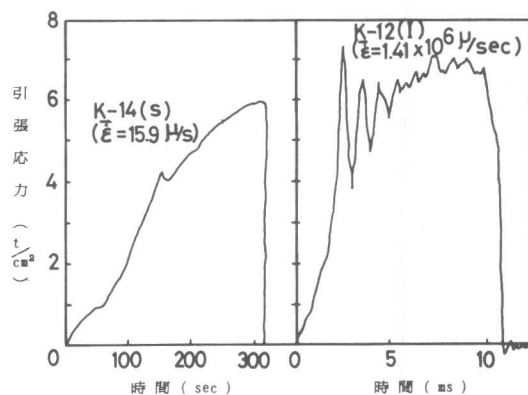


図-6 鉄筋(SD-35, 10D)の引張応力・時間曲線の例